

## بررسی تحولات ساختاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد پیشرفته

### استحکام بالای DP590

آرین قندی<sup>\*1</sup>، مرتضی شمعیان<sup>2</sup>، محمد رضا سلمانی<sup>3</sup>

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 جوشکاری شده 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 ایجاد شده 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 تمپر شده، 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 اندازه‌گیری شده 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<sup>\*1</sup>, M. Shamanian<sup>2</sup>, M. R. Salmani<sup>3</sup>

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](mailto:Aryan.ghandi@gmail.com)

## 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 means 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

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 در کاربردهای خودروبی 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 نقطه‌ای به کمک شبیه‌سازی 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.

توسعه فولادهای پیشرفته استحکام بالا در صنعت خودروسازی در گرو فهم بهتر متالورژی فیزیکی و مکانیکی این فولادها در طی جوشکاری مقاومتی است. جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی شامل برهمکنش‌های پیچیده‌ای بین ویژگی‌های متالورژیکی و فیزیکی مواد در حال جوشکاری می‌شود. در نتیجه برای حصول دکمه جوش<sup>1</sup> 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 می‌توان به بررسی زمان نگهداری بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش نقطه‌ای بین فولاد کم کربن و فولاد استحکام بالای پیشرفته DP590 اشاره نمود [1].

تحقیقات دیگری هم‌چون اثر تمپر چند پالس روی جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی [2]، اثر مورفولوژی نوک الکتروود 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 می‌توان به این نکته اشاره نمود که جوشکاری باعث تغییرات شدید ریزساختاری در مناطق مختلف جوش می‌شود که بر عملکرد مکانیکی فولاد موثر است [5].

### 1 - Weld Nugget

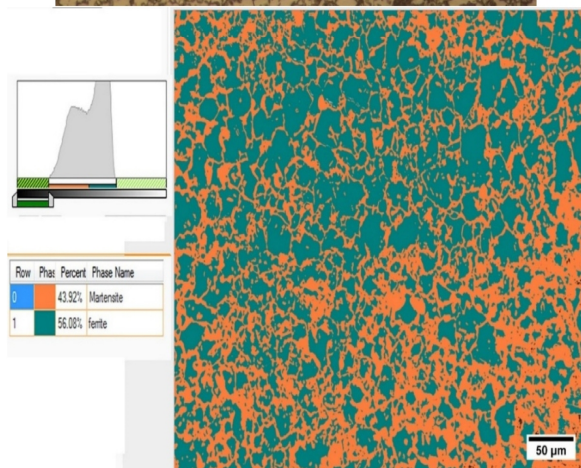
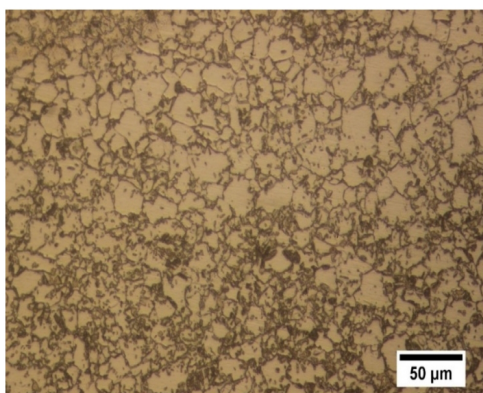
جدول 1- ترکیب شیمیایی فولاد DP590 (درصد وزنی) توسط کوانتومتری

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

جدول 2- 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  
 نشان داده شده است. این تصویر نشانگر وجود حدود 56 درصد حجمی فریت و 44 درصد حجمی مارتنزیت در فولاد مورد بررسی است.



شکل 1- تصویر میکروسکوپی از فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 شامل مارتنزیت تمپر شده در زمینه فریت

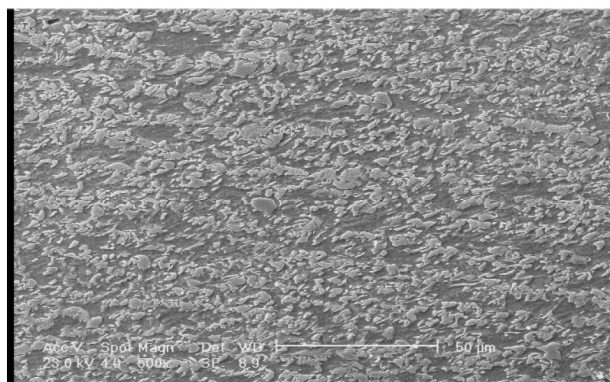
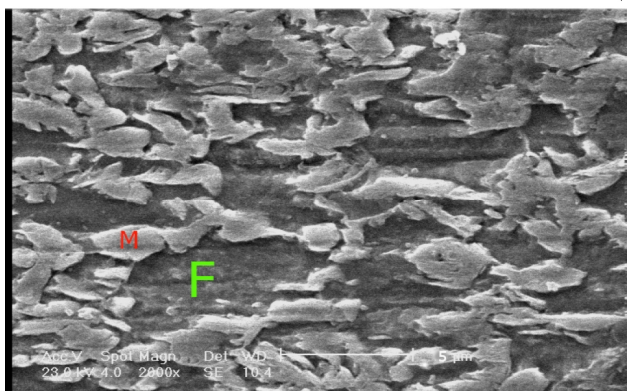
عملیات جوشکاری ورق فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 با ضخامت 1/6 میلی متر توسط فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با پارامتر جوشکاری طبق جدول (3) انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده انجام گرفت. بدین منظور ابتدا بر روی نمونه‌ها به کمک وایرکات برش کاری انجام شد و سپس نمونه‌ها 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

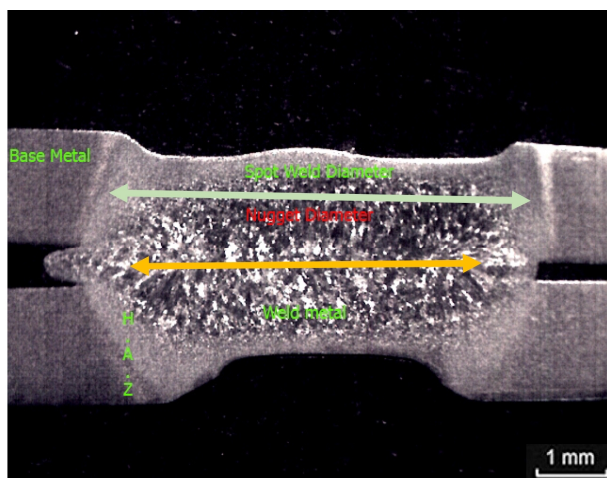
در شکل (2) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فولاد DP590 نمایش داده شده است. ریزساختار نشان‌دهنده جزایر پراکنده مارتنزیت تمپر شده (فاز تیره-روشن)

در شکل (1) تصاویر ریزساختاری فلز پایه فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 به دست آمده به وسیله میکروسکوپ نوری



شکل 2- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 در بزرگنمایی های مختلف ریزساختار نشان دهنده جزایر پراکنده مارتنزیت تمپر شده (فاز تیره روشن) در مرز دانه های زمینه فریت (فاز تیره)

مقاومتی فولاد DP590 به دست آمده به کمک شبیه سازی مشاهده می شود. نمودار CCT فولاد DP590 نیز برای ورقی با ضخامت 1/6 میلیمتر در شکل (5) مشاهده می شود.



شکل 3- 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 می یابد. بر این اساس چندین ناحیه با ریزساختار مختلف تشکیل می شود. ریزساختار در منطقه جوش به خاطر نرخ سرمایش بالا در استحاله آستنیت منجر به ساختاری تمام مارتنزیتی به صورت ورقه می شود. 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 جهت دار است. در نواحی نزدیک به فلز پایه ساختار مارتنزیتی به همراه درصد کمی فریت تشکیل شده است. با دور شدن از این منطقه، ساختار به فریت نرم و مارتنزیت تمپر شده تبدیل می شود. لازم

در مرزدانه های زمینه فریت (فاز تیره) می باشد. ساختار فولادهای پیشرفته استحکام بالا دوفازی به صورت زمینه فاز نرم فریت است که جزیره های مارتنزیتی در آن پراکنده شده اند و هرچه مارتنزیت بیشتر باشد استحکام افزایش می یابد. از طرف دیگر افزایش فریت شکل پذیری را بهبود می بخشد. بنابراین درصد فازهای موجود باید به صورتی انتخاب شود که فولاد علاوه بر داشتن استحکام بالا، شکل پذیری 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 نقطه ای از عوامل تأثیرگذار و تعیین کننده بر کیفیت جوش، خواص مکانیکی و عملکرد جوش ایجاد شده می باشد [8]. با توجه به انجام و توزیع حرارتی ایجاد شده حین جوشکاری چندین ناحیه با ریزساختارهای مختلف تشکیل می شود.

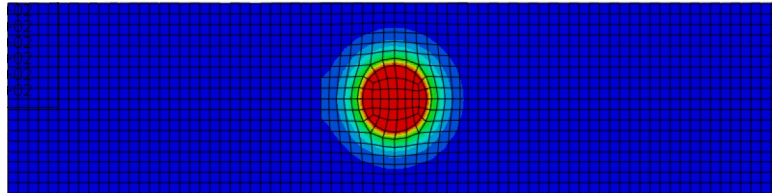
در شکل (3) منطقه ذوب، پهنای دکمه جوش، قطر اثر و منطقه تحت تاثیر حرارت نشان داده شده است. قطر دکمه جوش به حرارت ورودی ناشی از میزان جریان ورودی وابسته است. همچنین میزان عمق نفوذ به حرارت ایجاد شده در حین جوشکاری وابسته است که این حرارت ورودی با پارامترهای جوشکاری از قبیل جریان و فشار کنترل می شود. ریزساختار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

در شکل (4) دمای مناطق مختلف جوش شامل دکمه جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز پایه در حین جوشکاری

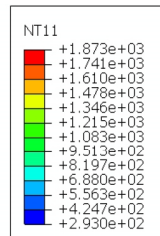


جدول 3- پارامتر انتخابی جوشکاری مقاومتی نمونه ها

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



ODB: hheat.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Thu Nov 01 10:51:48 Pacific Daylight Time 2018  
 Step: Step-1  
 Increment 43: Step Time = 1.000  
 Primary Var: NT11



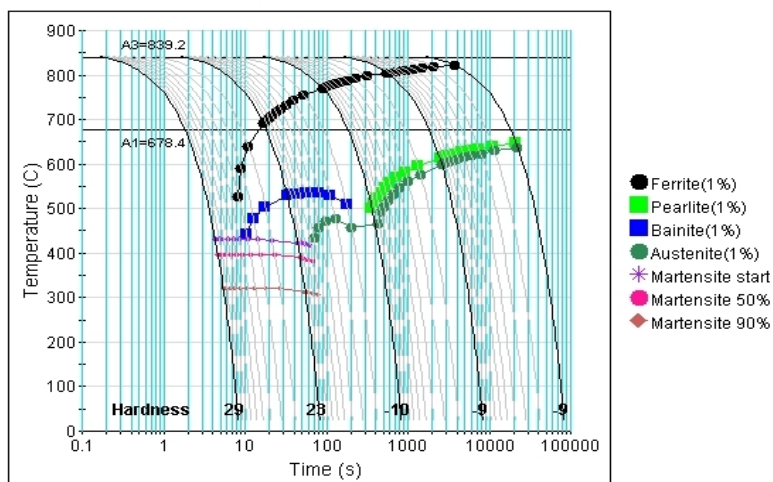
ODB: hheat.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Thu Nov 01 10:51:48 Pacific Daylight Time 2018  
 Step: Step-1  
 Increment 43: Step Time = 1.000  
 Primary Var: NT11

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

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 تمپر شده 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 است.

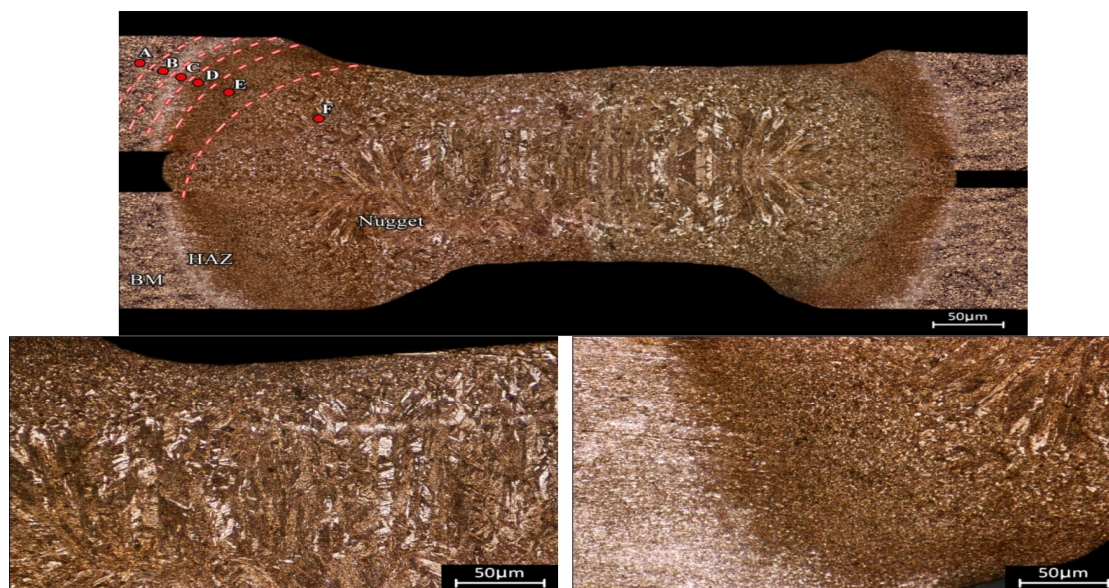
به ذکر است که دانه های مارتنزیتی در نواحی جوش درشت تر از دانه های مارتنزیتی در منطقه تحت تاثیر حرارت هست. مذاب در ناحیه دکمه جوش تحت فشار الکتروود به سرعت به صورت فریت دلتا منجمد و سپس در حین سرد کردن به آستنیت تبدیل می شود. در ادامه این ساختار می تواند به ساختارهای متنوع مانند مارتنزیت یا فریت ویدمن 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 می شود. همان طور که در شکل دیده می شود، منطقه

## CCT



Austenitisation temperature (C) : 860.0  
Grain size : 9.0 ASTM

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



شکل 6- 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

منطقه تقسیم بندی می شود:

الف: ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه<sup>2</sup>. در این منطقه دانه های درشت منطقه تحت تاثیر حرارت مشاهده می شود. (منطقه E در شکل 6)).

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

رشد این دانه ها به وسیله بیشینه دما و زمان در حرارت دهی در

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

1- ناحیه فوق بحرانی متأثر از حرارت<sup>1</sup> (UCHAZ). این منطقه حداکثر در دمای بالای Ac3 مشاهده می شود که خود به دو

2 - Coarse grain HAZ

1 - Upercritical HAZ

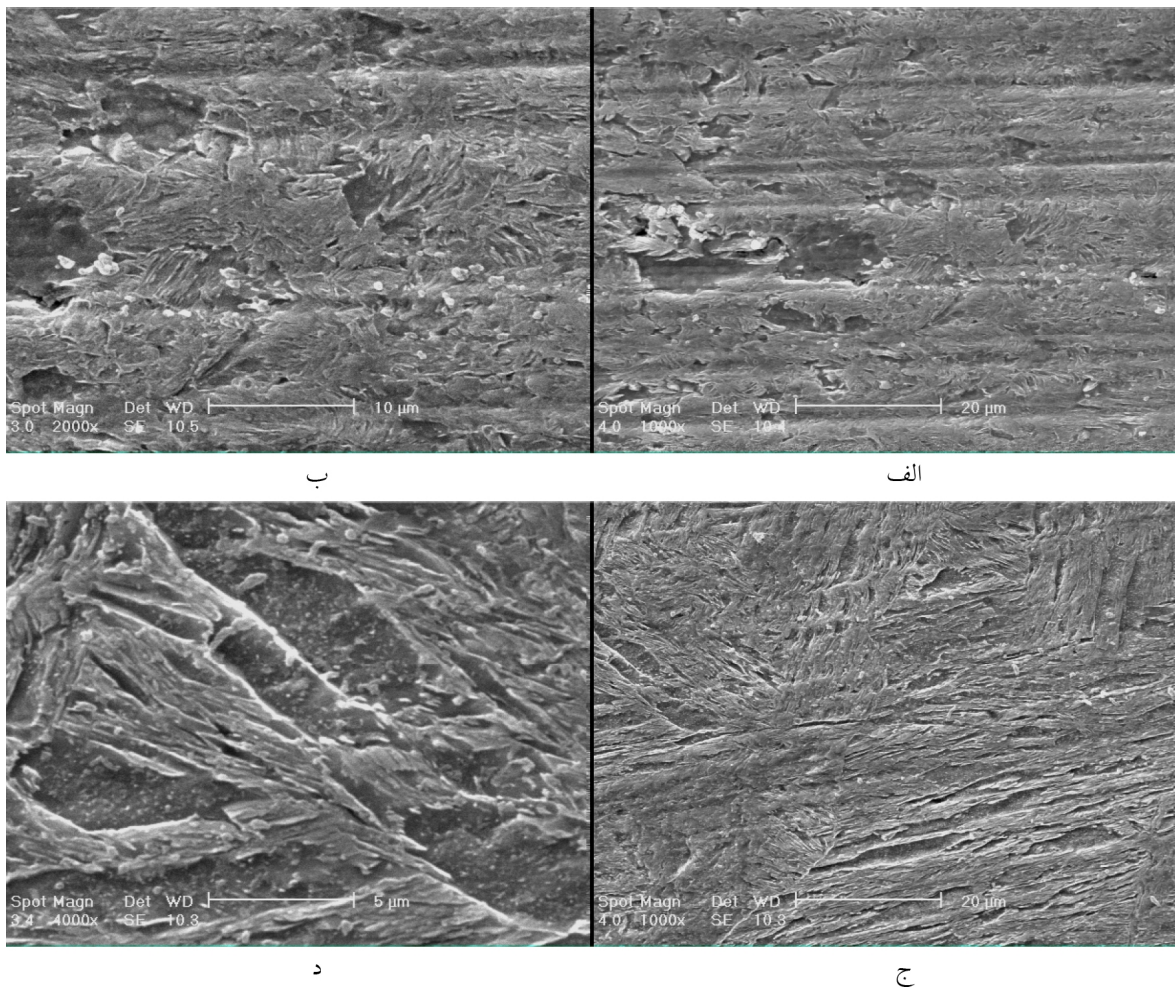
ریزساختار فلز پایه به فریت و آستنیت در حرارت ایجاد شده تغییر شکل می‌یابد. با توجه به میزان سرعت سرد کردن آستنیت، مارتنزیت و یا فریت می‌تواند تشکیل شود. در فولادهای DP590، این منطقه معمولاً شامل فریت و مارتنزیت است و هرچه حداکثر دما یا پیک دما در این منطقه بیشتر باشد، در حین سریع سرد کردن، درصد مارتنزیت افزایش می‌یابد (منطقه C در شکل (6)).

3- ناحیه متأثر از حرارت تحت بحرانی (SC HAZ):<sup>3</sup> در این منطقه حداکثر دما زیر خط  $Ac_1$  است که در این منطقه یک ساختار شبه پایداری از مارتنزیت و فریت به همراه کاربیدهای

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

به علت سرعت بالای سرد شدن و وجود مارتنزیت سوزنی<sup>1</sup> 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<sup>2</sup> (ICHAZ): در این محدوده حداکثر دما در محدوده بین  $Ac_1$  و  $Ac_3$  است و



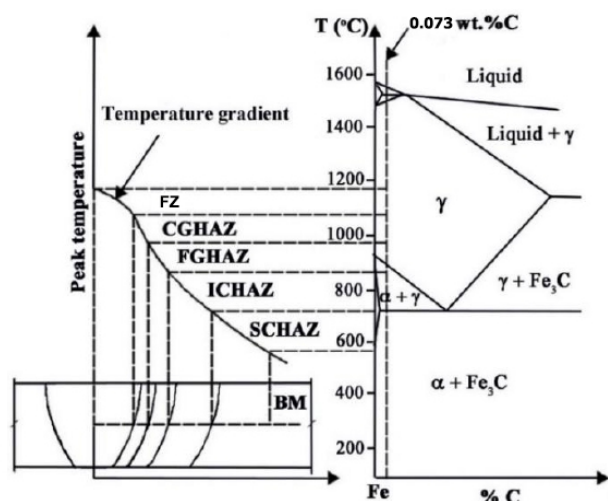
شکل 7- ساختار نمونه جوشکاری شده DP590 توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) و (ب) مربوط به منطقه تحت تاثیر حرارت، (ج) و (د) مربوط به منطقه جوش می باشد.

1 - Lath martensite

2 - Intercritical HAZ

3 - Subcritical HAZ





شکل 8- 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 باقی مانده می تواند از دلایل افزایش سختی در این ناحیه باشد. همچنین، از دلایل کمتری بودن سختی در منطقه جوش نسبت به منطقه تحت تاثیر حرارت می توان به مقدار کربن در دکمه جوش اشاره نمود. سختی مارتنزیت به میزان کربن وابسته است و از آنجا که در حین انجام احتمال نفوذ کربن در مناطق تحت تاثیر حرارت بیشتر است، می تواند از عوامل دیگر افزایش سختی در این ناحیه باشد. از آنجایی که دانه های مارتنزیت در ناحیه تحت تاثیر حرارت ریزتر است، بنابراین سختی ناحیه مذکور بیشتر می شود. در ناحیه فلز جوش ساختار عمدتاً مارتنزیت ورقه ای شکل باعث افزایش سختی شده است. در شکل (9) مناطق مختلف و نمودار سختی نشان داده شده است.

#### 4- نتیجه گیری

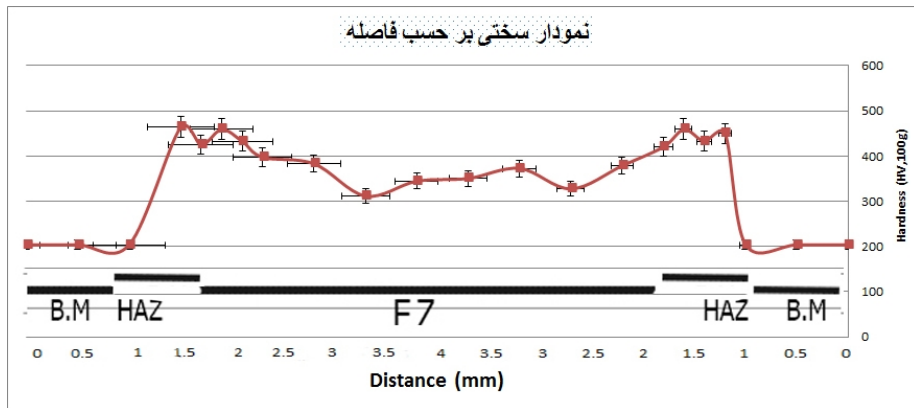
- ریزساختار فلز پایه فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 شامل حدود 44 درصد مارتنزیت تمپر شده در زمینه فریتی است. ریزساختار فلز جوش مارتنزیتی است و در منطقه تحت تاثیر حرارت ساختار عمدتاً مارتنزیتی به همراه نواحی پراکنده ای از فریت هست.

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

#### 2-3- ریزسختی سنجی

فولادهای پیشرفته استحکام بالا DP590 به دلیل دارا بودن عناصر آلیاژی از قابلیت سخت شدن بالاتری نسبت به فولادهای کم کربن برخوردارند. هنگامی که این فولادها جوشکاری مقاومتی نقطه ای می شوند، تحت اثرپذیری از اثر کویچ کردن الکتروودها که در تماس با سطح ورقه ها هستند، جوشی با ساختار ترد مارتنزیتی ایجاد می شود [11]. سخت شدن 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 سختی پذیری فولاد را افزایش می دهند، مانند منگنز، منجر به افزایش قابل توجه سختی فولادهای استحکام بالا می شوند. نمودار سختی جوش در شکل (9) نشان داده شده است. نمودار نشان می دهد که نمونه به 4 قسمت فلز پایه، منطقه نرم<sup>1</sup>، ناحیه متأثر از حرارت و دکمه جوش تقسیم بندی می شود. یک پیک بین دکمه جوش و ناحیه متأثر از حرارت وجود دارد که می تواند به تاریخچه حرارتی این منطقه و اندازه دانه های کوچکتر نسبت به دکمه جوش مرتبط شود. همان طور که مشاهده می شود، سختی مناطق متفاوت است به صورتی که در منطقه نزدیک دکمه جوش، سختی بیشتر از مناطق دورتر از دکمه جوش است. منطقه ای 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 بیشتر بودن سختی دکمه جوش نسبت به قسمت های دیگر وجود مارتنزیت بیشتر در ساختار است. سختی در منطقه فلز پایه به این دلیل از سایر مناطق کمتر است که شامل زمینه ای از فریت نرم می باشد. 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



شکل 9- نمودار سختی بر حسب فاصله میلی متر مربوط به نمونه جوشکاری شده

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

- 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 می‌افتد و در فلز پایه استحاله‌ای صورت نمی‌گیرد.

- با توجه به دمای مربوط به مناطق ما بین فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت مشاهده می‌شود 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,