



پژوهش نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

ارزیابی رفتار کارپذیری گرم فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se در شرایط ریختگی و کار شده با استفاده از آزمون کشش

علی سلیمی^۱، سیدمهدی عباسی^{۲*}، مریم مرکباتی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

۲- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: sma_abbasi@mut.ac.ir

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار کارپذیری گرم فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se در شرایط ریختگی و کار شده است. به این منظور، ابتدا آلیاژ AISI 303Se بوسیله کوره‌ی القایی تولید و در محدوده دماهای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ °C تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی، انحلال و آنیل قرار گرفت. از فولاد ریخته‌گی و کار شده، نمونه‌هایی به منظور آزمون کشش در دمای ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ °C برشکاری شد. از میکروسکوپ نوری و آزمون کشش به ترتیب به منظور بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی استفاده شد. نتایج آزمون‌های میکروسکوپی نشان داد که عملیات حرارتی و نورد گرم، سبب کاهش میانگین اندازه دانه‌ی فولاد از ۷۰ μm به حدود ۲۵ μm شد. عملیات حرارتی و نورد سبب کاهش استحکام دما بالای AISI 303Se در حدود ۳۸ درصد شد. اما با انجام عملیات حرارتی و نورد گرم، کارپذیری فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se حدود ۲۶ درصد افزایش یافت. دمای مطلوب برای کارپذیری گرم در فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se ریختگی °C ۱۱۰۰، اما در این فولاد کار شده در محدوده °C ۱۱۰۰-۱۰۵۰ بدست آمد. در هر دو نوع فولاد ریخته‌گی و کار شده، تبلور مجدد در دمای °C ۱۰۵۰ به صورت کامل انجام شد اما تبلور مجدد در فولاد کار شده سبب ساختار ریزدانه‌تر و در نتیجه پنجره کارپذیری وسیعتری شده است.

تاریخ دریافت: ۰۵ آبان ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۱ خرداد ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se
آزمایش کشش،
کارپذیری گرم

ارجاع به این مقاله:

علی سلیمی، سیدمهدی عباسی، مریم مرکباتی، ارزیابی رفتار کارپذیری گرم فولاد زنگ‌زن آستنیتی AISI 303Se در شرایط ریختگی و کار شده، با استفاده از آزمون کشش، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2025.485518.1204

۱- مقدمه

معایبی هستند که می‌توان به استحکام پایین‌تر نسبت به سایر فولادها، شکنندگی بیشتر، محدودیت در جوشکاری، محدودیت در عملیات حرارتی اشاره کرد. در کل این نوع از فولادها در صنعت خودروسازی، صنعت برق، صنعت ساختمانی، صنعت لوازم خانگی و نیز صنعت ابزارسازی کاربرد دارند [۱-۳]. فولاد AISI 303Se، یک نوع فولاد زنگ‌زن آستنیتی است که به دلیل قابلیت ماشین‌کاری بسیار خوب شناخته شده است. این فولاد به دلیل وجود عناصری مانند گوگرد، به راحتی برش خورده و تراشه‌های تولید شده در حین ماشین‌کاری به راحتی از ابزار جدا می‌شوند. به همین دلیل، فولاد زنگ‌زن آستنیتی

فولادهای خوش تراش، نوعی فولاد کربنی کم آلیاژ هستند که به دلیل قابلیت ماشین‌کاری بسیار بالای خود، در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای دارند. این فولادها حاوی عناصری مانند فسفر، سرب، منگنز و گوگرد هستند که باعث کاهش اصطکاک بین ابزار برش و قطعه کار شده و در نتیجه، فرآیند ماشین‌کاری به راحتی و با سرعت بیشتری انجام می‌شود. از مزایای فولادهای خوش تراش می‌توان به ماشین‌کاری عالی، افزایش عمر ابزار، سرعت بالای تولید و کیفیت سطحی بالا اشاره کرد. با این وجود، به دلیل وجود عناصری مانند فسفر و گوگرد، این نوع فولادها دارای

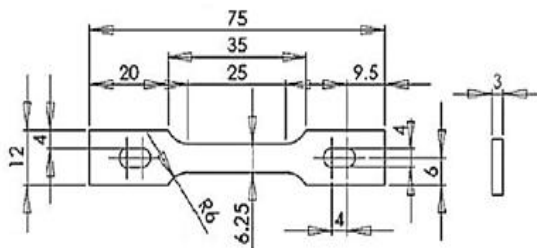
تسمه تولید شده تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای 1150°C به مدت ۱ ساعت قرار گرفت. سپس در آب سرد شد. جهت بررسی عناصر آلیاژی موجود در شمش ESR شده، از دستگاه کوانتومتری Belec، مدل Variolab استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se حاصل از آنالیز کوانتومتری در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب شیمیایی فولاد تولیدی در محدوده مجاز استاندارد ASTM A582 قرار دارد.

جهت بررسی رفتار کاربردی گرم و پنجره کاربردی، از شمش ریخته‌گری شده و نیز نورد شده فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se، تعداد شش نمونه کشش با استاندارد ASTM-E8M [۸] تهیه شد. شکل ۱، طرح‌واره این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌ها به صورت تخت با ابعاد $80 \times 12 \times 3 \text{ mm}$ و با طول سنجه 25 mm از تهیه شدند. آزمایش کشش گرم در دماهای 900 ، 1000 ، 1050 ، 1100 ، 1150°C و نرخ کرنش 0.1 s^{-1} و برای شرایط ریختگی و در دماهای 900 ، 1000 ، 1100 و 1200°C برای شرایط کار شده انجام شد. شایان ذکر است که قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها در همان دمای آزمایش به مدت ۱۰ دقیقه پیشگرم شدند. پس از انجام آزمایش کشش گرم، نمونه‌ها در آب سرد شدند.

برای بررسی اثر دمای تغییر شکل بر تحولات ساختاری نمونه‌ها پس از اعمال بار، ریزساختار آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS مورد مطالعه قرار گرفت تا تغییرات ریزساختاری، مکانیزم‌های شکست و وقوع پدیده‌های ترمیم دینامیکی بررسی شود.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se تولیدی پس از ESR در مقایسه با ترکیب اسمی آن (درصد وزنی).

Ni	Cr	Si	Se
۹/۶۷	۱۸/۱۷	۰/۹۷	۰/۱۳
S	P	Mn	C
۰/۰۴	۰/۱۸	۱/۸۲	۰/۱۳



شکل ۱: طرح‌واره نمونه کشش مورد استفاده در این پژوهش (اعداد به میلیمتر است) [۸].

AISI 303Se در صنایع مختلفی که به قطعات با دقت بالا و سطح صاف نیاز دارند، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین ویژگی این فولاد، قابلیت ماشین‌کاری بسیار خوب آن است. به دلیل وجود گوگرد، ابزار برش به راحتی روی سطح فولاد حرکت کرده و تراشه‌ها به صورت پیوسته تولید می‌شوند. اگرچه مقاومت در برابر خوردگی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se به اندازه فولادهای زنگ‌نزن سری ۳۰۴ نیست، اما همچنان در برابر بسیاری از محیط‌های خوردنده مقاوم است. این فولاد از چقرمگی بالایی برخوردار است و در برابر ضربه و تنش‌های ناگهانی مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. از دیگر قابلیت‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se، قابلیت خم شدن و شکل دهی است که در ایجاد انواع شکل‌ها کاربرد دارد [۱-۳].

فرایندهای تغییر شکل گرم نقش بسزایی در تولید انواع فولادها از جمله فولاد خوش‌تراش زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se ایفا می‌کند. در این فرایندها، انتخاب شرایط مطلوب و مناسب برای اعمال تغییر شکل گرم به منظور دستیابی به ساختار ریز و خواص مکانیکی مطلوب از قبیل استحکام و انعطاف‌پذیری، امری ضروری و حیاتی محسوب می‌شود. در انجام فرایند تغییر شکل در دماهای بالا، پدیده‌هایی همچون تبلور مجدد دینامیکی و استاتیکی و نیز بازیابی رخ می‌دهد که این پدیده‌ها می‌توانند منجر به تغییر در ریزساختار و در نتیجه تاثیر بر خواص نهایی فولادها شوند [۴-۷].

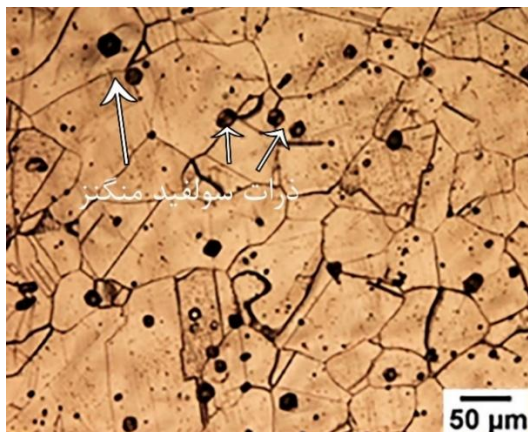
تاکنون تحقیقات وسیع و گسترده‌ای در خصوص بررسی رفتار کارگرم انواع فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی صورت گرفته است، اما اکثر این مطالعات به بررسی رفتار کارگرم در فولادهای آستنیتی متداول محدود شده‌اند. هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی رفتار تغییر شکل گرم در فولاد خوش‌تراش زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se پس از ریخته‌گری و پس از نورد گرم می‌باشد. در این بین، ریزساختار، استحکام کششی و کاربردی در دمای بالا برای دو شرایط فولاد بررسی شد. بدین ترتیب، شرایط مطلوب کارگرم و مکانیزم‌های ترمیم حاکم تعیین شد.

۲- روش انجام تحقیق

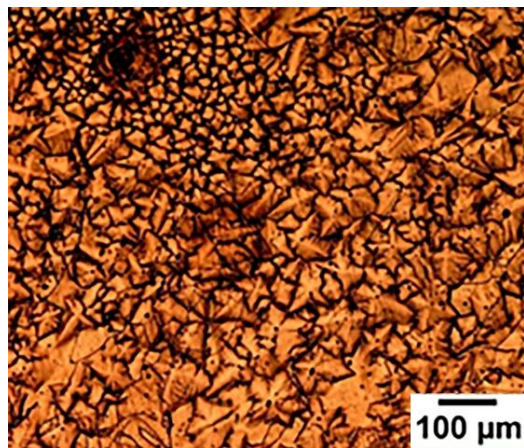
ابتدا جهت تولید فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se، مراحل ذوب و ریخته‌گری در کوره القایی صورت گرفته و در ادامه برای تصفیه فولاد، فرایند ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی (ESR) انجام شد. در ادامه، شمش در دمای 1150°C به مدت ۲ ساعت پیش‌گرم شد و تحت عملیات نورد گرم در همان دما با کاهش ضخامت به میزان ۵۳٪ قرار گرفت و در نهایت، در آب سرد شد. همچنین، در انتها جهت دستیابی به ساختار اولیه یکنواخت،

۳- نتایج و بحث

نمونه‌ها پس از انجام نورد گرم و آنیل در جهت نورد مورد ارزیابی قرار گرفته است که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپی نوری دانه‌های هم‌محور و ذرات سولفیدی پراکنده در ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se ریخته‌گری پس از عملیات همگن‌سازی در دمای 1100°C به مدت ۱ ساعت.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپ نوری از دندریت‌های موجود در ریزساختار مرکز فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 303Se در نورد اولیه در دمای 1170°C .

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در اثر وقوع تبلور مجدد، دانه‌های ریز و هم‌محور ایجاد شده است. با این وجود کشیدگی در جهت نورد در دانه‌های اولیه قابل مشاهده است. میانگین اندازه دانه در جهت نورد، $50\ \mu\text{m}$ به دست آمد. لذا می‌توان بیان کرد که فولاد کار شده پس از نورد گرم، تحت تبلور مجدد قرار گرفته و ریزدانه شده است. ذرات سولفید منگنز در جهت نورد کشیده شدند. این ذرات بجای شکستن، افزایش طول پیدا کردند. این امر نشان دهنده شکل‌پذیری و چقرمگی بالای این ذرات است. گزارش شده است که [۴] هنگامیکه این فولاد در دمای بالاتر از 1100°C قرار گیرد، زمینه آستنیت تا حدی نرم می‌شود که به ذرات سولفید منگنز اجازه می‌دهد در راستای جهت اعمال بار حین تغییر شکل پلاستیک کشیده شوند.

۳-۱- ریزساختار اولیه فولاد، پس از همگن‌سازی و نورد گرم به منظور بررسی اصولی، ابتدا ریزساختار اولیه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲، تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se را پس از همگن‌سازی در دمای 1100°C به مدت ۱ ساعت نشان می‌دهد. در تصویر میکروسکوپ نوری مشاهده شد که دانه‌های آستنیت به صورت هم‌محور و با میانگین قطر $70\ \mu\text{m}$ وجود داشتند.

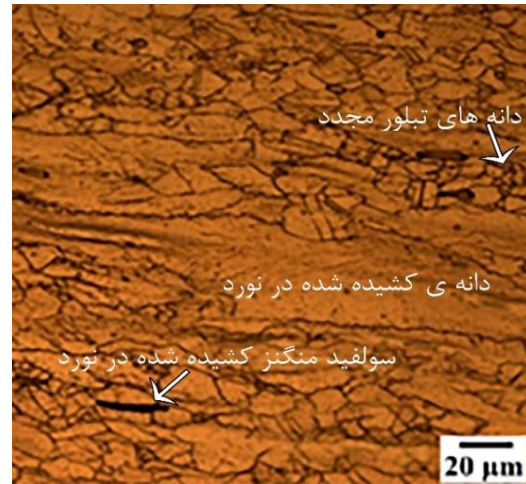
در میان دانه‌های فاز آستنیت، ذرات کرومی شکل دیده شدند. در مراجع [۱-۳] به حضور ذرات سولفید منگنز با مورفولوژی کرومی اشاره شده است. این ذرات سولفید منگنز سبب بهبود تراشکاری فولاد می‌شوند. با توجه به حضور عناصر گوگرد و فسفر در ترکیب شیمیایی این فولاد و همچنین تشکیل ذرات با مورفولوژی کرومی، ذرات مشاهده شده در شکل ۲ می‌توانند سولفید منگنز باشند. این ذرات ابعاد بین ۲ تا $20\ \mu\text{m}$ داشتند. ذرات درشت از این ترکیب، در مرزها، کنج دانه‌ها یا نزدیک مرزها تشکیل شدند. درون دانه‌ها، اغلب ذرات ۲ تا $5\ \mu\text{m}$ دیده شدند. مرزها به دلیل داشتن انرژی بیشتر نسبت به درون دانه‌ها، محل مناسب‌تری برای جوانه زنی هستند. بدین ترتیب، با تشکیل ذرات سولفید منگنز، انرژی مرز در آن ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین، مرزها به دلیل نامنظم بودن و نیز پس زدن بیشتر عناصر غیر آهن به مرزها، راه ارتباطی مناسبی برای انتقال گوگرد و منگنز هستند. بدین ترتیب، ذرات درشتی از سولفید منگنز در مرزها دیده شدند. در شکل ۳ ریزساختار نمونه پس از نورد گرم اولیه در دمای 1170°C با کاهش ضخامت به میزان ۱۰٪ نشان داده شده است. به علت کم بودن میزان کاهش ضخامت در نمونه دندریت‌های حاصل از ساختار ریخته‌گری در مرکز نمونه مشاهده شد. هایشی و همکاران [۹] نشان داده‌اند که گوگرد به طور موثری باعث افزایش معینی در مقدار اکسید شده، که این توزیع غیریکنواخت لایه اکسید منشأ عیوب مختلف سطحی در صفحات فولادی می‌باشد. مقدار بالای گوگرد منجر به تشکیل اکسیدهای مضر، نفوذ سریع اکسیدها درون ساختار و تسریع ترک خوردگی می‌شود. منگنز اکتیویته گوگرد را کاهش داده و با تشکیل MnS از شکل‌گیری فاز نامناسب و مخرب FeS جلوگیری می‌کند. در مراجع [۱-۳] نیز به محدودیت شکل‌دهی فولادهای خوش‌تراش حاوی گوگرد، به دلیل بوجود آمدن پارگی گرم در فرآیند تغییر شکل گرم اشاره شده است.

برای دستیابی به ساختار همگن‌تر و همچنین از بین رفتن دندریت‌های حاصل از ساختار ریخته‌گری، نورد گرم ثانویه در دمای 1150°C با کاهش ضخامت ۵۳ درصد انجام شد. ریزساختار

الاستیک تا نقطه تسلیم افزایش می‌یابد. پس از نقطه تسلیم، با افزایش کرنش، به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌ها، کارسختی رخ می‌دهد. با افزایش بیشتر کرنش و از سوی دیگر بالا بودن دما، شرایط برای وقوع فرایندهای ترمیم مهیا می‌شود.

پژوهش‌ها [۱۰، ۱۱] نشان داد که در مواد با انرژی نقص انباشتنی (SFE) پایین، مانند فولادهای زنگ‌نزن و ابزار، بازیابی به آسانی صورت نگرفته و لذا افزایش چگالی نابجایی‌ها، وقوع تبلور مجدد روی می‌دهد. گزارش شده است [۱۲] که یک کرنش بحرانی (ϵ_c) وجود دارد که با رسیدن به آن، تبلور مجدد دینامیکی آغاز می‌شود و این مقدار کرنش، کمی قبل از بیشینه منحنی تنش کرنش است. لذا با افزایش تنش، نرخ کارسختی کاهش یافته و استحکام با سرعت کمتری افزایش می‌یابد و یک منطقه حالت پایا در دماهای 1000°C ، 1100°C و 1200°C مشاهده می‌شود. پس از آن، به دلیل تغییر شکل موضعی ناگهانی و گلوبی شدن، منحنی‌های سیلان، افت کرده و در نهایت شکست رخ می‌دهد.

چنانکه در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، منحنی تنش کرنش در دمای 900°C کارسختی بیشتری نشان داده و حالت پایا در آن مشاهده نشد. به صورتی که بیشترین ناحیه الاستیک را در بین تمام نمونه‌ها داشت. علت این مسئله، دمای پایین و عدم فعال شدن پدیده‌های ترمیم دینامیکی است. اما با افزایش دما به 1000°C و بالاتر، منطقه پایا پس از کارسختی اولیه در منحنی‌های سیلان مشاهده شد. با افزایش دما به 1000°C تا 1200°C ، تنش سیلان برای هر دما، نسبت به دماهای بالاتر همواره کاهش یافت. همچنین وسعت، منطقه پایا در فولاد ریختگی در دمای 1200°C حداکثر است.

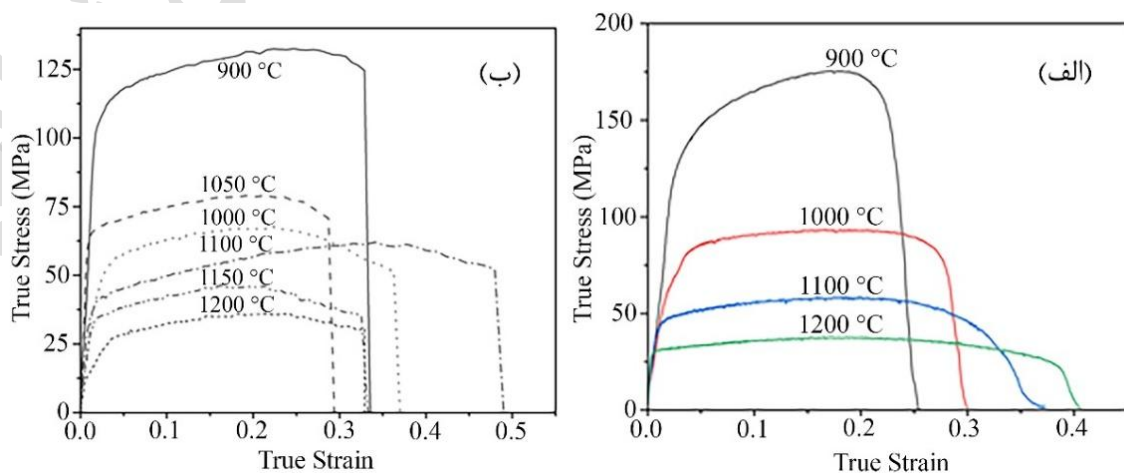


شکل ۴: تصویر ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se پس از نورد گرم ثانویه در دمای 1150°C و کاهش ضخامت ۵٪.

۲-۳- بررسی رفتار منحنی‌های سیلان و کارپذیری گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se

در بخش ۳-۱ مشاهده شد که شمش ریختگی از دانه‌های درشت، ساختار دندریتی و ذرات سولفید منگنز درشتی تشکیل شده است. با انجام همگن سازی و دو مرحله نورد گرم و در نهایت آنیل، ساختاری با دانه‌های هم‌محور و همگن بدست آمد. همچنین، میانگین اندازه دانه‌ها ۶۵٪ کاهش یافت. اصلاح ساختار رخ داده، به طور قطع تاثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی از جمله استحکام و شکل پذیری خواهد داشت.

شکل ۵-الف نمودار تنش حقیقی کرنش حقیقی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در حالت ریختگی شده در دماهای مختلف و نرخ کرنش 0.1 s^{-1} را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش میزان کرنش، تنش به صورت خطی در منطقه



شکل ۵- نمودار تنش کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در شرایط (الف) ریختگی و (ب) کار شده.

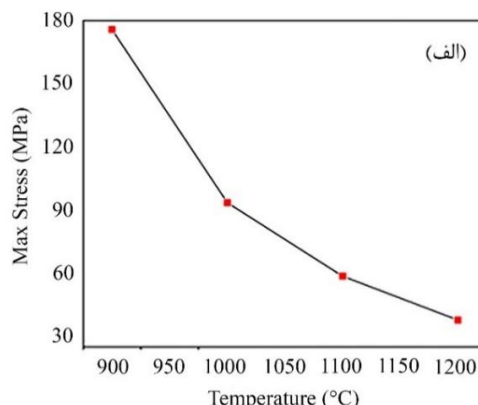
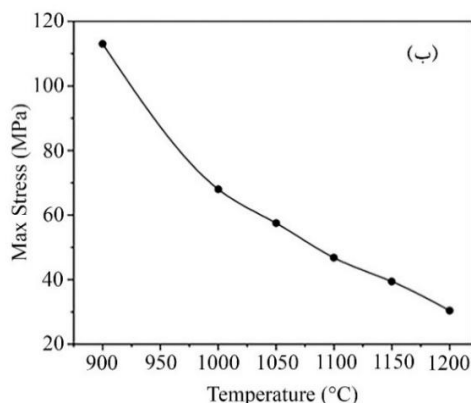
بالای 1150°C و 1200°C به علت رشد دانه‌های تبلور مجدد شده استحکام مرزها کاهش می‌یابد و منجر به شکست زود هنگام و به معنای دیگر کاهش منطقه پایا می‌شود.

در نمونه‌های حاصل از شمش ریخته‌گری، به علت وجود ساختار دندریتی و یا احتمال وجود جدایش در این مناطق و همچنین اندازه دانه درشت‌تر در حالت ریختگی که سبب کاهش مزر دانه شد، میزان ترک‌ها در مرز دانه کاهش یافت. به همین دلایل استحکام فولاد در حالت ریختگی افزایش پیدا کرد. همان‌طور که در شکل‌های ۱ تا ۴ مشاهده شد، فولاد کار شده ریزدانه‌تر از فولاد ریختگی است. اندازه دانه ریزتر، سبب افزایش کسر سطحی مرز دانه‌ها شده و با توجه به استحکام کمتر مرز دانه‌ها نسبت به داخل دانه‌ها در دماهای بالا، تنش مورد نیاز برای تغییر شکل فولاد کار شده کمتر می‌شود. به همین دلیل استحکام فولاد در حالت کار شده، در دماهای بالا کمتر از فولاد ریختگی بود. وقوع تبلور مجدد گسترده در حالت کار شده بیشتر از حالت ریختگی است و باعث نرم شدن سیلان آلیاژ و در نتیجه کاهش استحکام حداکثر در دماهای بالا را به دنبال دارد. بنابراین با هدف شکل-دهی شمش‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se، قطعات کار شده مناسب‌تر از شمش‌های ریخته‌گری هستند، زیرا نیروی کمتری برای شکل‌دهی آن‌ها صرف می‌شود.

تغییرات تنش حداکثر با دما در شکل ۶ به صورت نمودار برای دو سری نمونه ریخته‌گری و کار شده نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، تنش حداکثر با افزایش دما کاهش یافت. با افزایش دما، نفوذ افزایش می‌یابد. بنابراین صعود نابه‌جایی‌ها با سرعت بیشتری انجام می‌شود و در نهایت تنش مورد نیاز برای تغییر شکل کاهش می‌یابد. با افزایش دمای تغییر شکل، تحرک مرز دانه‌ها و نرخ تبلور مجدد دینامیکی افزایش می‌یابد. لذا مطابق شکل ۵، با افزایش دما، کارسختی در محدوده تغییر شکل پلاستیک کاهش می‌یابد [۴].

شکل ۵- ب نمودار سیلان فولاد AISI 303 کار شده را در محدوده دمایی 900°C تا 1200°C و نرخ کرنش 0.1s^{-1} را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل منحنی‌ها تحت تاثیر تغییرات دما قرار دارد. رفتار سیلان در این محدوده دمایی نشان‌دهنده منطقه الاستیک و سپس کارسختی پیوسته تا رسیدن به تنش حداکثر است. علت کارسختی قفل شدن نابه‌جایی‌ها در نقطه تسلیم می‌باشد. با افزایش دما، نیروهای بین اتمی کاهش یافته و انرژی آزاد اتم‌ها افزایش می‌یابد که به لغزش نابه‌جایی‌ها و قابلیت نفوذ کمک می‌کند و تنش سیلان کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دما سرعت نفوذ افزایش می‌یابد. بنابراین صعود نابه‌جایی‌ها با سرعت بیشتری انجام می‌شود و در نهایت تنش مورد نیاز برای تغییر شکل کاهش می‌یابد در ادامه، منحنی‌های سیلان در تمامی دماها، در اثر تعادل کارنومی با کارسختی حاصل از آرایش نابه‌جایی‌ها حالت پایا می‌یابند. در نهایت در اثر ناپایداری نمونه‌ها، کاهش تنش سیلان پس از رسیدن به استحکام حداکثر رخ می‌دهد و در نهایت منجر به شکست آن‌ها می‌گردد.

با توجه به شکل ۵- ب در دمای پایین 900°C به علت کم بودن دما و عدم فعال شدن فرایندهای ترمیم با دما، بازیابی مکانیزم غالب می‌باشد که در نتیجه نمودار تا نقطه شکست به حالت صعودی ادامه پیدا می‌کند و به معنای دیگر با افزایش میزان کرنش مقدار تنش نیز بیشتر می‌شود این پدیده در دمای 1000°C نیز تا حدودی صادق است. در ادامه با افزایش دما مکانیزم‌های ترمیم فعال شده که در دمای 1050°C تبلور مجدد مکانیکی شروع شده و این فرایند تا دمای 1100°C توسعه و کامل می‌شود؛ این فرایند به دنبال خود باعث ریزدانه‌گی می‌شود که در پی این اتفاق افزایش استحکام در مرز دانه‌ها و ایزوله شدن ترک‌ها را در پی دارد این مسئله ازدیاد طول بیشتر و کاهش تنش تا شکست در این دما مطرح می‌کند که منطقه پایا در این دما نسبت به دمای‌های دیگر وسعت بیشتری دارد. دمای‌های



شکل ۶: حداکثر تنش کششی برای فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در دماهای مختلف برای شرایط الف) ریخته‌گری و ب) کار شده.

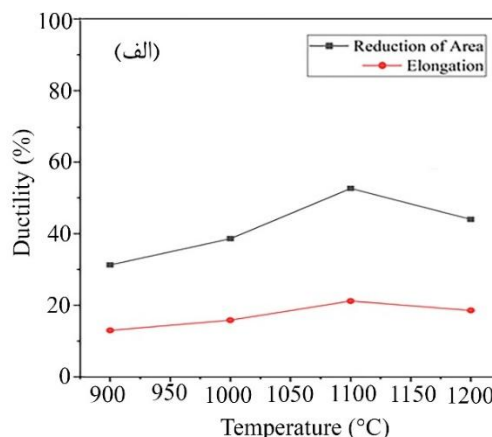
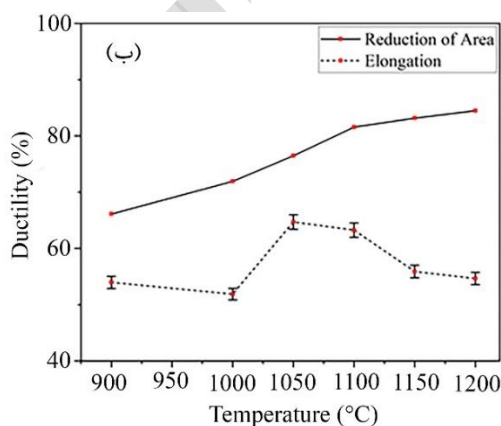
نمود که در صورت تشکیل ترک‌هایی در اطراف این ذرات سولفیدی، در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی این ترک‌ها از محیط اطراف خود ایزوله شده و امکان رشد نیافتند. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که، شکل‌پذیری افزایش یافته است. با افزایش دما تا 1200°C شکل‌پذیری کاهش یافت. زیرا رشد دانه‌ها و یا ذوب موضعی در این دمای بالا در فصل مشترک ذرات سولفیدی با زمینه، منجر به تشکیل ترک و کاهش شکل‌پذیری شد. ذرات سولفید آهن تا حدود 1000°C پایدار هستند. ذوب این ذرات از 1000°C شروع شده و در حدود 1200°C پایان می‌یابد [۱۳].

در شکل ۷ با مقایسه درصد کاهش سطح مقطع (RA) و درصد ازدیاد طول تا شکست (EL) در دو شرایط ریختگی (الف) و کار شده (ب) در دمای 1100°C می‌توان بیان نمود که RA در شرایط ریختگی حداکثر حدود ۶۰٪ است در حالیکه در شرایط کار شده این مقدار به ۸۴٪ هم می‌رسد. در شرایط ریختگی EL حداکثر حدود ۲۰٪ اما این مقدار در شرایط کار شده به بالای ۶۰٪ هم می‌رسد؛ این نتایج مطلوب بودن شرایط کاربردی فولاد کار شده نشان می‌دهد.

در مقایسه شکل‌پذیری فولاد ریخته‌گری و کار شده، شکل‌پذیری فولاد کار شده بیشتر بود. این امر به دلیل ریزدانه‌تر بودن ساختار فولاد کار شده بود. این امر به ایجاد شکل‌های مختلف از فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se کمک شایانی می‌کند. ریزدانه‌تر بودن فولاد کار شده سبب شد تا این ساختار تبلور مجدد را در دمای پایین‌تر و به میزان بیشتری تجربه کند. همچنین، دانه‌ها در مرزها به دلیل نداشتن ساختار بلوری مشخص، می‌توانند بر یکدیگر بلغزند و تغییر شکل را سبب شوند [۱۴].

تغییرات کاربردی گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se ریختگی به صورت منحنی‌های کاهش سطح مقطع و همچنین ازدیاد طول تا شکست برحسب دما، در نرخ کرنش 0.1 s^{-1} و دماهای مختلف در شکل ۷ (الف) ارائه شده است. این داده‌ها از آزمون کشش بدست آمد. میزان کاهش سطح مقطع در آزمایش کشش گرم نقش مهمی بر کاربردی گرم فولاد دارد. هرچه میزان کاهش سطح مقطع بیشتر باشد، کاربردی فولاد هم بیشتر خواهد بود. با توجه به منحنی‌های کاربردی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se میزان کاهش سطح مقطع در دمای 1100°C بالاتر از دماهای دیگر است که نشان‌دهنده کاربردی گرم بهتر این فولاد است.

همان‌طور که در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود، با افزایش دما از 900°C تا 1100°C میزان ازدیاد طول افزایش یافته است و در ادامه تا دمای 1200°C حالت نزولی پیدا می‌کند. علت افزایش ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع نمونه‌های فولادی ریختگی با دما تا 1100°C ، وقوع تبلور مجدد دینامیکی است. شکل ۷ (ب) نمودار کاربردی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در شرایط کار شده را با انجام آزمایش کشش گرم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کاهش سطح مقطع در تمامی دماها بالای ۶۰ درصد می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی افزایش کاربردی خوب فولاد با افزایش دما است. شکل‌پذیری در دماهای 900°C و 1000°C به علت کم بودن دما و عدم فعال شدن فرآیندها فعال‌شونده با دما، نفوذ و حضور پراکنده ذرات سولفیدی نسبت به سایر دماها کمتر بود. با افزایش دما شکل‌پذیری افزایش یافت و در محدوده دمایی 1000°C تا 1050°C ازدیاد طول قابل ملاحظه‌ای مشاهده شد. لذا می‌توان چنین بیان



شکل ۷: تغییرات درصد کاهش سطح مقطع و درصد ازدیاد طول تا شکست در دماهای مختلف فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در حالت:

(الف) ریختگی و (ب) کار شده.

مطابق شکل ۸ (ث) کشیدگی دانه‌ها در جهت محور کشش کاملاً مشخص است. وقوع تبلور مجدد دینامیکی در دمای 1000°C منجر به ریزدانه‌گی فولاد مطابق شکل ۸ (ج) گردیده و با توسعه تبلور مجدد در دمای 1050°C ، ساختار ریزدانه‌تر شد. در ادامه افزایش دما مطابق با ۸ (ح) رشد دانه اتفاق افتاده است و فولاد درشت دانه تر شد. این رخ داد در خواص مکانیکی تاثیر قابل توجهی دارد.

مرزدانه‌های فولاد با اندازه دانه اولیه کوچک‌تر، مکان‌های مساعد بیشتری را برای جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد مهیا می‌سازد و سبب ریزدانه‌تر شدن فولاد می‌شود. در پژوهش حاضر نیز به دلیل اندازه دانه کمتر فولاد کار شده نسبت به فولاد ریخته‌گی، کسر سطحی مرزدانه‌ها در آن بیشتر است. لذا مکان جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد در آن بیشتر بوده و منجر به افزایش کسر دانه‌های تبلور مجدد در فولاد کار شده می‌شود. لذا فولاد کار شده پس از انجام تغییر شکل، دارای میانگین اندازه دانه کمتری نسبت به فولاد ریخته‌گی شده و شکل‌پذیری بیشتری است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، حفره‌های فراوانی به دلیل کشش در نمونه ایجاد شده است. این حفره‌ها از محل مرز دانه‌ها ایجاد می‌شود. این حفره‌ها با افزایش دما ابتدا کاهش و سپس افزایش یافتند. با افزایش دما از 1000°C به 1050°C حفرات بیشتر و پراکنده‌تر شده و کسر حجمی حفرات کاهش یافته است که با افزایش ازدیاد طول در این دما تطابق دارد. علت این موضوع، وقوع تبلور مجدد بود. با وقوع تبلور مجدد حفرات ایزوله شده و رشد آن‌ها متوقف شد. لذا کسر حجمی و اندازه حفرات کاهش یافت. در نتیجه به هم پیوستن آن‌ها و شکست نهایی به تعویق افتاد که منجر به افزایش ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در دمای 1100°C شد.

با افزایش دما از 1050°C تا 1200°C ، مطابق شکل ۸، دانه‌های فولاد کار شده، رشد کرده و اندازه دانه آن افزایش یافت. لذا انتظار می‌رود، شکل‌پذیری فولاد کاهش یابد. این رفتار با وجود سولفیدها در دماهای بالاتر و به علت ایجاد خواص ناهمسانگردی با زمینه سبب ایجاد ترک شد و در نهایت ازدیاد طول کاهش یافت.

در یک جمع‌بندی، با توجه به تغییرات شکل‌پذیری و تحولات ریزساختاری، تغییر شکل گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se ریخته‌گی، می‌تواند در دمای 1100°C انجام شود. اما در فولاد AISI 303 کار شده در محدوده 1100°C - 1050°C قابل انجام است. بدین ترتیب پنجره کارپذیری فولاد کار شده بیشتر است. همچنین کار گرم فولاد کار شده را در دمای کمتری نسبت به فولاد ریخته‌گی انجام داد.

بر اساس پژوهش‌های [۱۵، ۱۶] انجام شده، علت ازدیاد طول بیشتر فولاد کار شده نسبت به فولاد ریخته‌گی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- با وقوع تبلور مجدد، ترک‌ها و حفرات از مرز فاصله گرفته و ایزوله می‌شوند و فرصت کافی برای رشد نخواهند داشت. لذا ازدیاد طول افزایش می‌یابد.

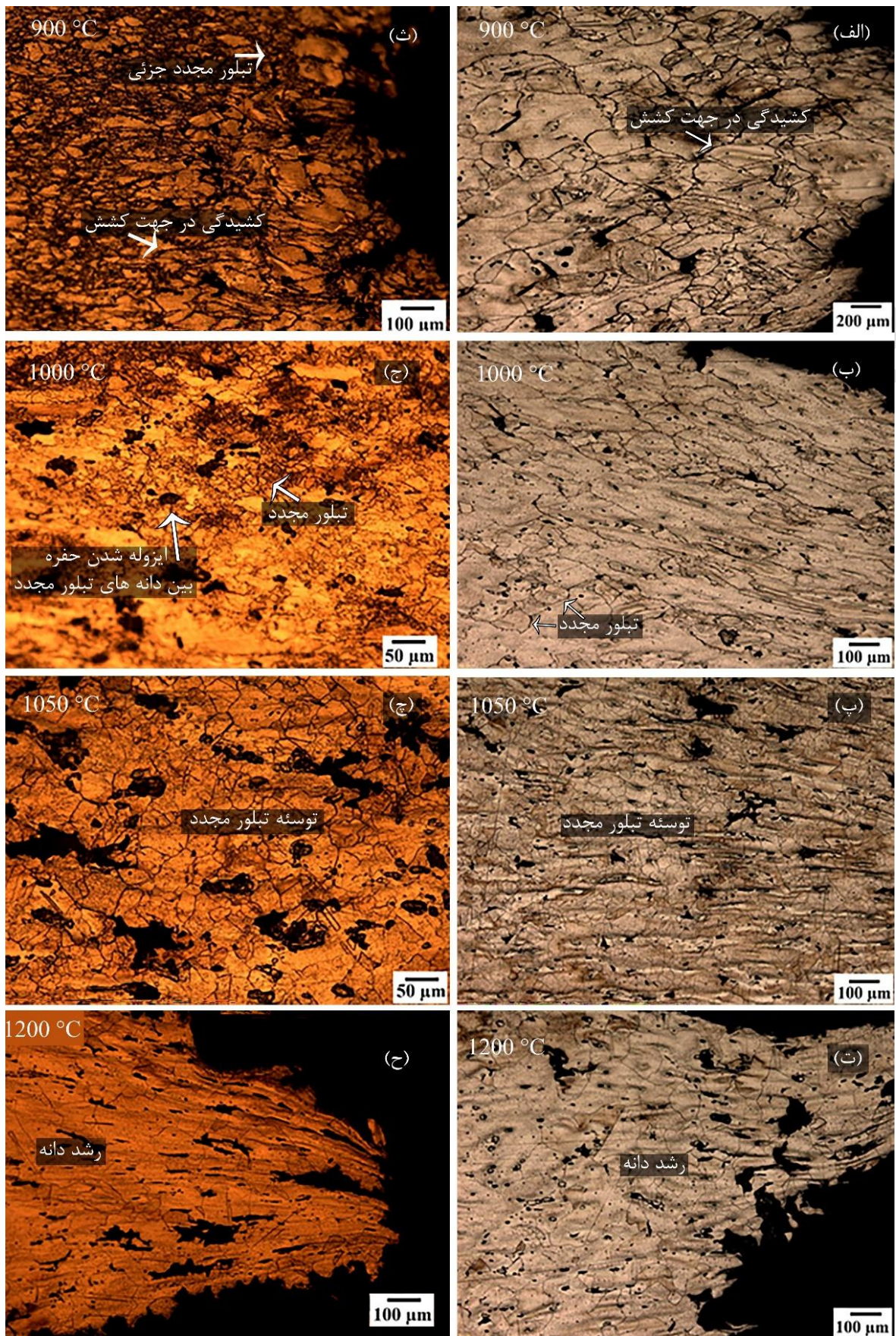
۲- مکانیزم غالب شکست در فولادها، ایجاد حفرات در کنار ذرات سخت موجود در نقاط سه‌گانه است. با کاهش اندازه دانه آستنیت، سطوح مرزدانه‌ای در مقایسه با کسر حجمی رسوبات افزایش یافته و لذا از چگالی رسوبات روی مرزها کاسته می‌شود. بنابراین کاهش اندازه دانه آستنیت موجب می‌شود ابعاد ترک‌های تولیدی در نقاط سه‌گانه کاهش یابد و لذا تمرکز تنش کمتر شود و در نتیجه ترک تمایل کمتری به اشاعه داشته باشد.

۳-۳- بررسی ریزساختار نمونه‌ها پس از آزمایش کشش

در بخش ۳-۲ مشاهده شد که انجام فرایند ترمومکانیکی و آنیل سبب کاهش استحکام کششی و افزایش قابل توجه شکل‌پذیری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se می‌شود. در آن بخش ادعا شد که این امر به دلیل ریزساختار اولیه و توانایی بیشتر ساختار کار شده در تبلور مجدد است. در این بخش به بررسی میکروسکوپی سطح کشیده شده هنگام آزمون کشش پرداخته شده تا فرایند تبلور مجدد، ایجاد و رشد ترک در حین کشش گرم بهتر درک شود.

شکل ۸ (الف تا ت) ریزساختار فولاد ریخته‌گی در ناحیه نوک شکست، پس از انجام کشش گرم در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در تمامی شکل‌ها، حفرات مشاهده می‌شود. در شکل ۸ (الف) کشیدگی دانه‌ها در جهت محور کشش کاملاً مشخص است. شروع تبلور مجدد دینامیکی در دمای 1000°C منجر به ریزدانه‌گی فولاد مطابق ۸ (ب) شد. در دمای بالاتر با توسعه تبلور مجدد در دمای 1100°C ، مطابق شکل ۸ (ج)، ساختار ریزدانه‌تر شد و در دمای 1200°C رشد دانه به بیشترین مقدار خود رسید.

شکل (ث تا ج) ریزساختار نمونه‌های حاصل از کشش گرم فولاد کار شده را در نزدیک سطح مقطع نوک شکست نشان می‌دهد. صرف‌نظر از جزئیات مکانیزم جوانه‌زنی به نظر می‌رسد شرط رشد یک دانه تبلور مجدد دینامیکی یافته وابسته به توزیع و چگالی نایجایی‌ها در هر دو شکل دانه فرعی و یا نایجایی آزاد باشد که تامین‌کننده‌ی نیروی محرکه رشد است.



شکل ۸: نوک شکست در نمونه‌های قرار گرفته تحت آزمون کشش تهیه شده از الف تا ت) شمش ریختگی ت تا ح) کار شده.

- Austenitic Stainless Steel and Ceramic Commercial Product. International Journal Electrochemical Science. 2021. 2016. 210567.
- [3] Uhríček M.- Palček P.- Belan J., Vaško A.- Pastierovičová L.- Kuchariková L.- Zatkalíková V.- Slezák M.- The fatigue life and fractures of austenitic steel AISI 304 after the chemical-thermal treatment. Procedia Structural Integrity. 2023. 51. 166–172.
- [4] کمالی اردکانی م.، مرکباتی م.، بررسی رفتار تغییر شکل گرم و داکتیلیته فولاد AISI H10، مواد پیشرفته در مهندسی، ۱۳۹۹، ۴۰، ۳۰-۱۳.
- [5] Dehghan-Manshadi A.- Barnett M.R.. Hodgson P.D.- Recrystallization in AISI 304 austenitic stainless steel during and after hot deformation. Materials Science and Engineering A 2008. 485. 664–672.
- [6] Kayali Y.- Mertgenç E. - Investigation of Diffusion Kinetic Values of Boronized AISI 303 Steel by Pack Boronizing, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2020. 56. 151–155.
- [7] Chengal Reddy V.- Keerthi T.- Nishkala T.- Maruthi Prasad Yadav G.- Analysis and optimization of laser drilling process during machining of AISI 303 material using grey relational analysis approach. SN Applied Science. 2021. 3. 335-342.
- [8] ASTM E8. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, in: Book of Standards. ASTM International, Conshohocken. 2021.
- [9] Kim Y.- Kim H.- Shin S.Y.- Rhee K.-Ahn S.B.- Lee D.L.- Kim N.J.- Lee S.- Formation mechanisms of cracks formed during hot rolling of free-machining steel billets. Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. 43. 882–892.
- [10] Ezatpour H.R.- Sajjadi S.A.- Haddad-Sabzevar M.- Influence of hot deformation strain rate on the mechanical properties and microstructure of K310 cold work tool steel. Materials Science and Engineering A. 2012. 527. 1299–1305.
- [11] Imbert C.A.C.- McQueen H.J.- Peak strength, strain hardening and dynamic restoration of A2 and M2 tool steels in hot deformation. Materials Science and Engineering: A. 2001. 313. 88–103.
- [12] Humphreys F.J.- Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. Elsevier. 2012.
- [13] ASM handbook. Volume 3. Alloy phase diagrams. Materials Park. OH: ASM International. 1992.
- [14] Homsher C.N.- Determination of the non-recrystallization temperature (TNR) in multiple microalloyed steels, Ph. D thesis. Colorado School of Mines. 2013.
- [15] Uvarov A.I.- Sandovskii V.A.- Kazantsev V.A.- Anufrieva E.I.- Vil'danova N.F.- Filippov Yu.I.- Effect of preliminary plastic deformation on the structure and physicommechanical properties of aging invar alloy N30K10T3. The Physics of Metals and Metallography. 2006. 101. 362–368.
- [16] Perrot-Simonetta M.-T.- Kobylanski A.- Influence of Trace Elements on Hot Ductility of an Ultra High Purity Invar Alloy. JOURNAL DE PHYSIQUE. 1995. 5. 323-334.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آلیاژ فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se ابتدا ریخته‌گری و سپس به منظور تعیین محدوده‌ی کار پذیری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se عملیات ترمومکانیکی با نورد در دمای 1150°C و با کاهش ضخامت اولیه ۵۳٪ انجام شد. سپس آنیل در دمای 1100°C انجام شد. نتایج عمده این فرایند در زیر ارایه می‌شود:

- عملیات ترمومکانیکی و آنیل روی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se سبب کاهش میانگین اندازه دانه از $70\ \mu\text{m}$ به حدود $25\ \mu\text{m}$ شد.
- آزمون کشش در شرایط ریختگی و کار شده در دماهای بین 900°C تا 1200°C سبب جدایش بین دانه‌ها ایجاد حفره‌های متعدد شد. شکست با رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در ناحیه گلویی رخ داد.
- آزمون کشش در شرایط ریختگی و کار شده تا دمای 1000°C سبب کشیدگی دانه‌ها و تبلور مجدد جزئی شد. در دمای 1050°C پدیده‌ی غالب در فولاد ریخته‌گری و کار شده، تبلور مجدد بود. با افزایش دما به 1200°C ، ساختارها دچار رشد دانه مشاهده شد.
- بررسی نشان داد که ساختار فولاد کار شده از دانه‌های ریزتری تشکیل شده و اندازه دانه‌ها همگن‌تر است.
- محدوده دمای مناسب جهت کار گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در شرایط کار شده، 1050°C – 1100°C بدست آمد. در صورتی که دمای مناسب کار گرم فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در شرایط ریختگی، 1100°C بدست آمد. بدین ترتیب، کار پذیری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 303Se در شرایط کار شده در دماهای پایین‌تر بیشتر است و همچنین پنجره کار پذیری آن وسیع‌تری می‌باشد.

منابع

- Seriacopi V.- Fukumasu N.K.- Souza R.M.- Machado I.F.- Analysis of Abrasion Mechanisms in the AISI 303 Stainless Steel: Effect of Deformed Layer. Procedia CIRP. 2016. 45. 187–190.
- Baioumy S.A.- Sanad W.A.- El-Sherif A.A.- Fekry A.M.- Filippov L.O.- Electrochemical Behaviour and X-ray Fluorescence Study of AgNP-GO-CS Coated AISI 303



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Evaluation of the Hot Workability Behavior of AISI 303Se Stainless Steel in Cast and Wrought Conditions Using Tensile Test

Ali Salimi¹, Sayed Mahdi Abbasi^{2*}, Maryam Morakabati³

1. M.Sc. Student, Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Material and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding author: sma_abbasi@mut.ac.ir

Paper history:

Receive Date: 26 October 2024
Revise Date: 30 April 2025
Accept Date: 01 June 2025

Abstract:

The aim of the present research is to investigate the hot workability behavior of AISI 303Se stainless steel in both cast and worked conditions. To this end, the AISI 303Se stainless steel was produced using an induction furnace and subjected to homogenization, dissolution, and annealing heat treatments within the temperature range of 1000 to 1200 °C. Samples of both cast and worked steel were cut for tensile testing at temperatures ranging from 900 to 1200 °C. Optical microscopy and tensile testing were employed to examine the microstructure and mechanical properties, respectively. The results of the microscopic tests indicated that heat treatment and hot rolling reduced the average grain size of the steel from 70 μm to approximately 25 μm. The heat treatment and rolling led to a reduction in the high-temperature strength of AISI 303Se stainless steel by about 38%. However, the implementation of heat treatment and hot rolling increased the ductility of the AISI 303Se stainless steel by approximately 36%. The Desirable temperature for hot working of cast AISI 303Se stainless steel was found to be 1100 °C, while for worked AISI 303Se stainless steel, it was in the range of 1050-1100 °C. In both types of steel, whether cast or worked, complete recrystallization occurred at 1050 °C; however, recrystallization in the worked steel resulted in a finer-grained structure and consequently a wider hot working window.

Keywords:

AISI 303Se stainless steel,
Tensile Test,
Hot workability

Please cite this article using:

Alisalimi, Sayed Mahdi abbasi, Maryam Morakabati, Evaluation of the hot ductility behavior of aisi 303se stainless steel in cast and worked conditions using tensile testing, in Persian, Founding Research Journal, .

DOI: 10.22034/frj.2025.485518.1204

Journal homepage: www.foundingjournal.ir