علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۷۷–۶۹



المجم ج ج کار می ازمانشهای غیر خرب اران

اثر حرارت ورودی بر ریزساختار و سختی فولاد δ-TRIP با آلومینیوم بالا در جوشكاري ليزر فيبرى ياسر نجفى * ، فرشيد مالك قائيني ، يحيى ياليزدار ، سجاد غلامي " ۱- دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران ۲ – پژوهشکده نانو و مواد پیشرفته ، پژوهشگاه مواد و انرژی، تهران، ایران ۳- دانشکده مهندسی ، بخش مهندسی مواد ، دانشگاه شیراز ، شیراز، ایران

(دريافت مقاله: ١٣٩٢/١٢/٢٢ ؛ دريافت نسخهٔ نهايي: ١٣٩٥/٠٣/٢۶)

چکیدہ

تحقیقات اخیر معطوف به توسعه فولادهایی موسوم به فولادهایTRIPشدهاند که هر دو مؤلفه استحکام و چقرمگی را همزمان به مقدار مورد قبولی دارا است.با توسعه این فولادها ، نیاز به جوشکاری با مقدار فلز جوش کمتر و استحکام مناسب احساس میشود.به همین خاطر تحقیق حاضر به بررسی اثر حرارت ورودی در جوشکاری لیزر فیبر بر روی ابعاد فلز جوش، ریزساختارو سختی جوش حاصله در نوع خاصی از فولاد TRIP موسوم به فولاد δ-TRIP با مقدار کربن ۴.۰٪ و مقدار آلومینیوم ۴٪ پرداخته است.جوشکاریbead on plate در سـه حـرارت ورودی مختلف ۲۸،۶۰ و ۸۰ ژول بر میلی متر انجامشده و اثر آن روی ریزساختار و سختی حاصل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد کـه بـا افـزایش حرارت ورودی، نرخ سرد شدن کاهش یافته و این عامل باعث پایداری مقدار بیشتری از فاز نرم فریت دلتا می شود که درنتیجهی آن مقدار سختی فلز جوش كاهش يافته و بنابراين اختلاف سختي بين فلز پايه و فلز جوش تعديل مييابد.

کلمات کلیدی: فولاد δ-TRIP، عملیات حرارتی،جوشکاری لیزر فیبری، حرارت ورودی، آلومینیوم بالا، میکرو سختی

The effect of heat input on the microstructure and hardness of continuous fiber laser welded high Al-content δ -TRIP steel

Y. Najafi¹, F. MalekGhaini¹, Y. Palizdar², S. Gholami³ 1-Department of Materials Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran 2-Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Tehran, Iran 3-Department of Materials Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received 12 March 2016; Accepted 15 June 2016)

* نو سنده مسئول، يست الكترونيكي <u>vasernajafi311@yahoo.com</u>

۱ – مقدمه

Abstract

Recent research suggests that extraordinary combinations of strength and ductility can be achieved in the socalled TRIP steels. With the development of these steels, welding with small weld nugget size and acceptable strength are needed. For these reasons present study was carried out to investigate the effect of heat input onweld size, microstructure and the hardness of the welded metal of 0.4%C- 4%Al δ -TRIP steel after continues fiber-laser welding process. To achieve this goal a bead on plate welding with three different values of heat input 28, 60 and 80 J/mm were used. The results of welding process revealed that by increasing the heat input, cooling rate decreased and the volume percent of the δ -ferrite in weld metal increased due to the availability of sufficient time for partitioning of Al in high heat input which leads to the stable δ -ferrite and as a result the difference between the hardness of the weld metal in comparison to the base metal decreased.

Keywords: δ-TRIP steel, Heat treatment, Fiber laser welding, Heat input, High Aluminum, Micro hardness.

مارتنزیتی درآید[۹].به همین دلیل است که در فولادهایTRIPمرسوم درصد کربن در محدوده wt انتخاب می شود.ایده اصلی فولادهایδ-TRIP این است که اگر فریت دلتا در تمام دماها در حالت جامد حضور داشته باشد، ایجاد ریزساختارهای تمام مارتنزیتی را غیرممکن میکند. اگرچه آلیاژ در مراحل اولیهی توسعه خود قرار دارد، فرآیند ایجاد و خواص مکانیکی[۱۰] و جوشکاری مقاومتی نقطهای[۱۱] روی آن مورد بررسی قرار گرفته،اما اتصال آن به روشهای دیگر نیازمند بررسی بیشتر است.

جوشکاری اصلی ترین روش اتصال در صنایع خودروسازی است؛ بنابراین تحقیقات زیادی[۲, ۱۱–۲۲]روی جوش پذیری، ریزساختار و عملکرد AHSS ها برای کاربرد در خودروهای امروز و آینده انجام شده است.Nd:YAG،CO2 و اخیراً لیزر فیبر برای تولید ورقهای متصل شده با لیزر که به اشکال مختلف سه بعدی مورد نیاز در قسمتهای مختلف سازهی خودرو شکل داده می شوند استفاده می شوند[۲۳].

در میان تمام روش های جوشکاری لیزر،جوشکاری لیزر فیبری (FLW) اخیراً خواص کششی و خستگی بهتری برای اتصال فولاد DP980 به دلیل کاهش اندازه حوضچه مذاب، نشان داده است [۲۴, ۲۵] .بهعلاوه جوشکاری لیزر فیبری فواید دیگری همچون اندازه کوچک اشعه، هزینههای کمتر نگهداری، بازدهی بالا، دقت و اعتبار بالا و نیز فضای کم فولادTRIPیکی از موادی است که دارای ترکیب استحکام و سفتی بالا به همراه ازدیاد طول یکنواخت(UE) عالی در مقایسه با فولادهای HSLA و دیگر فولادهای AHS نظیر DP است.همراه این ویژگیها فولادهای TRIP همچنین دارای قابلیت جذب انرژی بیشتر در حین تصادفات، به دلیل استحالهی به تأخیرانداخته شده آستنیت به مارتنزیت در حین تغییر شکل است.ریزساختار متداول از فولادهای TRIP شامل فریت (α) ، بینیت (βα) و آستنیت باقیمانده (Rγ) ،(معمولاً ۵–۱۰ ٪) در زمینه توزیع می شوند[۱].

اندازه ، شکل ، ترکیب شیمیایی و کسر حجمی فازهای تشکیلدهنده ی ساختار بخصوص آستنیت باقیمانده برای سازماندهی خواص مکانیکی فولادهای TRIP بسیار حائز اهمیت هستند [۲]. نوع دیگری از فولادهای TRIP حاوی مقادیر بسیار مهمی از فاز فریت دلتایی هستند که از مرحله اولیه انجماد به صورت فاز پایدار در تمام دماها در حالت جامد باقی مانده است [۳–۵].

این برخلاف فولادهایTRIP مرسوم است [۶] که فاز غالب فریت آلوتریمورفیک است و میتواند در محدودهی دمایی گستردهای بهصورت کاملاً آستنیتی درآید[۷, ۸].

این حالت ، موجب می شود که در حین سرد شدن آلیاژ پس از جوشکاری در روشی مانند جوش مقاومتی که نرخ سرد شدن بسیار بالایی دارد ، ناحیه متأثر از حرارت به صورت کاملاً

مورد نیاز به دلیل طراحی فشردهی آن دارد[۳۳].اگرچه از مدتها قبل انواع فولادهای TRIP با روش های لیزر CO₂ و Nd:YAG جوشکاری شده و مورد مطالعه قرار گرفتهاند، مطالعهای پیرامون جوشکاری فولادهای TRIPδ-۲ با لیزر فیبر انجام نشده است.در تحقیق حاضر به بررسی اثر تغییر حرارت ورودی روی ریزساختار و سختی جوش حاصل در جوشکاری لیزر فیبر فولاد TRIPδخواهیم پرداخت.

۲- روش تحقيق

ترکیب شیمیایی فولاد به کار رفته در جدول ۱آورده شده است.در این تحقیق از ورق فولاد δ-TRIP نورد گرم شده به ضخامت ۳ میلیمتر استفاده شده است. این ورق از فولادی به دست آمده که شمش آن ابتدا در ابعاد ۲۴۰×۷۰×۶۰ میلیمتر در کوره خلأریختهگری شده و به منظور کاهش سیلیسیم و فسفر، کاهش آلودگیها و همچنین خالص سازی تحت عملیات ESR قرار گرفت. شمش به مدت ۱۰ دقیقه تا دمای^C ۲۰۰۰برای انجام نورد به منظور دستیابی به تختال با ضخامت ۱۰ میلیمتر حرارت دهی شده و سپس در هوا سرد شد. سپس تختال بـرای مدت ۸ دقیقه تا دمای C ° ۲۰۰۰ گرم شده و سپس نورد گرم روی آنها انجام شد تا به ضخامت ۳ میلیمتر برسد.برای دستیابی به ساختار بینیتی و نیـز ایجـاد آسـتنیت بـاقیمانـده در ساختار ،عملیات حرارتی مرسوم TRIPروی این فولاد انجام شد. سیکل عملیات حرارتی اعمالی بدین صورت بود که ابتدا در دمای C ۸۵۰° به مدت ۱۸۰ ثانیه مرحلهی آنیل بین بحرانی(IA) را سپری کرده و پس از آن در کورهی دیگری که حاوى حمام نمك با تركيب %NaCl 60 و 8aCl₂ 30 و Ba(CO₃)₂ 10% به مدت ۱۲۰ ثانیه Ba(CO₃)₂ 10% مرحله استحاله همدمای بینیتی(IBT) را تجربه کرده و درنهایت در هوا سرد شدند.ریزساختار فولاد در حالت قبل و پس از عملیات حرارتی در شکل ۱ قابل مشاهده است.ورق فولادی از جنس TRIP توسط ليزر فيبر به صورت TRIP توسط ليزر جوشکاری شد.پارامترهای متغیر و مقدار آنها در جدول ۲آمده است.

نمونهها پس از برشکاریوقالب گیری، تا سنباده ۲۵۰۰ آمادهسازی و سیس توسط محلول حاوی ذرات Al₂O₃ با انـدازه دانـه ۱/۰ میکرون پولیش شدند. پس از آن نمونه ها با استفاده از محلول حکاکی نایتال ۲٪ به مدت ۴ الی ۱۰ ثانیه و پس از آن برایوضوح بهتر و شناسایی مناسبتر فازها، به مدت ۱۵–۱۰ثانیه با محلول Le'pera [۲۶]حکاکی گردیدند. برای بررسی ریزساختار فلز جوش و فلز پایه از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS BX51M با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شد. همچنین نمونه ها برای دستیابی به تصاویری با بزرگنمایی بالاتر و انجام آنالیزہای عنصری(EDS)،با میکروسکوپ الکترونے مدل ZEISSمورد بررسی بیشتر قرار گرفتند.برای تعیین مقدار آستنیت باقیمانده[۲۷]نمونهها تحت آزمون پراش اشعه ایکس قـــرار گرفتنـــد.دســـتگاه مـــورد اســــتفاده از نـــوع Philips X'Pert MPDبوده که دارای لامپ پرتو ایکس کبالت با طول موج تكفام 1.78901A و ولتاژ شتابدهنده 40kV و جریان 40mA است.پراش ها در زاویه ۱۰ تـ ۱۰۰ درجـه (20) گرفته شدند. برای انجام آزمایش سختی سنجی از روش میکرو ویکرزبهوسیله دستگاهMICROMET®1 BUEHLER LTD ساخت کشور آمریکا با اعمال بار ۵۰۰ گرم و زمان ۱۵ ثـانیهبر اساس استاندارد ASTM E 384-99 استفاده شد[۲۸].برای جلوگیری از تأثیر سختی ها روییکدیگر ،سختی سنجی با فاصله ۳۰۰ میکرون از اثر کناری انجام شد.

۳- نتایج و بحث
۳- اثر عملیات حرارتی
شکل ۳ الگوی XRD مربوط به نمونه را قبل و پس از عملیات

حرارتی نشان میدهد. در محاسبه درصد آستنیت باقیمانده پبک های مختلفی را وارد محاسبات میکنند که در عدد به دست آمده تفاوت چندانی به وجود نمیآورد[۲۹].برای محاسبه این مقدار،از میانگین شدت پیکهای(111)، (200)و (211) برای فریت و پیکهای(111) ،(200) و (200) برای آستنیت از معادله(۱)[۳۰]استفاده شد:

$$V\gamma = 1.4 \, I\gamma / \left(I\delta + 1.4 I\gamma \right) \tag{1}$$

| جدول ۱-ترکیب شیمیایی فولادTRIP(درصد وزنی) | | | | | | | | | |
|--|------------------|------|----------|-----|-------------|---------------------|------------------|---|--|
| | Alloying Element | | | | | | | | |
| | С | Mn | Si | Al | Nb | Ti | C_{eq} | | |
| | 0.43 | 1.28 | 0.85 | 3.9 | 0.040 | 0.059 | 0.69 | - | |
| جدول ۲-پارامترهای متغیر در جوشکاری لیزر فیبر | | | | | | | | | |
| | | Dow | Travel | | | II. of In mot(I/mm) | | | |
| | | POW | er (J/S) | Spe | Speed(mm/s) | | Heat Input(J/mm) | | |
| | 2 300 | | 10.75 | | 27.9 | | | | |
| Weld Number | 1 | 300 | | 5 | | | 60 | | |
| | 3 | 400 | | 5 | | 80 | | | |

$$a\gamma = (\lambda/2\sin\theta).\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$
(3)

 $d_{hkl} = \lambda/2 \sin \theta \tag{4}$

 λ طول موج اشعه ایکس، θ زاویه پراش ، d_{hkl} فاصله صفحات اتمی و k, n و l پارامتر شبکه میباشد.برای نمونه قبل از عملیات حرارتی X_{c} برابر 1/4 و برای همان نمونه بعد از عملیات حرارتی برابر 1/47 به دست آمد.افزایش کربن موجود در آستنیت باقیمانده باعث پایداری آن در مراحل بعدی انجماد شده و در هنگام اعمال نیرو به مارتنزیت تبدیل شده و موجب بهبود استحکام و شکل پذیری می شود.در مورد پایداری انواع آستنیت باقیمانده، اثر اندازه و درصد کرین بر پایداری بخصوص در هنگام کشش،در کارهای آینده بحث خواهد شد.

سختی نمونه پایه در حالت نورد شده از میانگین ۶ نقط ه برابر ۳۲۶ویکرز به دست آمد که این مقدار با انجام عملیات حرارتی به ۲۶۷ ویکرز کاهش یافت.این کاهش سختی میتواندبه دلیل افزایش درصد فاز آستنیت باقیمانده به سبب افزایش مقدار کربن موجود و درنتیجه پایداری بیشتر آن در حین عملیات حرارتی، ایجاد بینیت عاری از کاربید (فریت بینیتی) و همچنین کاهش مقدار مارتنزیت احتمالی باشد.

۲-۲- جوشکاري

در جوشکاری لیزر پیوسته حرارت ورودی از رابطه (۵) محاسبه

که در آنγا میانگین شدت های مربوط به فاز آستنیت وδامیانگین شدت های فاز دلتا فریت حاصل از آنالیز پرتو ایکس است.با استفاده از داده های به دست آمده از جدول ۳ و انجام محاسبات لازم ،این نتیجه به دست آمد که با انجام عملیات حرارتی درصد آستنیت باقی مانده از مقدار ۹۶/۰٪ در حالت قبل از عملیات به مقدار ۸۱٪ افرایش داشت.عمادالدین و همکاران[۲۹]آزمایش پرتو ایکس را به منظور تعیین درصد آستنیت باقیمانده فولاد ۱۳۱۲ ، با آند مس نیز تکرار کرده و به این نتیجه رسیدند که با تغییر آند از کبالت به مس ممکن است اعداد به دست آمده برایγکمقداری کاهش یابند که این می تواند به خاط فلورسانس بالای تابش مس در مقایسه با کبالت در MR باشد که نتیجه آن کاهش عدد به دست آمده از تیوب مس است.

غلظت کربن در آستنیت ، Xc، ،در نمونه قبل و بعد از عملیات حرارتی با استفاده از معادله(۲)[۳۱]و الگوهایXRD (شکل ۳) به دست آورده شدند:

 $a\gamma = 0.3556 + 0.00453X_{C} + 0.000095X_{Mn} + 0.00056X_{Al}$ (2)

که در آن X_{Mn}،X_C و X_{Al} به ترتیب غلظت عناصر آلیاژی کربن، منگنز و آلومینیوم موجود در آستنیت (از طریق آنالیز شیمیاییEDS به دست آمدند) و aγ پارامتر شبکه آستنیت در واحد نانومتر است با استفاده از معادله (۳) و(۴) محاسبه شده



شکل ۱-ریزساختار فولاد (a) پس از نورد گرم و (b) پس از عملیات حرارتی



$$Q = \frac{P}{V} \tag{5}$$

که در این رابطه: Q : حرارت ورودي (J/mm) P : توان (J/s یا W) و V : سرعت جوشکاری (mm/s) است. شکل۲ سطح مقاطع خط جوش های حاصل را در حرارت های ورودی مختلف که در جدول ۲ جزئیات آن آمده، نشان میدهد.همچنین تصاویر SEM نیز در گوشهی سمت چپ آنها قابل مشاهده است.با افرایش حرارت ورودی اندازه منطقه

جوش (FZ) افزايش مي يابد.

اثر حرارت ورودی روی عرض و عمق حوضچه مذاب نیـز در نمودار مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که واضح است با افزایش حرارت ورودی عمـق و عـرض منطقـه جوش افزایش یافته است.کمترین حرارت ورودی کمترین عمق

بیشترین عمق و عرض را بدون عیب یا حفرہ و یا تبخیر فلز جوش با کیفیت خوب ایجاد کرده است. ریز ساختار یکی از جوش ها در شکل ۴ (a) با بزرگنمایی بالاتر قابل مشاهده

درصد ألومينيوم بالا در اين فولاد ، باقي ماندن فاز فريت دلتـا را تا دماي محيط تضمين مي كند؛ زيرا ألومينيوم عنصر پايداركننـده فاز فریت بوده و مقادیر بالای %twt باعث وسیع شدن منطقه فریت دلتا در دیاگرام دوتایی Fe-Al و پایداری آن تا دمای محيط مي شود (شكل ۴ (b)).

در پیش بینی که G.S.Jung و همکاران [۱۱]با استفاده از نرمافزار برای فولادی با ترکیب شیمیایی مشابه این فولاد انجام دادنـد،در جوش مقاومتی فولاد ، فاز فریت دلتا در دمای محیط در منطقه جوش موجود نبود؛ اما مشاهده آن در عمل با توجه به نرخ سرد شدن، ای بالا در هـر دو روش جوشـکاری مقـاومتی و لیـزر تعجب آور نيست.

درصد حجمي فاز فريت دلتاي موجود در فلز جوش با استفاده از نے مافزاراندازہ گیے ی شدہ و تے اُثیر حے ارت ورودی روی



شکل ۴-(a) فاز دندریتی فریت دلتا در منطقه جوش شماره ۳ و (b) دیاگرام تعادلی دوتاییFe-Al

حرارت ورودی و در نتیجه آن، افزایش نرخ سرد شدن سختی جوش به دست آمده افزایش مییابد که این میتواند به دلیل کاهش مقدار فاز فریت و نیز افزایش احتمالی مقدار فاز مارتنزیت در فلز جوش بواسطه نرخ سرد شدن بالا باشد. افزایش نرخ سرد شدن با ایجاد تاثیر دوگانه روی فازهای فریت دلتا و مارتنزیت موجب افزایش سختی نمونه ها می شود. از آنجایی که تشکیل فریت دلتا نیاز به زمان مناسب در دمای بالا آن در جدول ۴ نشان داده شده است. خط جوش حاصل از حرارت ورودی کمینه دارای کمترین مقدار درصد فریت در مقایسه با سایرین است. کاهش مقدار فریت دلتای نرم باعث کاهش میزان سختی جوش می شود. عرض و عمق حوضچه مذاب نمودار پروفایل سختی جوش ها را در یک طرف خط مرکزی (Center Line) نشان می دهد. همانطور که از نمودار نیسز مشین مشین می

| | | (hkl) | | | | | | |
|----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | | γ(111) | δ(110) | γ(200) | δ(200) | γ(220) | δ(211) | |
| درصد شدت | HR40 | | 100 | 0.3 | 47.0 | 0.4 | 20.6 | |
| نسبى | HT40 | 3.4 | 100 | 3.8 | 61.6 | 5.7 | 42.8 | |

جدول ۳-جزئیات آزمایش پرتو ایکس برای نمونه قبل و بعد از عملیات حرارتی

جدول ۴-اثر حرارت ورودی روی درصد فاز فریت دلتا و اختلاف سختی فلز پایه و فلز جوش

| | | حرارت ورودی | کسر حجمی | نسبت سختي فلز |
|------------|---|-------------|-----------|-----------------|
| | | (j/mm) | فريت دلتا | جوش به فلز پایه |
| | 2 | 27.9 | 43 | 2.1 |
| شماره جو ش | 1 | 60 | 47 | 1.9 |
| | 3 | 80 | 55 | 1.7 |





عرض جوش 🔺 عمق جوش■ نمودار ۱⊣ثر افزایش حرارت ورودی روی عرض و عمق حوضچه مذاب

برای نفوذ آلومینیوم دارد، افزایش نرخ سرد شدن موجب کاهش این زمان و در نتیجه کاهش مقدار فریت دلتا و از آنجا افزایش مارتنزیت در ساختار فلز جوش می شود.

اختلاف سختی بین منطقه جوش و فلز پایه بـا افـزایش مقـدار فریت دلتا بهتدریج کاهش مییابد.سختی در فلز جوش در خط جوش شماره ۲ ؛ ۲/۱ برابر فلز پایـه اسـت کـه ایـن مقـدار بـا افزایش حرارت ورودی به 80J/mm به مقدار ۱/۷ برابر کاهش

مییابد که این میتواند منجر به بهبود خواص مکانیکی دیگر شود.

۴- نتیجه گیری اثر عملیات حرارتیTRIP رویریزساختار و سختی و نیـز اثـر تغییر پارامترهای جوش لیـزر فیبـر روی ریزساختار و سختی فولاد δ-TRIP بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

600

550

500

450

400

350

300

250

200

0

سختي(HV0.5)

intercritical annealed 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987. 27(7): p. 570-579.

7- De Cooman, B., Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004. 8(3): p. 285-303.

8- Jacques, P., Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004. 8(3): p. 259-265.

9- Ahmed, E., et al., On formability of tailor laser welded blanks of DP/TRIP steel sheets. Science and Technology of Welding & Joining, 2010. 15(5): p. 337-342.

10- Yi, H., K. Lee, and H. Bhadeshia. Extraordinary ductility in Al-bearing δ -TRIP steel. in Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2011. The Royal Society.

11- Jung, G., et al., Spot weldability of TRIP assisted steels with high carbon and aluminium contents. Science and Technology of Welding and Joining, 2012. 17(2): p. 92-98.

12- Grajcar, A., et al., Effect of heat input on microstructure and hardness distribution of laser welded Si-Al TRIP-type steel. Advances in Materials Science and Engineering, 2014.

13- López Cortéz, V.H., et al., Effects of the heat input in the mechanical integrity of the welding joints welded by GMAW and LBW process in transformation induced plasticity steel (TRIP) used in the automotive industry. Soldagem & Inspeção, 2010. 15(3): p. 234-241.

[14- Xia, M., et al., Fusion zone microstructure evolution of Al-alloyed TRIP steel in diode laser welding. Materials transactions, 2008. 49(4): p. 746-753.

15- Han, T.-K., B.-G. Park, and C.-Y. Kang, Hardening characteristics of CO2 laser welds in advanced high strength steel. Metals and Materials International, 2012. 18(3): p. 473-479.

16- Mohrbacher, H. Laser welding of modern automotive high strength steels. in Proceedings of the 5th international conference on HSLA steels. 2005.

17- Xia, M., et al., Metallurgical and mechanical properties of fusion zones of TRIP steels in laser welding. ISIJ international, 2008. 48(4): p. 483-488.

18- Amirthalingam, M., M. Hermans, and I. Richardson, Microstructural Development during Welding of Siliconand Aluminum-Based Transformation-Induced Plasticity Steels—Inclusion and Elemental Partitioning Analysis. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009. 40(4): p. 901-909.

19- Grajcar, A., et al., Microstructure characterization of laser-welded Nb-microalloyed silicon-aluminum TRIP steel. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014. 23(9): p. 3400-3406.

20- Amirthalingam, M., et al., Quantitative analysis of microstructural constituents in welded transformation-induced-plasticity steels. Metallurgical and Materials

- در اثر عملیات حرارتی مخصوص TRIP، سختی فولاد کاهش یافته و درصد آستنیت باقیمانده و همچنین مقدار کربن موجود در آن افزایش مییابد که این امر باعث پایداری این فاز شـده ومیتواند در اثر نیروهای واردهی بعدی و ایجاد کار سختی در حین تبدیل به مارتنزیت استحکام و چقرمگی را بهبود بخشد.آزمایش های مربوط به بررسی خواص مکانیکی در کارهای آینده ارائه خواهد شد.

با افزایش حرارت ورودی عمق و عرض منطقه جوش و نیز
مقدار فاز فریت دلتا افزایش می یابد و سختی حاصل کاهش
می یابد.

 اختلاف سختی بین منطقه جوش و فلز پایه با افزایش مقدار فریت دلتا به تدریج کاهش می یابد. سختی در فلز جوش در خط جوش شماره ۲ ؛ ۲/۱ برابر فلز پایه است که این مقدار با افزایش حرارت ورودی به 80J/mm به مقدار ۱/۷ برابر کاهش می یابد که این می تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی دیگر شود.

فولاد TRIP - هعلیرغم دارا بودن کربن معادل بسیار بیشتر از
حد معمول مجاز (٪۴۰) به دلیل ساختار دوفازی فریت مارتنزیت در منطقه جوش، جوش پذیری خوبی را با حضور
فریت دلتا از خود نشان داد.

منابع

1-Zackay, V.F., et al., The enhancement of ductility in high-strength steels. ASM Trans Quart, 1967. 60(2): p. 252-259.

2- Nayak, S., et al., Microstructure–hardness relationship in the fusion zone of TRIP steel welds. Materials Science and Engineering: A, 2012. 551: p. 73-81.

3- Suh, D.-W., et al., Influence of Al on the microstructural evolution and mechanical behavior of low-carbon, manganese transformation-induced-plasticity steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010. 41(2): p. 397-408.

4- Yi, H., K. Lee, and H. Bhadeshia, Stabilisation of ferrite in hot rolled δ -TRIP steel. Materials Science and Technology, 2011. 27(2): p. 525-529.

5- Chatterjee, S., M. Murugananth, and H. Bhadeshia, δ TRIP steel. Materials Science and Technology, 2007.23.(7)p. 819-827.

6- Matsumura, O., Y. Sakuma, and H. Takechi, Enhancement of elongation by retained austenite in

p. 263-268.

27- Dyson, D.J. and B. Holmes, Effect of alloying additions on thelattice parameter of austenite. J Iron Steel Inst, 1970. 208(5): p. 469-474.

28- ASTM, E., 384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. 2005, ASTM International West Conshohocken (PA).

29- Emadoddin, E., A. Akbarzadeh, and G. Daneshi, Effect of intercritical annealing on retained austenite characterization in textured TRIP-assisted steel sheet. Materials characterization, 2006. 57(4): p. 408-413.

30- M. De Meyer, D.V., K. De Blauwe, B.C.D. Cooman. in 41st MWSP Conference Proceedings. 1999. ISS.

31- Van Dijk, N., et al., Thermal stability of retained austenite in TRIP steels studied by synchrotron X-ray diffraction during cooling. Acta Materialia, 2005. 53(20): p. 5439-5447.

32- Xu, H.F., et al., Tempering Effects on the Stabilityof Retained Austenite and Mechanical Properties in a Medium Manganese Steel. ISIJ international, 2012. 52(5): p. 868-873.

33- Ghaini, F.M., et al., Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding. Scripta Materialia, 2007. 56(1)p. 955-958.

Transactions A, 2010. 41(2): p. 431-439.

21- Kim, C.-H., et al., A study on the CO2 laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010. 39(1): p. 79-86.

22- Parkes, D., et al., Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures. Materials & Design, 2014. 56: p. 193-199.

23- Quintino, L., et al., Welding with high power fiber lasers–a preliminary study. Materials & Design, 2007. 28(4): p. 1231-1237.

24- Xu, W., et al., Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloyand DP980 dual-phase steel joints. Materials & Design, 2013. 43: p. 373-383.

25- Farabi, N., D. Chen, and Y. Zhou, Tensile properties and work hardening behavior of laser-welded dual-phase steel joints. Journal of materials engineering and performance, 221 (2).012:p. 222-230.

26- Lepera, F.S., Improved etching technique for the determination of percent martensite in high-strength dual-phase steels.Metallography, 1979. 12(3):