آیا رعایت اصول فنی و کنترل کیفیت در جوشکاری می تواند به تنهایی ضامن سلامت و کارایی اتصالات جوشی به کار رفته در صنعت نفت باشد؟

دکتر سیروس جوادپور،دکتر سید احمد جنابعلی جهرمی
اعضای هیات علمی بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز
خلیل الله قیصری
دانشجوی دکتری مهندسی مواد دانشگاه شیراز

چکیده مقاله

جوشکاری یکی از مهمترین فرآیندها در تولید می باشد است که جایگاه خاصی را در صنایع مختلف خصوصاً در صنایع وابسته به نفت دارد. متخصصان این علم بر این باورندکه جوشکاری پرعیب ترین روش تولید است. بنابراین باتهیه و تنظیم دستورالعمل ها، استانداردها وآزمایشات دقیق کنترل کیفیت، سعی درکنترل عیوب ناشی از جوشکاری دارند. اما رعایت اصول فنی در جوشکاری به انضمام انجام تست های تشخیص کیفیت جوش می تواند به تنهایی ضامن سلامت و کارایی اتصالات جوشی در شرایط کاری باشد؟ این مقاله با بررسی جوشکاری خانواده خاصی از فولادها (فولادهای زنگ نزن آستنیتی)، نشان می دهد که یک اتصال جوشی با وجود موفقیت در آزمون های کنترل کیفیت با مشکلاتی در شرایط کاری مواجه شده است و خاطر نشان می کند که به همراه توسعه و به کارگیری تکنولوژی جوشکاری، آشنایی با متالورژی جوشکاری نیز ضرورتی انکار ناپذیر در تضمین سلامت اتصالات جوشی است. باتوجه به کاربرد فزاینده جوشکاری در صنعت نفت، همچنین جایگاه خاص فولادهای زنگ نزن در تأسیسات این صنعت در شرایط متنوع دمایی، تنشی و محیطی، مقاله حاضر که خود برگرفته از یک تجربه صنعتی است می تواند تجربه ارزنده ای را به متخصصان عزیزکشورمان در این صنعت انتقال دهد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن آستنیتی - خوردگی بین دانه ای - ترد ساختاری فلز جوش - فاز سیگما

مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی با خصلت شکل پذیری مطلوب و مقاومت به خوردگی ، اکسایش و پوسته شدن در دماهای مختلف، استفاده گسترده ای را درصنایع مختلف نظامی، دریایی، غذایی، دارویی و صنایع مربوط به نفت (نفت، گاز،پتروشیمی ...) دارد. با وجود توسعه تکنولوژی ساخت این فولادها، هنوزمشکلات ومعایبی ناشی از قرارگیری در شرایط کاری در آنها بروزمی یابد.ازاین میان جوشکاری به عنوان پرعیب ترین روش تولید، استعداد قابل توجهی رادرشکل گیری عیوب درفولادهای زنگ نزن آستنیتی دارد. به همین دلیل بازرسان جوش، شرایط کنترل شده ای را در جوشکاری این فولادها در نظر می گیرند. بدین صورت که قبل از جوشکاری، روش جوشکاری، پارامترهای جوشکاری، الکترود مصرفی و عملیات پیش گرم وپس گرم لازم در فرم های خاصی ثبت می گردد[1]. از روی دستورالعمل تهیه شده جوشکاری انجام می شود . پس از انجام جوشکاری، توسط تست های کنترل کیفیت جوش که شامل تست های مخرب نظیر کشش، خمش، ضربه و تست های غیر مخرب نظیر آلتراسونیک، رادیو گرافی و مایعات نافذ است، سلامت و کیفیت جوش مورد ارزیابی قرار می گیرد وپس از اطمینان از عدم عیوب تکنولوژیک و همچنین مناسب بودن خواص مکانیکی اتصال، جوشکاری مورد تایید و سلامت آن بوسیله صدور برگه گزارش کیفیت جوش[2] ، تضمین می گردد[۲و۱].

با وجود روش های سختگیرانه در کنترل کیفیت جوش، تدابیر مذکور منعطف به جنبه های مکانیکی و تکنولوژی جوشکاری است و جنبه های متالورژیکی در آن کمرنگ به نظر می رسد. حتی اگراتصال از منظر خواص و عیوب تکنیکی با قابلیت جوشکاری بالا ارائه گردد اما به علت پدیده های متالورژیکی ناشی از نفوذ و استحاله فازها در شرایط کاری، مستعد به شکل گیری عیوب پیش بینی نشده ای در ساختار است که از منظر تست های کنترل کیفیت جوش پنهان می باشد.از جمله عیوب متالورژیکی متداول ناشی از جوشکاری در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، می توان به تشکیل فاز سیگما و ترد ساختاری در فلز جوش و حساسیت به خوردگی بین دانه ای در منطقه متاثر از جوش[3] اشاره کرد.

در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، الکترود یا سیم جوش مصرفی به گونه ای انتخاب می شود که دو تا پنج درصد از فاز فریت در زمینه آستنیتی حضور داشته باشد. حضور این مقدار فریت جهت ممانعت از شکل گیری ترک گرم در ساختار فلز جوش ضروری است. فاز مذکور شبکه دندریتی پیوسته ای را در فلز جوش تشکیل می دهد. اگر اتصال جوشی در شرایط دمایی بین ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد قرار

1- WPS (Welding Procedure Specification)
2- PQR(Procedure Qualification Record)
3- HAZ(Heat Affected Zone)

گیرد، به علت استحاله تدریجی فار فریت به فاز ترد وشکننده سیگما[1]، خواص مکانیکی فلز جوش به شدت تحت تاثیر قرار می گیرد .خصوصاً آنکه فاز مذکور ساختار پیوسته ای را در فلز جوش تشکیل دهد[۳و۴].

عیب متداول دیگر در اثر چنین فرایندهای متالورژیکی بصورت خوردگی بین دانه ای رخ می دهد. اگر چنانچه اتصال جوشی در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد قرارگیرد، به علت رسوب کاربید های کروم در مرز دانه ها، مناطقی خالی از کروم در اطراف مرز دانه ها به وجود می آید که به خوردگی حساس می شود[۵].

جهت ممانعت ازبروز چنین عیبی شرکت های سازنده تدابیری رادر نظرگرفته اند از جمله تولیدانواع پایدار شده نظیر۳۲۱. با این و جود مشکل مذکور به طور کامل حل نگردیده است. در نوع ۳۲۱ ، عنصر تیتانیوم موجب تشکیل کاربیدهای تیتانیوم می شودکه این کاربیدها از شکل گیری کاربیدهای کروم و حساسیت به خوردگی بین دانه ای ممانعت به عمل می آورد. اما در اثر انرژی ناشی از جوشکاری، کاربیدهای تیتانیوم در منطقه متاثر از جوش حل می شود و مجدداً حساسیت به خوردگی به طور موضعی در منطقه متاثر از جوش افزایش می یابد. [۶و۷].

عیوب متالورژیکی ناشی از جوشکاری این فولادها محدود به موارد مذکور نمی گردد و شامل عیوب دیگر نظیر ترک گرم[2] ، ترک بازگرمی[3] و فاسد شدن خط جوش[4] نیز می باشد که از حوصله این بحث خارج است[۸و۹].

روش تحقیق

فولاد مورد بررسی در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی پایدارشده، نوع ۳۲۱ است که دیواره اگزوز نیروگاه سیکل ترکیبی فارس از آن ساخته شده است. پس از گذشت ۲ الی ۳ سال از عمر اگزوز و در شرایط دمایی بین ۵۲۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد ودر محیطی آغشته به گازهای حاصل از احتراق، ترک هایی در امتداد فلز جوش و در منطقه متاثر از جوش دیده شد (شکل ۱). بررسی های انجام شده جهت ارزیابی تاثیر جوشکاری بوسیله آزمایشات متالوگرافی و مکانیکی صورت پذیرفت.آزمایشات مکانیکی شامل تست های ضربه و کشش مطابق با استاندارد[5] و مطالعه میکروسکوپی نمونه ها نیز توسط

1-Sigma Phase
2-Hot Crack
3-Reheat Crack
4-Weld Decay
1-AWS (American Welding Society)

میکروسکوپ نوری و الکترونی[1]، انجام شد. مقدار فاز فریت در فلز جوش به دو روش محاسباتی و آزمایشگاهی بررسی شد. در روش محاسباتی از روش WRC-1992و درآزمایشگاه از فریتومتری استفاده شد. در روش محاسباتی فریت اولیه با توجه به ترکیب شیمیایی اندازه گیری می شود. اما در روش فریتو متری بر اساس خصلت مغناطیسی، مقدار فریت اندازه گیری می گردد.که از تفاوت مقادیر این دو روش درصد فار استحاله یافته از فریت به فازهای ترد ارزیابی می گردد. نهایتاًترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه بوسیله دو روش کوانتومتری و آنالیز نقطه ای[2] اندازه گیری شد.به علت فقدان گزارشات کنترل کیفیت در پرونده های جوشکاری نیروگاه، جهت ارزیابی رعایت نکات فنی و کیفی در جوشکاری مجبور به استفاده از روش معکوس شدیم. در روش معکوس با پاک کردن تاریخچه عملیاتی، ساختاررا به حالت اولیه آن پس از جوشکاری بر می گردانیم. عملیات آنیل تدبیری مناسب جهت بازیابی خواص مکانیکی جوش در حالت اولیه آن پس از جوشکاری به روش تکنیک معکوس است.

نتایج و بحث

الف) ارزیابی ساختار و خواص مکانیکی فلز جوش

نتایج آنالیز شیمیایی فلز جوش و فلز پایه در جدول (۱) آمده است. فقدان عنصر تیتانیوم و نیوبیوم در فلز جوش نشان می دهد که الکترود مصرفی از نوع ۳۲۱ یا ۳۴۷ نبوده است.با به دست آوردن درجه رقت از طریق کنترل عنصر تیتانیوم در فلز پایه و فلز جوش همچنین با کنترل عنصر مولیبدن و کربن در فلز پایه و فلز جوش، الکترود مصرفیE۳۱۶L، تشخیص داده شد که انتخاب مناسبی از دیدگاه متالورژیکی نبوده است. حضور بالای عنصر مولیبدن در فلز جوش و شرایط دمایی کاری آن، استحاله فاز فریت به فازهای ترد و غنی از کروم نظیر سیگما را پیش بینی می کند[۱۰].

در جدول(۲) مقدار فاز فریت به دو روش در مناطق مختلف اتصال مقایسه شده است که با توضیحات داده شده، با مقایسه این دو روش مقدار فریت استحاله یافته به فازهای ترد حدود پنجاه درصد ارزیابی شد. با توجه به ساختاردندریتی وپیوسته فاز فریت اولیه(شکل۲)، پیش بینی می گرددکه حضور ساختار پیوسته و ترد سیگماکه به علت شرایط دمایی اگزوز در زمان های طولانی به وجودآمده، خواص مکانیکی فلز جوش را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. نتایج آنالیز عنصری، حضور فاز سیگمارااازمنظر

2-SEM (Scanning Electron Microscopy)
3-EDXA (Energy Dispersive X-ray Analysis)

ترکیب شیمیایی تایید می کند.ترکیب شیمیایی متوسطی از فاز سیگما در جدول (۳) آمده است. درصد وزنی عنصر کروم تا ۳۶ درصد وزنی نیز اندازه گیری شده است [۱۱].

نتایج آزمایش کشش و ضربه در جدول (۴) و شکل (۳) نشان داده شده است. کاهش انرژی شکست در تست ضربه از J ۱۶۵ پیشنهادی توسط استانداردهای تولید کننده فولاد تا J ۳۶، به طور بارزی ترد ساختاری را در فلز جوش نشان می دهد. اما کاهش خواص مکانیکی نظیر انرژی شکست و درصد ازدیاد طول می تواند ناشی از حضور عیوب تکنیکی در فلز جوش نظیر ذوب ناقص، عیب پاشنه و یا تخلخل باشد. عملیات آنیل با توجه به تکنیک روش معکوس تاثیر عوامل تکنیکی فوق را بررسی می کند. خواص مکانیکی بهبود یافته تا حدود استانداردهای تولید کننده در شرایط آنیل (افزایش انرژی شکست تا J ۱۵۰ و درصد ازدیاد طول تا ۵۷ درصد)، به روشنی و وضوح نشان می دهد که افت خواص مکانیکی در فلز جوش ناشی از عیوب تکنیکی نبوده است و تاثیر عوامل متالورژیکی را در ترد ساختاری تدریجی فلز جوش نشان می دهد. مطالعه سطوح شکست فلز جوش در شرایط کار شده با حالت آنیل نیز به نحو بارزی ترد ساختاری را در فلز جوش در اثر عوامل متالورژیکی نشان می دهد که در شکل(۴)تغییر فرم های قابل توجه در سطح ماکروسکوپی و میکروسکوپی، شکست نرم را به علت فرایند آنیل و بازگشت نشان می دهد.

نتایج بررسی ها با توجه به تکنیک روش معکوس نشان می دهد که روش جوشکاری از منظر رعایت اصول فنی و کنترل کیفی مطابق با استانداردها ی جوشکاری می باشد و آنچه که موجب ترد ساختاری شده، ریشه در عوامل متالورژیکی دارد. هر چند با وجود ترد ساختاری در شرایط مورد بررسی ، عیوبی در فلز جوش مشاهده نشده است اما آزمایشات، آستانه بحران را از نظر خواص مکانیکی نشان می دهد. علاوه بر آن شرایط مساعدی جهت رشد ترک به ازای زمان های طولانی تر و با تکمیل شدن استحاله فریت به فاز سیگما را نشان می دهد. از طرف دیگر همین خواص مکانیکی ممکن است در شرایط تنشی حادتر عامل تخریب گردد. بنابراین بادرنظر گرفتن سه دیدگاه فوق کنترل ساختار فلز جوش ضروری است.

ب) خوردگی بین دانه ای در منطقه متاثر از جوش

پدیده دیگر که ناشی از عوامل ناخواسته متالورژیکی در منطقه متاثر از جوش رخ داده، خوردگی بین دانه است. این پدیده نیز از منظر اصول کنترل کیفیت جوشکاری پنهان بوده ودر اثر زمان های طولانی قرار گیری در شرایط دمایی و محیطی خاص بروز یافته است. حساسیت به خوردگی بین دانه ای

به دلیل رسوب کاربیدهای کروم در مرزدانه ها وایجاد شدن نواحی خالی از کروم در اطراف دانه ها بروز یافته است. شکل(۵) شبکه پیوسته کاربیدهای کروم را در مرز دانه ها، نشان می دهد. ایجادچنین شبکه ی پیوسته ی کاربیدی به علت قرار گیری در شرایط دمایی حساس شدن رخ داده است. شبکه ی پیوسته ی مذکور نهایتاً منجر به خوردگی بین دانه ای می گردد. در شکل(۶) نحوه جوانه زنی ترک های خوردگی نشان داده شده است. حساسیت به خوردگی به عنوان پدیده نا خواسته در منطقه متاثر از جوش، ارتباط مستقیمی با جوشکاری و انرژی جوش دارد. انرژی جوش منجر به انحلال کاربیدهای تیتیانیوم در منطقه متاثر ازجوش شده است. این پدیده به افزایش کربن زمینه در ساختار منجرمی شودکه با افزایش حجم رسوبات کاربیدهای کروم و پیوستگی شبکه کاربیدی، حساسیت به خوردگی افزایش یافته و نهایتاً به جوانه زنی و رشد ترک های خوردگی منجر می شود. نحوه رسوب و انحلال کاربیدهای تیتانیوم و نقش آن در مقاومت به خوردگی به صورت یک تجربه موفق آزمایشگاهی در مرجع (۱۱) به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است.

نتیجه گیری

اکنون می توانیم به پاسخ سئوال اصلی این مقاله بپردازیم که آیا رعایت اصول فنی و کنترل کیفی می تواند به تنهایی ضامن سلامت اتصالات جوشی به کار رفته در صنعت نفت باشد؟ بررسی های ما نشان داد که انطباق خواص یک اتصال جوشی با نتایج مطلوب تست های کنترل و کیفیت، تنها ناظر به جنبه های تکنولوژی جوشکاری است. وحتی یک اتصال مطلوب از منظر تکنولوژیک، با قرارگیری درشرا یط دمایی و محیطی خاص و با فعال شدن عوامل متالورژیکی نظیر نفوذ، زمینه لازم را جهت شکل گیری عیوب متالورژیکی ایجاد می کند. با توجه به کاربرد قابل توجه فولادهای زنگ نزن در صنعت نفت در طیف های متنوعی از شرایط دمایی، فشاری و محیط های خورنده و تشابه آن با شریط بررسی شده در این مقاله، نتایج و پیشنهادات ارائه شده، قابل تعمیم است. بنابراین متخصصان جوشکاری در صنعت نفت بایستی علاوه برکنترل ورعایت نکات تکنیکی، با به کارگیری ملاحضات متالورژیکی از انتخاب ماده گرفته تا عملیات پیش گرم و پس گرم وآزمایشات تکمیلی نظیر انجام تست های خوردگی وبررسی های ریزساختاری، سلامت اتصالات جوشی را متناسب با شرایط دمایی و محیطی اتصال، تضمین نمایند.

پیشنهادات و راه حل ها

۱-با توجه به حساسیت اتصالات جوشی در فولاد های زنگ نزن آستنیتی نسبت به وقوع عیوب متالورژیکی در اثر گذر زمان، دستورالعمل های جوشکاری(WPS)، بایستی محدود به پیشنهادات استاندارد باشدوبازرسان جوش نبایستی تنهابراساس انجام تست های کنترل کیفیت معمول (PQR)، دستورالعمل پیشنهادی را تایید نمایند.

۲-با توجه به نتایج ارائه شده در این مقاله تست های کنترل و کیفیت (PQR) ،توانایی تضمین سلامت اتصال را دراثر گذر زمان ندارد از این رو تست های مذکور به همراه بررسی ریز ساختاری مناطق اتصال و همچنین انجام تست های خوردگی متناسب با محیط کاری اتصال تنها راه ارزیابی صحیحی از سلامت اتصال جوشی است که بایستی مورد توجه بازرسان جوش قرار گیرد.

۳-در فولاد های زنگ نزن آستنیتی پایدار شده (انواع ۳۲۱و ۳۴۷)، انجام عملیات پایدار سازی پس از جوشکاری، خصوصاً در محیط های خورنده ودر محدود ه دمایی حساس شدن ، ضروری است. دمای عملیات پایدار سازی در نوع ۳۲۱، ۸۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت پنج ساعت در نظر گرفته شود.

مراجع

۱-مجید برغانی"آزمایشات مخرب در جوش" چهارمین کنفرانس ملی جوش ، اسفند ۱۳۷۶ ص ۵۶-۴۲

2- AWS, Structural Welding Code – Stainless Steel, 01.6, 1999.

3- S.A.David, Ferrite Morphology and Variations in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds, Welding Journal ,1981, pp.63-73.

4- M.Schwind, J.Kallqvist, Sigma Phase Precipitation in Stabilized Austenitic Stainless Steels, Acta Mater, 2000 ,Vol. 48. pp.2473-2481.

5- V.Cihal, Intergranular Corrosion of Steel And Alloys, Elsevier Science, 1984.

6- M.G.Fontana, N.D.Greene, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1986

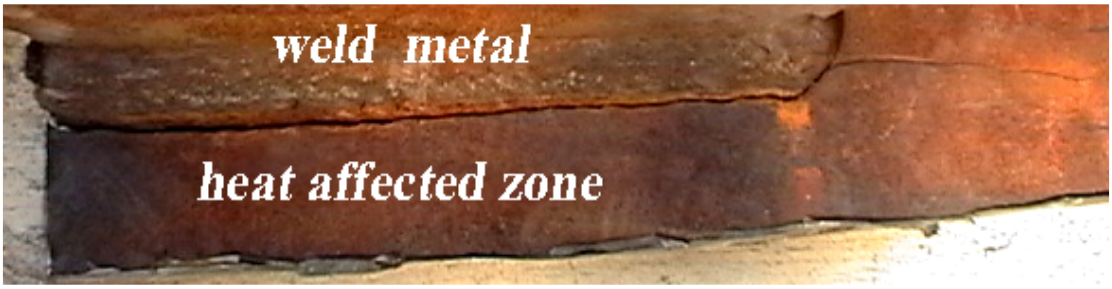
7- S. kou,Welding Metallurgy, Second Edition, Wiley Inter science, USA,2003 .

8- W.T.Delong, Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal, Welding Journal, 1974, pp.274-286.

9- L.Liand, R.W.Messler, Stress Relaxation Study of HAZ Reheat Cracking in Type 347 Stainless Steel, Welding Journal, 2000, pp.137-144.

10- J.Wegrazyn, A.Klimpel, The Effect of Alloying Elements on Sigma Phase Formation in 18-8 Weld Metals,Welding Journal, 1981, pp. 146-154.

۱۱-خلیل الله قیصری ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه شیراز ، سال ۱۳۸۳



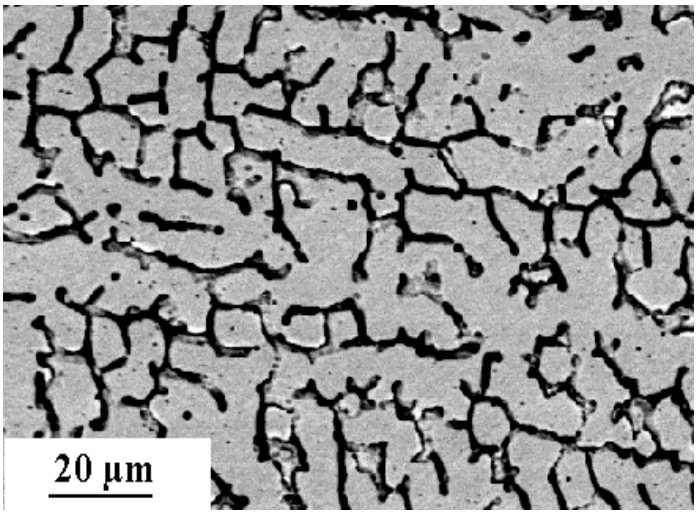
شکل (۱) موقعیت قرارگیری ترک ها نسبت به فلز جوش

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزجوش و فلز پایه

نمونه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Co	Nb	Ti
فلز پایه	۰/۰۳۵	۰/۴۸	۱/۶۳	۰/۰۳	<۰۰۱	۱۷/۲۴	۰/۲۷	۹/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۳۶
فلز جوش	۰/۰۲۲	۰/۷۳	۱/۶۹	۰/۰۲۴	۰/۰۰۸	۱۷/۹۹	۱/۸۵	۱۱/۴۵	۰/۱۶	۰/۱۱۵	۰/۰۱	۰/۰۷

جدول (۲) درصد فاز فریت در مناطق مختلف اتصال جوشی به وسیله دو روش متفاوت اندازه گیری

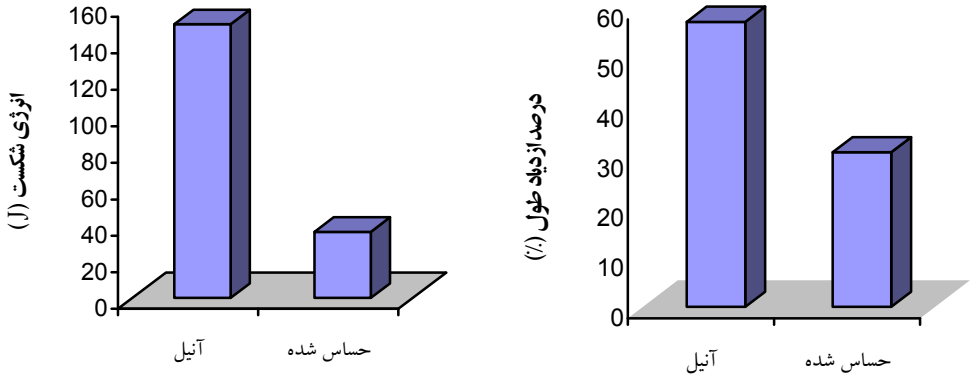
مناطق مورد بررسی	درصد فریت ٪	
	روش فریتومتری	روش WRC -1992 Diagram
فلز جوش	۴	۷/۵
منطقه متاثر از جوس	۱/۴	۴



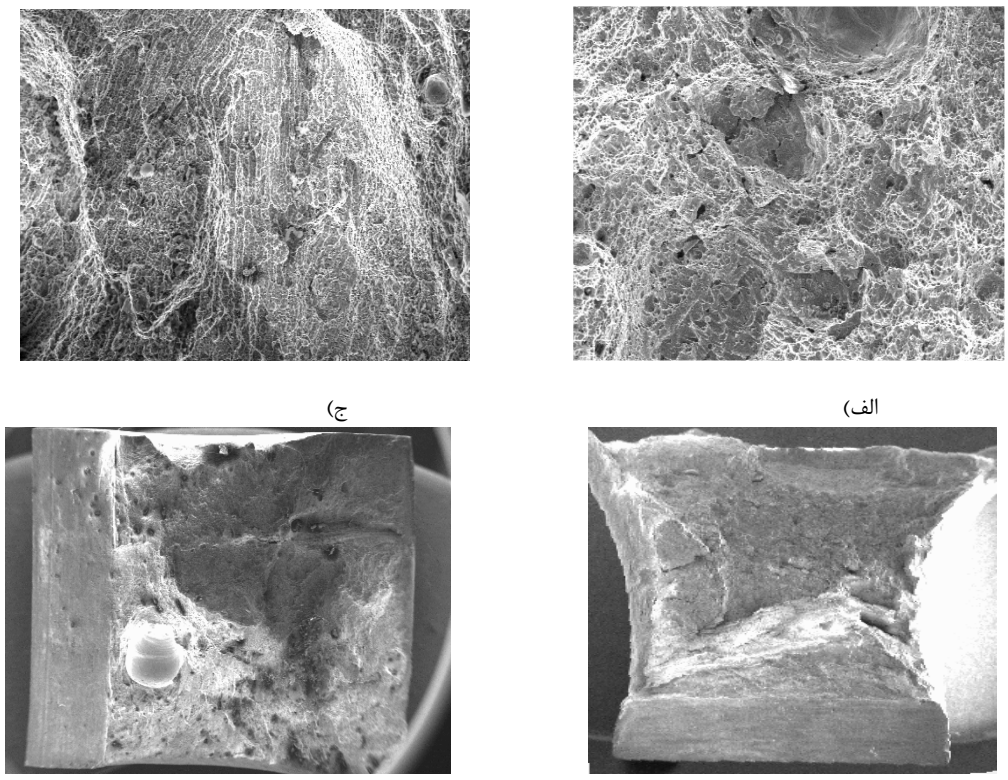
شکل (۲) میکروساختار دندریتی از فاز فریت و سیگما درفلز جوش

جدول (۳) ترکیب شیمیایی متوسطی از فاز سیگما ،اندازه گیری به روش EDXA

تر کیب شیمیایی متوسطی ازفاز های ترد غنی شده از کروم (سیگما)			
Cr	Ni	Fe	Ti
۲۴/۵	۳/۳	۷۱	۱/۱۷



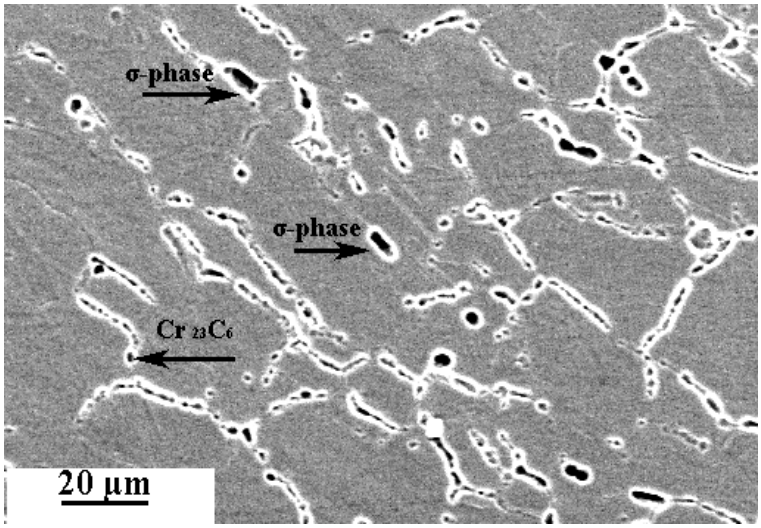
شکل (۳)مقایسه انرژی شکست ودرصد ازدیاد طول در حالت حساس شده با شرایط آنیل



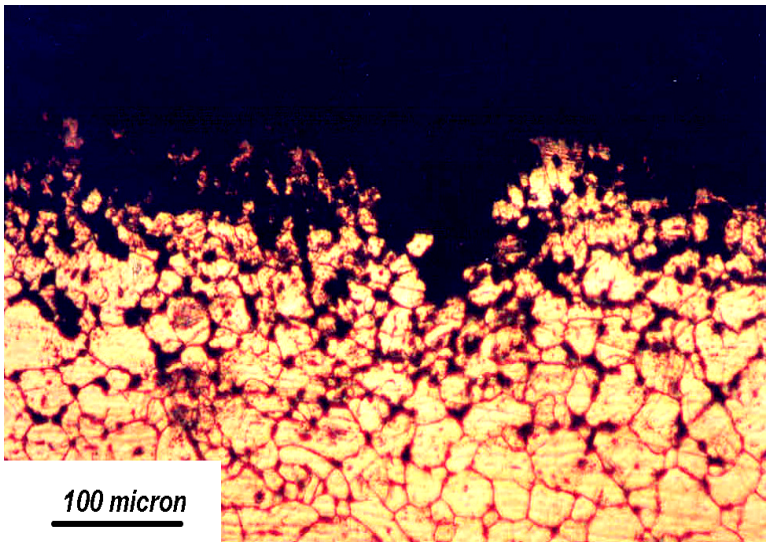
شکل (۴) ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی سطوح شکست فلزجوش الف و ب)آانیل،ج و د)حساس شده

جدول (۴) مقایسه خواص مکانیکی فلز جوش در شرایط حساس شده ،آنیل و استانداردهای تولیدکننده فولاد معادل

نمونه	سختی HV	حد نهایی کشش MPa	تنش شکست MPa	درصد ازدیاد طول ٪	انرژی شکست J
فلز جوش (حساس شده)	۱۹۰	۶۱۵	۶۱۵	۳۱٪	۳۶/۲۶
فلز جوش (آنیل)	۱۵۷	۵۵۴	۳۶۴	۵۷/۲	۱۵۰
حد استاندارد فولاد معادل	۱۵۷	۵۸۵	–	۵۵٪	۱۶۵



شکل(۵) شبکه پیوسته کاربیدها در مرز دانه های منطقه متاثر از جوش



شکل (۶) نحوه خوردگی بین دانه ای و جوانه زنی ترک های خوردگی در منطقه متاثر از جوش