

Temperature effects on the kinetics of austenite to martensite transformation and the tensile properties in 304 austenitic stainless steel

Moloud Shakeri¹, Hossein Arabi², *Bagher Mohammad Sadeghi³, Bahman Mirzakhani⁴

1- MSc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Citation: Shakeri M, Arabi H, Mohammad Sadeghi B, Mirzakhani B. Temperature effects on the kinetics of austenite to martensite transformation and the tensile properties in 304 austenitic stainless steel. *Metallurgical Engineering* 2024; 27(1): 20-31 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.561237.1362>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.561237.1362>

ABSTRACT

In this study, the effect of temperature on the kinetics of austenite to martensite transformation and the tensile properties of 304 austenitic stainless steel were investigated. In order to achieve this goal, uniaxial tensile tests were performed on 304 austenitic stainless steel samples at two temperatures of 25°C and -78°C. Microstructural investigations were conducted using an optical microscope and a ferritoscope. According to the results, the volume fraction of martensite at -78°C temperature is approximately 13% higher than at 25°C due to lower stability of austenite and increased driving force for the transformation of austenite into martensite. At temperatures 25°C and -78°C, the maximum transformation rate of austenite to martensite was obtained at true strains of 0.3 and 0.2, respectively, and the comparison of these results indicated that at the temperature of -78°C, there was a greater transformation rate than at 25°C. The work hardening rate graphs for uniaxial tensile testing were plotted at two temperatures of 25°C and -78°C. A higher work hardening rate was observed at -78°C than at 25°C, and the strength coefficients and work hardening exponents of the austenite and martensite phases increased as temperature was decreased. In addition, in the uniaxial tensile test, the average hardness was determined at -78°C and 25°C as 309 and 280, respectively.

Keywords: Austenitic Stainless Steel 304, Martensitic Transformation Rate, Uniaxial Tensile Test, Work Hardening, Effect of Temperature.

Received: 2 September 2022

Accepted: 23 July 2023

■ ■

* *Corresponding Author:*

Bagher Mohammad Sadeghi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 73228862

E-mail: bmsadeghi@iust.ac.ir

تاثیر دما بر سینتیک استحاله آستنیت به مارتنزیت و خواص کششی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴

مولود شاکری^۱، حسین عربی^۲، باقر محمد صادقی^۳، بهمن میرزاخانی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- ۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده

در این پژوهش تاثیر دما بر سینتیک استحاله آستنیت به مارتنزیت و خواص کششی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ بررسی شد. به منظور تحقق این هدف، آزمایش کشش تک محوری بر روی نمونه‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و ۷۸°C انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و فریتسکوپ انجام شد. نتایج نشان دادند که در دمای ۷۸°C نسبت به دمای ۲۵°C به علت پایداری کمتر آستنیت و افزایش نیروی محرکه استحاله آستنیت به مارتنزیت، کسر حجمی مارتنزیت حدوداً ۱۳٪ بیشتر تشکیل شده است. حداکثر نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت برای دماهای ۲۵°C و ۷۸°C به ترتیب در کرنش حقیقی ۰/۳ و ۰/۲ بدست آمد و مقایسه نتایج بدست آمده در دو دما نشان داد که میزان حداکثر نرخ استحاله در دمای ۷۸°C نسبت به دمای ۲۵°C بیشتر بود. نمودارهای نرخ کارسختی برحسب کرنش حقیقی در دو دمای ۲۵°C و ۷۸°C برای آزمایش کشش تک محوری ترسیم شد. نرخ کارسختی در دمای ۷۸°C نسبت به دمای ۲۵°C بیشتر بود و با کاهش دما مقادیر ضریب استحکام و توان کارسختی فازهای آستنیت و مارتنزیت افزایش یافتند. همچنین مقدار میانگین سختی در آزمایش کشش تک محوری در دمای ۷۸°C و ۲۵°C به ترتیب ۳۰۹ و ۲۸۰ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴، نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت، آزمایش کشش تک محوری، کارسختی، تاثیر دما.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱ | پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

۱. مقدمه

که در آن فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. به طور کلی آستنیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی و به خصوص در سری فولادهای ۳۰۰، فاز پایداری نمی‌باشد [۱]. استحاله آستنیت به مارتنزیت با مکانیزم‌های مختلف اتفاق می‌افتد. در فلزات این استحاله از طریق سریع سرد کردن و با کمک گرفتن از نیروهای مکانیکی رخ می‌دهد [۵]. هنگامی که فولاد از دمای آستنیت به سرعت سرد شود، زمان کافی برای نفوذ وجود نداشته و مقداری مارتنزیت یا مارتنزیت به همراه آستنیت باقی مانده تشکیل خواهد شد [۶]. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، استحاله آستنیت به مارتنزیت در اثر تغییر شکل پلاستیک نیز می‌تواند رخ دهد. این استحاله آستنیت به مارتنزیت که در بالای دمای M_s^0 رخ می‌دهد، استحاله آستنیت به مارتنزیت ناشی از کرنش نامیده می‌شود. استحاله آستنیت به مارتنزیت ناشی از کرنش، شایع

بیش از ۷۰٪ از فولادهای زنگ نزن را فولادهای آستنیتی تشکیل می‌دهند [۱]. این فولادها معمولاً به آلیاژهای آهن-کربن-کروم-نیکل اطلاق می‌شوند. مقدار نیکل این آلیاژها بین ۶٪ تا ۲۲٪ و مقدار کروم آنها بین ۱۶٪ تا ۲۲٪ است [۲، ۳]. فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن آستنیتی هستند. در حین بازپخت، غیرمغناطیسی هستند اما اگر تحت کارسرد قرار بگیرند کمی مغناطیسی می‌شوند. با عملیات حرارتی سخت نمی‌شوند اما با عملیات مکانیکی به سرعت سخت می‌شوند و علاوه بر استحکام بالا، انعطاف پذیری خوبی دارند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ کاربرد زیادی در تجهیزات پزشکی، ماشین‌آلات و ابزارهای صنعتی، تجهیزات صنایع شیمیایی دارند [۴]. استحاله آستنیت به مارتنزیت در فولادها، پدیده‌ای است

* نویسنده مسئول:

دکتر باقر محمدصادقی

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۷۳۲۲۸۸۶۲ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: bmsadeghi@iust.ac.ir

پیشنهاد شده است [۱۰، ۱۱]. انگل [۱۲] در تحقیقی در مورد رفتار استحاله ناشی از کرنش فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ نشان داده است که منحنی استحاله (میزان مارتنزیت به عنوان تابعی از کرنش پلاستیکی در دمای ثابت) S شکل است. از طرف دیگر گربریچ^۸ [۱۳] از یک رابطه‌ی سهمی شکل، جهت منطبق نمودن داده‌های به دست آمده برای فولاد ۳۰۴ با داده‌های به دست آمده از فولادهای TRIP استفاده کرد. اولسن-کوهن [۱۰] مدلی را جهت بررسی سینتیک جوانه زنی مارتنزیت با مکانیزم برخورد باندهای برشی گسترش دادند که تا امروز مورد توافق بسیاری از محققان دیگر نیز می‌باشد. در رابطه‌ی زیر، معادله‌ی اولسن-کوهن برای پیش بینی کسر حجمی مارتنزیت ناشی از کرنش پلاستیک بیان شده است:

رابطه (۱)

$$f^{\alpha'} = 1 - \exp\{-\beta[1 - \exp(-\alpha \varepsilon)]^n\}$$

در رابطه (۱)، ε کرنش پلاستیک، $f^{\alpha'}$ کسر حجمی مارتنزیت α' و α ثابت مستقل از کرنش است. پارامتر α به انرژی نقص در چیده شدن (SFE) و نرخ کرنش بستگی دارد که با کاهش انرژی نقص در چیده شدن و افزایش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد. این عوامل منجر به مرجح شدن تغییر شکل توسط باند برشی نسبت به تغییر شکل از طریق لغزش، می‌شود [۱۰]. پارامتر β از رابطه (۲) بدست می‌آید

رابطه (۲)

$$\beta = \frac{\bar{v}^{\alpha'} K}{(\bar{v}^{sb})^n} P$$

در رابطه (۲)، (\bar{v}^{sb}) حجم متوسط یک باند برشی، $(\bar{v}^{\alpha'})$ حجم متوسط به ازای هر واحد مارتنزیت و P احتمال برخورد باندهای برشی است که جوانه‌های مارتنزیت را ایجاد می‌کند و این احتمال به دلیل داشتن ارتباط با نیرو محرکه شیمیایی، وابسته به دما است. K و n ثوابت رابطه (۲) هستند که با فرض این که باندهای برشی به صورت تصادفی به شکل صفحات نازکی با قطر متوسط d قرار گرفتند (تقریباً اندازه دانه آستنیت) می‌توان مقدار n را مساوی ۲ و K را مساوی $\pi^2 d^2 / 16$ را در نظر گرفت. هر چند در حالت کلی باندهای برشی به صورت تصادفی قرار نمی‌گیرند و تمایل دارند که در ابتدا موازی باشند تا وقتی که سیستم های برشی ثانویه شروع به فعالیت کنند. بنابراین انتظار می‌رود تعداد محل های برخورد، در ابتدا کم باشند و سپس با افزایش کرنش، سرعت بیشتری یابند. این رفتار می‌تواند به وسیله توان بالاتری از $n = 2$ تقریب زده شود. بنابراین همانطور که در روابط بالا مشاهده می‌شود کسر حجمی فاز مارتنزیت به وسیله دو

ترین روش استحاله آستنیت به مارتنزیت فولادهای زنگ نزن آستنیتی در دمای اتاق است. با اعمال کرنش، امکان تشکیل دو نوع مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی وجود دارد. مارتنزیت α' (دارای ساختار BCT^۱، مغناطیس پذیری بالا) و مارتنزیت ε (دارای ساختار HCP^۲، مغناطیس پذیری کم). در حین تغییر شکل در دماهای پایین تشکیل مارتنزیت مقدم بر تشکیل مارتنزیت α' می‌باشد. میزان افزایش مارتنزیت ε با تغییر شکل یک مقدار حداکثری داشته و پس از آن کاهش می‌یابد در حالی که میزان مارتنزیت α' به صورت پیوسته افزایش می‌یابد [۱].

استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌تواند رخ دهد [۷]:

- در حالت مستقیم^۳، فاز آستنیت غیرمغناطیس با ساختار FCC به طور مستقیم به فاز مغناطیسی مارتنزیت α' با ساختار BCT تبدیل می‌شود ($\gamma \rightarrow \alpha'$).

- در حالت غیرمستقیم^۴، فاز آستنیت غیرمغناطیس ابتدا به فاز غیرمغناطیس مارتنزیت ε با ساختار HCP تبدیل شده و سپس به فاز مغناطیسی مارتنزیت α' با ساختار BCT تبدیل می‌شود ($\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$).

استحاله‌ی غیرمستقیم در فولادهای با انرژی نقص انباشتگی پایین ($< 20 \text{ mJ.m}^{-2}$) نظیر فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و استحاله‌ی مستقیم در فولادهای با انرژی نقص انباشتگی بالا ($< 20 \text{ mJ.m}^{-2}$) مثل فولادهای آستنیتی منگنزی با آلومینیوم (Fe-Al-Mn) اتفاق می‌افتد [۷، ۸]. در استحاله‌ی غیرمستقیم، فاز مارتنزیت α' می‌تواند در فصل مشترک دو شبکه‌ی HCP متعلق به مارتنزیت ε و بر روی نایجایی‌ها جوانه زنی کند [۹]. اولسن^۵-کوهن^۶ [۱۰] مطالعات بنیادی در خصوص سرعت جوانه زنی فاز مارتنزیت انجام داده اند. آن‌ها دریافتند که مکان و هسته های جوانه زنی در حین تغییر شکل پلاستیک تشکیل می‌شوند. بنابراین جوانه‌زنی از طریق کرنش نقش مهمی در استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت دارد. با فرض اینکه محل برخورد باند برشی مکانیزم حاکم بر جوانه زنی ناشی از کرنش باشد و با در نظر گرفتن مسیر تشکیل باند برشی، احتمال برخورد باندهای برشی و احتمال برخوردی که نطفه‌ی مارتنزیتی را به وجود می‌آورد، کسر حجمی مارتنزیت در اثر کرنش پلاستیک تعیین می‌شود. بر اساس این احتمالات و روابط تجربی برای محاسبه کسر حجمی مارتنزیت ناشی از کرنش پلاستیک، روابط سینتیک استحاله

1. Body-Centered Tetragonal
2. Hexagonal Close-Packed
3. Direct
4. Indirect
5. Olsen
6. Cohen

7. Angel

8. Gerberich

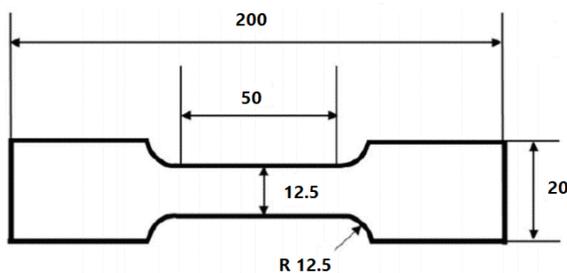
جدول ۱. میانگین ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304 مورد استفاده، (wt%)

آلیاژ	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	Mo	P	S	N
304	Base	18.4	8.27	1.43	0.391	0.04	0.03	0.03	-	-

جدول ۲. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304، (wt%) [۱۷].

آلیاژ	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S	N
304	حداقل	17.5	8	-	-	-	-	-
	حداکثر	21.5	10.5	2	0.75	0.07	0.045	0.03

آزمایش کشش مطابق با استاندارد (ASTM E8) در راستای جهت نورد با استفاده از وایرکات برش داده شدند. طرح واره و نمونه کشش مورد استفاده در شکل (۱) مشاهده می‌شود.


شکل ۱. ابعاد (برحسب میلی‌متر) نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد (ASTM E8)

پنج نمونه برای کشش تک محوری در دمای اتاق و یک نمونه برای دمای -78°C تهیه شد. یکی از نمونه‌ها در دمای اتاق تا نقطه شکست کشیده شد و پس از شکست افزایش طول سنجه آن اندازه‌گیری شد و با ترسیم نمودار تنش-کرنش حقیقی، کرنش حقیقی در نقطه شکست 0.49 بدست آمد. سپس به منظور بررسی ریزساختار برای تشکیل مقادیر مختلف مارتنزیت، نمونه‌های آزمایش کشش تک محوری در دمای اتاق تا کرنش‌های حقیقی 0.1 ، 0.26 ، 0.28 و 0.32 بارگذاری شدند. به منظور بررسی تاثیر دما در میزان تشکیل مارتنزیت، از یخ خشک برای فراهم کردن دمای -78°C استفاده شد. یک محفظه حاوی یخ خشک در اطراف گیج^۹ نمونه قرار داده شد و آزمایش کشش بر روی نمونه تا شکست نمونه انجام شد.

به منظور آماده سازی سطوح نمونه‌ها، ابتدا عملیات سنباده زنی با استفاده از پوساب تا شماره ۲۵۰۰ انجام شده و پس از آن عملیات پولیش با استفاده از نمد و سوسپانسیون آب حاوی ذرات ساینده به قطر $0.3 \mu\text{m}$ از جنس آلومینا

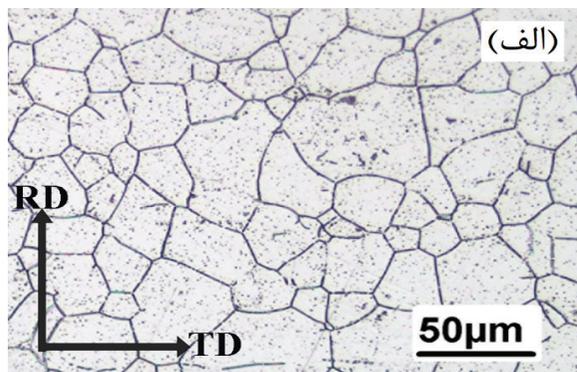
9. gauge

مشخصه فیزیکی مهم وابسته به دما یعنی پارامترهای α و β و توان ثابت n محاسبه می‌شود [۱۰]. چندین عامل، استحاله آستنیت به مارتنزیت ناشی از کرنش را تحت تاثیر قرار می‌دهند، که عبارتند از: ترکیب شیمیایی، دما، نرخ کرنش، حالت تنش و اندازه دانه فاز آستنیت [۱۴]. تشکیل مارتنزیت α' ناشی از کرنش به وسیله دو پارامتر وابسته به ترکیب (انرژی نقص چیده شدن و نیرو محرکه شیمیایی استحاله آستنیت به مارتنزیت) تحت تاثیر قرار می‌گیرد. از آنجایی که این دو پارامتر وابسته به دما می‌باشند، لذا استحاله مارتنزیت α' ناشی از کرنش، به دما حساس است [۱۵، ۱۶]. هدف از انجام این پژوهش، بررسی بیشتر تاثیر دما بر روی پارامترهای معادله اولسن-کوهن است. همچنین با ترسیم منحنی تنش-کرنش حقیقی، خواص کششی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 در دو دما 25°C و -78°C استخراج شده است و ثوابت کارسختی هولومان در فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 در دو دما 25°C و -78°C با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از یک ورق از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با ضخامت 3 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی ورق تهیه شده به روش کوانتومتری تعیین گردید. میانگین نتایج ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. نتایج آنالیز با استانداردهای مربوطه در جدول (۲) مقایسه و مشخص شد که ترکیب شیمیایی در محدوده مجاز قرار دارد.

برای بدست آوردن یک ریزساختار همگن، عملیات حرارتی آنیل بر روی ورق اولیه نورد شده فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 در دمای 1050°C و به مدت 45 دقیقه انجام گردید و سپس ورق مورد نظر در آب کوئنچ شد. به منظور بررسی خواص کششی ماده، آزمایش کشش با استفاده از دستگاه مدل WDW-300 و با ظرفیت 300 kN انجام شد. سرعت حرکت فک دستگاه 3 mm/min تنظیم گردید. نمونه‌های



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه اولیه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های کشش تک محوری استاندارد با میزان کرنش‌های حقیقی ۰/۱ ($u = 6 \text{ mm}$)، ۰/۲۶ ($u = 16 \text{ mm}$)، ۰/۲۸ ($u = 18 \text{ mm}$)، ۰/۳۲ ($u = 20 \text{ mm}$) و ۰/۴۹ ($u = 31 \text{ mm}$) (تصویر نمونه پس از شکست) در دمای اتاق و شکل (۳-ج) تصویر نمونه پس از شکست در دمای -78°C نشان می‌دهد. فاز روشن، آستنیت و فاز تیره، مارتنزیت است. در اثر کشش، باندهای برشی تشکیل شده اند و مارتنزیت در محل‌های برخورد این باندها بوجود آمده است. در کرنش حقیقی ۰/۱ در کنار مارتنزیت، دوقلوبی‌های مکانیکی درون دانه‌های آستنیت اولیه دیده می‌شوند. تشکیل مارتنزیت α' به سه صورت مارتنزیت حاصل از تقاطع باندهای برشی [۲۰]، مارتنزیت حاصل از برخورد باندهای برشی و مرزخانه و تشکیل مارتنزیت در نقاط سه گانه مرزخانه ای [۲۱] گزارش شده است. به طور کلی می‌توان گفت که در کرنش‌های اعمالی کم، جوانه‌های مارتنزیت α' درون دانه‌ها در مکان‌هایی که باندهای برشی بسیار وجود دارند، تشکیل می‌شوند. البته به این نکته باید توجه داشت که تیغه‌های تیره رنگ می‌توانند یکی یا ترکیبی از هر دو نوع مارتنزیت باشد. در شکل (۳-ب تا ث) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان کرنش، مقدار مارتنزیت زیاد شده است. در واقع با افزایش میزان کرنش، باندهای برشی که به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی مارتنزیت، محسوب می‌شوند، افزایش می‌یابند. در محل تقاطع این مکان‌ها جوانه‌های مارتنزیت شکل می‌گیرند و در کرنش‌های بیشتر علاوه بر تشکیل جوانه‌های بیشتر مارتنزیت، رشد جوانه‌های مارتنزیت نیز صورت می‌گیرد.

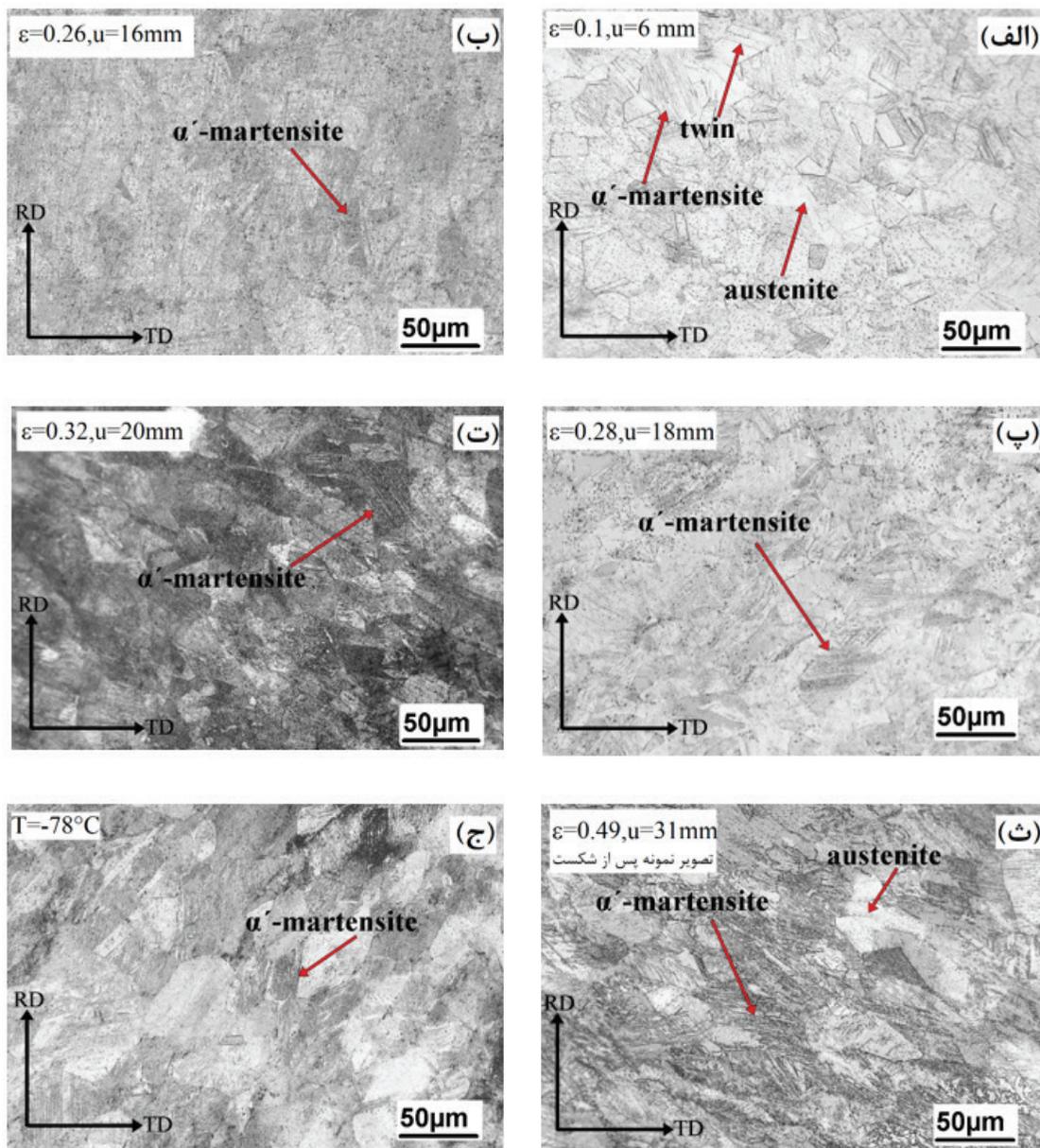
با توجه به شکل (۳-ث و ج) و نتایج سختی می‌توان گفت که میزان مارتنزیت تشکیل شده در آزمایش کشش تک محوری استاندارد در دمای -78°C نسبت به دمای 25°C بیشتر است. استحاله آستنیت به مارتنزیت α' به دما وابسته است. به نظر می‌رسد که در دمای -78°C نسبت به دمای 25°C به دلیل کاهش دما و وسعت بیشتر محدوده نقص چیده شدن به دلیل انرژی کمتر آن، مکان‌های بیشتری برای

انجام شد. سپس نمونه اولیه تهیه شده از ورق به منظور بررسی ریزساختار، تحت اچ الکترولیتی قرار گرفت. برای اچ الکترولیتی، نمونه به عنوان آند و یک نوار از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی به عنوان کاتد (قطب منفی) در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در محلول حاوی ۴۰ ml آب مقطر و 60 ml HNO_3 قرار داده شده و پس از قرارگیری کاتد درون الکترولیت، سطح بیرونی نمونه‌ها با ولتاژ جریان مستقیم و به مدت ۲ دقیقه اچ شدند. به منظور شناسایی فاز مارتنزیت، نمونه‌ها پس از تغییرشکل با استفاده از میکرو کاتر بریده و سپس مانت سرد شدند. پس از عملیات سنباده زنی و پولیش، تحت اچ مارتنزیتی قرار گرفتند. برای اچ مارتنزیتی از محلول HCl و HNO_3 به نسبت ۱:۲ استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری با استفاده از دستگاه مدل HUVITZ HM-TVO.5XE برای سطح نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شد. برای تعیین مقدار کسر حجمی مارتنزیت در نمونه‌های مختلف به روش مغناطیسی، از دستگاه فریتسکوپ ساخت شرکت Fisher مدل FMP30 استفاده شد. در این تحقیق از رابطه‌ی تالون و همکاران [۱۸]، جهت تبدیل مقادیر خوانده شده از فریتسکوپ به درصد مارتنزیت استفاده شد. آزمایش سختی به روش ویکرز توسط دستگاه Universal با بار 30 kgf مطابق استاندارد ASTM E92-03 انجام گردید. به علت وجود خطا از هر نمونه به تعداد حداقل سه اندازه گیری انجام شد و به عنوان عدد سختی هر یک از نمونه‌ها گزارش شد.

۳. نتایج و بحث

بررسی‌های ریزساختاری

شکل (۲) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه اولیه فولاد زنگ نزن آستنیتی نمونه اولیه تهیه شده از مقطع سطحی ورق پس از عملیات حرارتی آنیل را نشان می‌دهد. ریزساختار شامل دانه‌های آستنیت می‌باشد. اندازه دانه‌ها از تصاویر متالوگرافی به روش تقاطعی و با استفاده از نرم افزار Image J و مطابق استاندارد ASTM-E-112 تعیین شده است. میانگین اندازه‌ی دانه‌ها در سطح نمونه برابر $24/92 \mu\text{m}$ محاسبه شد. همانطور که در تصویر (۲) مشاهده می‌شود، عملیات آنیل انجام شده بر روی ورق تهیه شده از فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ پس از عملیات نورد، موجب شده است که دانه‌های کشیده شده در جهت نورد به صورت تقریباً هم محور درآیند. در تحقیقات کائومیا و همکاران [۱۹]، میانگین اندازه دانه‌های آستنیت حدود $21 \mu\text{m}$ گزارش شد و در برخی از دانه‌های آستنیت، دوقلوبی‌های آنیلی پراکنده حضور داشتند که در بررسی تصویر شکل (۲) در تحقیق حاضر، دو قلوبی‌های آنیلی مشاهده نشد.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ با میزان کرنش الف) ۰/۱، ب) ۰/۲۶، پ) ۰/۲۸، ت) ۰/۳۲، ث) ۰/۴۹ در دمای اتاق و ج) تصویر ریزساختار نمونه پس از شکست در دمای -78°C

فریتسکوپ برای آزمایش کشش تک محوری پس از شکست در دو دمای 25°C و -78°C نشان داده شده است. با کاهش دما، استحاله آستنیت به مارتنزیت بیشتر اتفاق افتاده است. این امر به این دلیل رخ می‌دهد که با کاهش دما، پایداری آستنیت کمتر می‌شود و مارتنزیت بیشتری تولید می‌شود. در شکل (۴) نتایج مقادیر اندازه گیری شده مارتنزیت در آزمایش کشش تک محوری استاندارد، توسط دستگاه فریتسکوپ در دو دمای 25°C و -78°C آورده شده است. همچنین از داده‌های انگل و همکاران [۱۲] نیز در دمای -78°C استفاده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان کرنش حقیقی در هر دو دما، میزان مارتنزیت افزایش

شکل‌گیری باندهای برشی و جوانه‌زنی فاز مارتنزیت تامین می‌شود. لذا تعداد برخورد باندهای برشی و در نتیجه مقدار مارتنزیت در دمای -78°C بیشتر است. البته در تصاویر ارائه شده در شکل (۳-ج و ث) به سختی می‌توان این موضوع را تشخیص داد ولی به هر جهت کسر حجمی مارتنزیت تولید شده بوسیله فریتسکوپ در تمام نمونه‌ها محاسبه و در بخش نتایج (۲-۳) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

سینتیک استحاله

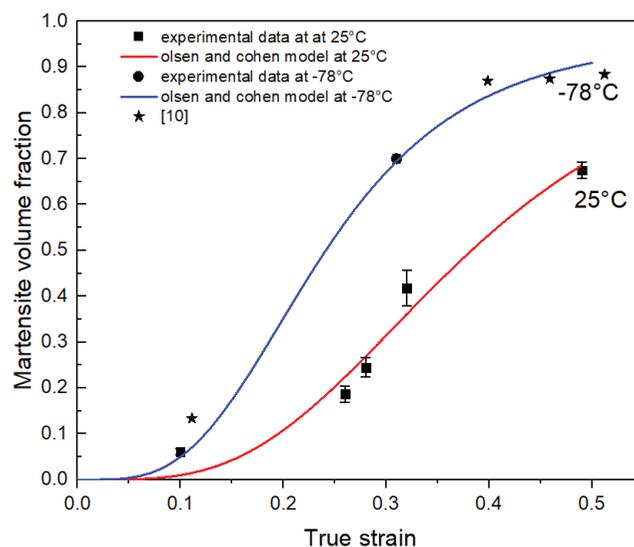
در جدول (۳) میزان مارتنزیت اندازه گیری شده بوسیله

جدول ۳. میزان مارتنزیت تشکیل شده برای آزمایش کشش تک محوری پس از شکست در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C-

دما (°C)	میانگین کسر حجمی مارتنزیت در آزمایش کشش تک محوری
۲۵	۰/۶۷ ± ۰/۰۱
-۷۸	۰/۷۶ ± ۰/۰۰۹

جدول ۴. پارامترهای اولسن-کوهن محاسبه شده برای آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C-

دما (°C)	α	β
۲۵	۳/۲	۲/۶
-۷۸	۴/۹	۳/۶



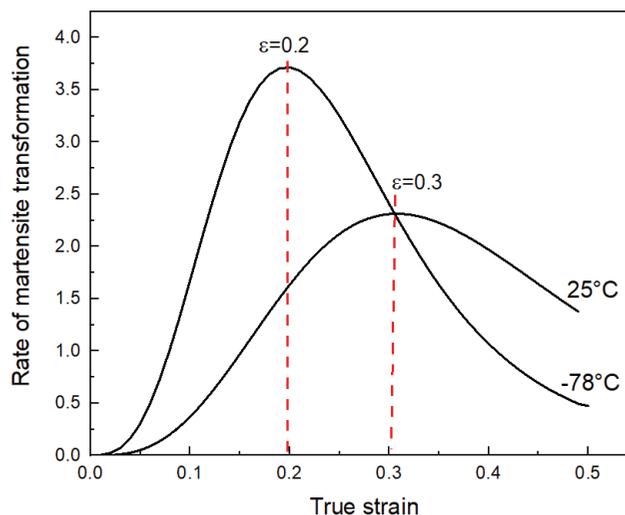
شکل ۴. تغییرات کسر حجمی مارتنزیت برحسب کرنش حقیقی (نقاط مربع و دایره تو پر) ، مدل اولسن-کوهن انطباق یافته با داده‌ها (منحنی ممتد) برای آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C-

در این تحقیق نیز مشاهده شد که با کاهش دما از ۲۵°C به -۷۸°C، پارامترهای α و β افزایش یافته است. نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت با استفاده از مشتق اول نمودارهای شکل (۴) به دست آمد. در شکل (۵)، نمودارهای نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت آزمایش کشش تک محوری در دماهای ۲۵°C و -۷۸°C نشان داده شده است. حداکثر نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت برای دماهای ۲۵°C و -۷۸°C به ترتیب در کرنش حقیقی ۰/۳ و ۰/۲ به دست می‌آید. قبل از این میزان کرنش، تشکیل مارتنزیت با سرعت بسیار زیادی انجام می‌گیرد و پس از آن نرخ افزایش مقدار مارتنزیت کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. این امر به علت این است که در کرنش‌های کم، جوانه‌های مارتنزیت تشکیل می‌گردند، سپس بدون هیچ مانعی در اطراف شروع به رشد می‌کنند تا بلوک‌های مارتنزیتی با یکدیگر یا مرزخانه‌ها برخورد کنند. پس از آن نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت

یافته است. این داده‌ها با رابطه‌ی اولسن-کوهن که به عنوان بهترین مدل برای توصیف کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیکی تاکنون تلقی می‌شود، مقایسه شده و با استفاده از نرم افزار Origin pro بررسی و برازش مدل استحاله با نتایج تجربی انجام شده است. در جدول (۴) پارامترهای معادله اولسن-کوهن برای آزمایش کشش تک محوری استاندارد در دماهای ۲۵°C و -۷۸°C بیان شده است. α پارامتر وابسته به انرژی نقص در چیده شدن و نرخ کرنش می‌باشد که با کاهش انرژی نقص در چیده شدن و افزایش یافتن نرخ کرنش، افزایش می‌یابد و ارائه دهنده نرخ تشکیل باندهای برشی است. β پارامتری است که احتمال تشکیل جوانه‌ی مارتنزیت در محل برخورد باندهای برشی را نشان می‌دهد و هر دو پارامتر α و β حساس به دما می‌باشند و n توان ثابت می‌باشد که برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ برابر ۴/۵ در منابع مختلف گزارش شده است [۹، ۱۰].

جدول ۵. مقایسه استحکام تسلیم، استحکام کششی و داکتیلیته آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C

داکتیلیته (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	دما (°C)
۵۹	۶۸۱	۲۷۴	۲۵
۳۱	۸۹۸	۴۳۷	-۷۸



شکل ۵. منحنی تغییرات نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت در آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دماهای ۲۵°C و -۷۸°C

۷۸°C، چگالی نابجایی‌ها در پشت موانع کمتر است و این امر منجر به راحت حرکت کردن و تکثیر نابجایی‌ها می‌شود و بازیابی و مکانیزم لغزش متقاطع^{۱۰} نابجایی‌ها راحت تر و در نتیجه کارسختی کمتر است و شکست دیرتر اتفاق می‌افتد. از دلایل دیگر کاهش داکتیلیته در دمای پایین می‌توان به افزایش کسر حجمی فاز مارتنزیت در اثر کاهش دما اشاره کرد.

فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در این تحقیق رفتار کارسختی مشابهی در مقایسه با تحقیقات گزارش شده [۲۳] نشان می‌دهد. نمودار نرخ کارسختی با استفاده از مشتق اول نمودار تنش- کرنش حقیقی ترسیم می‌شود. در تحقیقات گزارش شده [۲۲، ۲۳] نرخ کارسختی دارای سه مرحله است. در مرحله اول بعد از تسلیم نرخ کارسختی کاهش می‌یابد. کاهش نرخ کارسختی در مرحله اول به شکل گیری سریع مارتنزیت ϵ و مکانیزم لغزش دانه‌های آستنیت مربوط می‌شود. در مرحله دوم، ریزساختار از فاز مارتنزیت α' سخت در زمینه آستنیتی نرم‌تر تشکیل شده است. به دلیل تغییر شکل پلاستیکی نا همگن، تولید نابجایی‌ها در آستنیت افزایش یافته و به علت برهمکنش نابجایی‌ها و مکانیزم تجمع^{۱۱} نابجایی‌ها پشت موانع، باعث افزایش مقاومت به حرکت نابجایی‌ها می‌شود که در نتیجه، تنش سیلان و

کاهش پیدا می‌کند. مطابق تحقیقات انجام شده [۲۲] نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت تا حد زیادی به دمای تغییر شکل بستگی دارد. با کاهش دما، حداکثر نرخ استحاله افزایش و در کرنش‌های پلاستیک پایین تر رخ می‌دهد، این امر به علت تاثیر انرژی نقص در چیده شدن و نیروی محرکه شیمیایی بر نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت است.

خواص کششی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C

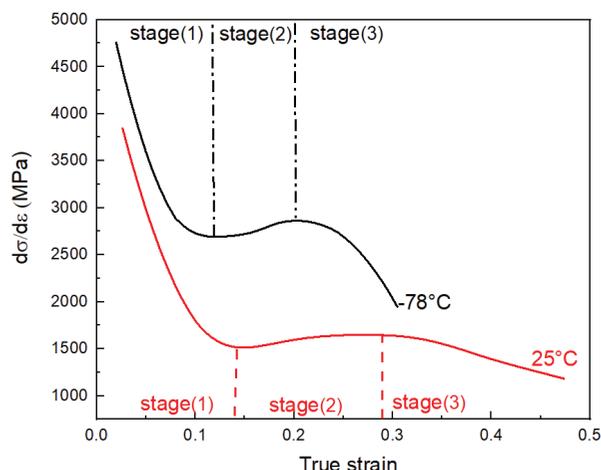
مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی کششی و درصد ازدیاد طول نهایی (داکتیلیته) استخراج شده از منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی در جدول (۵) نشان داده شده است. در جدول (۵) مشاهده می‌شود که نمونه در دمای ۲۵°C نسبت به -۷۸°C استحکام کششی و تسلیم کمتری دارد. با کاهش دما به دلیل تشکیل کسر حجمی بیشتر مارتنزیت که فازی با استحکام بالا است، استحکام افزایش می‌یابد. حساسیت استحکام نهایی به دما نسبت به استحکام تسلیم بیشتر است. یا به عبارتی می‌توان گفت در اثر کاهش دما، استحکام نهایی بیشتر از استحکام تسلیم دچار افزایش می‌شود. این امر به علت این است که استحاله فاز مارتنزیت پس از شروع تغییر فرم پلاستیک رخ می‌دهد لذا بر نقطه تسلیم تاثیر کمتری می‌گذارد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش دما، داکتیلیته کاهش می‌یابد. در دمای ۲۵°C نسبت به دمای

10. Cross-Slip

11. Pile-Up

جدول ۶. مقادیر کرنش پلاستیک در هر مرحله و همچنین بیشترین و کمترین نرخ کارسختی در مرحله دوم آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ برای دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C

دما (°C)	مرحله اول کارسختی	مرحله دوم کارسختی	مرحله سوم کارسختی	کمترین میزان نرخ کارسختی در مرحله دوم	بیشترین میزان نرخ کارسختی در مرحله دوم
۲۵	$\epsilon < 0.14$	$0.14 < \epsilon < 0.29$	$0.29 < \epsilon < 0.47$	۱۵۱۲	۱۶۴۹
-۷۸	$\epsilon < 0.11$	$0.11 < \epsilon < 0.2$	$0.2 < \epsilon < 0.3$	۲۶۹۱	۲۸۶۰



شکل ۶. منحنی تغییرات نرخ کارسختی بر حسب کرنش حقیقی در دماهای ۲۵°C و -۷۸°C برای آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴

نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مقادیر کرنش پلاستیک مرحله اول، مرحله دوم و مرحله سوم همگی با کاهش دما، کاهش می‌یابند. می‌توان از رابطه هولومان^{۱۲} برای توصیف رفتار کارسختی استفاده کرد.

$$\text{رابطه (۳)}$$

$$\sigma = K\epsilon^n$$

n، توان کارسختی و K، ضریب استحکام ماده نامیده می‌شود. مقدار توان کارسختی به عملیات حرارتی و مکانیکی بستگی دارد [۲۴]. می‌توان از قانون مخلوطها برای توصیف رفتار کارسختی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ استفاده کرد. با در نظر گرفتن مدل کارسختی هولومان و مدل سینتیک استحاله اولسن-کوهن رابطه‌ی زیر بدست آمده است.

$$\text{رابطه (۴)}$$

$$\sigma = K_y \epsilon^n (1 - f^M) + K_M \epsilon^m f^M$$

K_y ، K_M ، n و m به ترتیب ضریب استحکام و توان کارسختی فازهای آستنیت و مارتنزیت هستند و f^M از طریق معادله اولسن-کوهن محاسبه می‌شود [۲۵]. شکل (۷) نشان

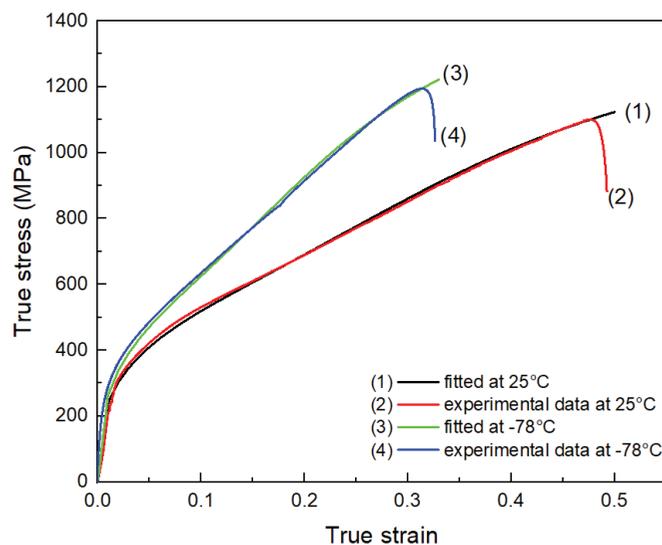
نرخ کارسختی افزایش می‌یابد. در مرحله سوم به علت عبور نایجابی‌ها از موانع و مکانیزم لغزش متقاطع به تدریج تا نقطه گلوبی شدن، نرخ کارسختی کاهش می‌یابد. سرعت تشکیل مارتنزیت α' کمتر از مرحله‌ی دوم است و در این مرحله کسر حجمی مارتنزیت α' نزدیک به اشباع است. به نظر می‌رسد که سرعت تشکیل مارتنزیت α' برای بالا بردن نرخ کارسختی کمتر از نرخ بازبابی برای نرم شدن است.

نمودارهای نرخ کارسختی بر حسب کرنش حقیقی در دماهای ۲۵°C و -۷۸°C برای آزمایش کشش تک محوری در شکل (۶) نشان داده شده است. در هر دو نمودار سه مرحله وجود دارد. با کاهش دما از ۲۵°C به -۷۸°C میزان افزایش نرخ کارسختی در مرحله دوم افزایش می‌یابد. همانطور که در بالا اشاره شد، در منطقه دوم رفتار کارسختی توسط استحاله آستنیت به مارتنزیت α' و نایجابی‌ها کنترل می‌شود. علاوه بر این، مطابق تحقیقات اولسن و کوهن [۱۰] سرعت استحاله آستنیت به مارتنزیت α' یک عامل کلیدی برای تاثیر رفتار کارسختی در مرحله دوم برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است و نشان داده شده است که با کاهش دما، سرعت استحاله آستنیت به مارتنزیت افزایش می‌یابد. جدول (۶) مقادیر کرنش پلاستیک در هر مرحله و همچنین بیشترین و کمترین نرخ کارسختی در مرحله دوم را برای دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C

12. Hollomon

جدول ۷. مقادیر توان کارسختی و ضریب استحکام فازهای آستنیت و مارتنزیت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C-

دما (°C)	توان کارسختی فاز آستنیت، n	ضریب استحکام فاز آستنیت، K_p (MPa)	توان کارسختی فاز مارتنزیت، m	ضریب استحکام فاز مارتنزیت، K_m (MPa)
۲۵	۰/۳۳	۱۱۰۰	۰/۱۱	۱۳۸۴
-۷۸	۰/۳۶	۱۳۸۰	۰/۱۹	۱۶۴۰



شکل ۷. مقایسه بین منحنی‌های تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش تک محوری استاندارد و منحنی‌های بدست آمده از رابطه‌ی (۴) در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C

ویکرز تنها به تشکیل فاز مارتنزیت مربوط نمی‌شود بلکه به کارسختی ناشی از افزایش چگالی نابجایی‌ها در فاز آستنیت نیز وابسته است. چگالی نابجایی‌ها در فاز آستنیت با افزایش میزان کرنش، افزایش می‌یابد.

در شکل (۸)، می‌توان افزایش مقدار سختی را به سه منطقه $\epsilon < 0/26$ ، $0/26 < \epsilon < 0/32$ و $0/32 < \epsilon < 0/49$ تقسیم کرد. در منطقه اول ($\epsilon < 0/26$) بنظر می‌رسد بدلیل اینکه چگالی نابجایی‌ها کم است، سختی فولاد فقط به درصد کسر حجمی مارتنزیت α' بستگی دارد. در منطقه دوم ($0/26 < \epsilon < 0/32$) افزایش مقدار سختی نسبت به منطقه اول بیشتر است. چگالی نابجایی‌ها زیاد است و سختی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ علاوه بر کسر حجمی فاز مارتنزیت α' ، به چگالی نابجایی‌ها در فاز آستنیت بستگی دارد. افزایش چگالی نابجایی‌ها موجب برخورد و واکنش بیشتر آنها و در نتیجه مکانیزم تجمع نابجایی‌ها در پشت موانع و کارسختی می‌شود. در منطقه سوم ($0/32 < \epsilon < 0/49$) بنظر می‌رسد احتمالاً به دلیل عبور نابجایی‌ها از موانع و بازیابی، افزایش مقدار سختی نسبت به منطقه دوم کمتر باشد و سختی تقریباً به تعادل رسیده است.

جدول (۸) ارتباط بین سختی وکزرز و کسر حجمی مارتنزیت را برای آزمایش کشش تک محوری پس از شکست

می‌دهد که بین منحنی تنش- کرنش حقیقی بدست آمده از آزمایش کشش تک محوری استاندارد در دو دمای ۲۵ و -۷۸°C و منحنی‌های بدست آمده از رابطه‌ی (۴) همبستگی خوبی وجود دارد.

جدول (۷) مقادیر توان کارسختی و ضریب استحکام فازهای آستنیت و مارتنزیت در دو دمای ۲۵ و -۷۸°C نشان داده شده است. مقدار توان کارسختی در هر دو فاز با کاهش دما، افزایش یافته است که این امر بیانگر قفل شدن بیشتر نابجایی‌ها در دماهای کم است.

بررسی نتایج سختی

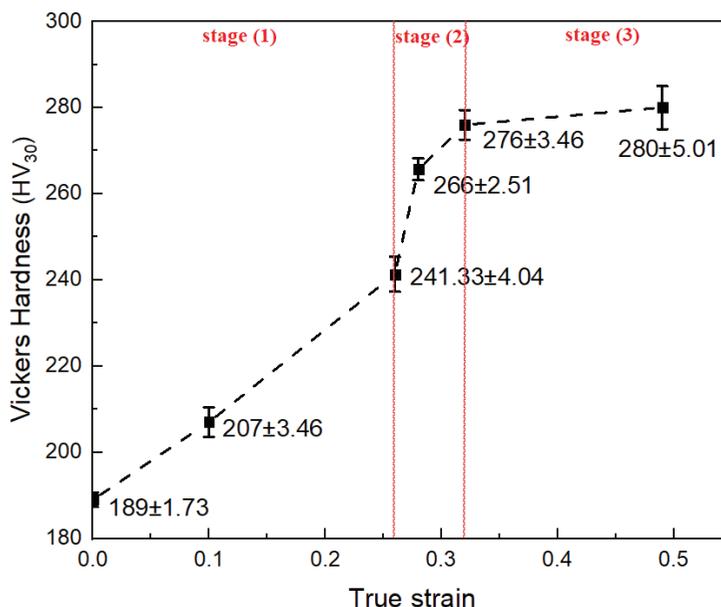
تغییرات سختی ویکرز با میزان کرنش حقیقی در حین آزمایش کشش تک محوری در دمای اتاق در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان کرنش حقیقی، سختی افزایش می‌یابد. میزان سختی از HV ۱۸۹ به HV ۲۸۰ در کرنش حقیقی ۰/۴۹ و کرنش مهندسی ۰/۶۳ می‌رسد. بالا رفتن مقدار سختی را می‌توان با ضریب استحکام و توان کارسختی مرتبط دانست. شینتانی^{۱۳} [۲۶] و تسوکادا^{۱۴} [۲۶، ۲۷] گزارش کردند که افزایش میزان سختی

13. Shintani

14. Tsukada

جدول ۸. ارتباط بین سختی ویکرز و کسر حجمی مارتنزیت برای آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C-

کسر حجمی مارتنزیت	سختی (HV ₃₀)	دما (°C)
۰/۶۷ ± ۰/۰۱	۲۸۰ ± ۵	۲۵
۰/۷۶ ± ۰/۰۰۹	۳۰۹ ± ۵	-۷۸



شکل ۸. منحنی تغییرات سختی ویکرز با کرنش حقیقی حین آزمایش کشش تک محوری فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دمای ۲۵°C

اتاق، کسر حجمی مارتنزیت افزایش یافته است. همچنین در دمای -۷۸°C نسبت به دمای ۲۵°C، مقدار مارتنزیت بیشتری تشکیل شده است.

۲- با استفاده از مشتق اول نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش حقیقی، نمودارهای نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت در نمونه‌های آزمایش کشش تک محوری با هندسه استاندارد در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C ترسیم شد. حداکثر نرخ استحاله آستنیت به مارتنزیت برای دماهای ۲۵°C و -۷۸°C به ترتیب در کرنش حقیقی ۰/۳ و ۰/۲ بدست آمد و میزان حداکثر نرخ استحاله در دمای -۷۸°C نسبت به دمای ۲۵°C بیشتر بود.

۳- مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی کششی و داکتیلیته استخراج شده از منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی آزمایش کشش تک محوری با هندسه استاندارد در دمای اتاق به ترتیب ۲۷۴MPa، ۶۸۱MPa و ۵۹٪ و همچنین در دمای -۷۸°C به ترتیب ۴۳۷MPa، ۸۹۸MPa و ۳۱٪ بود. مشاهده شد که حساسیت استحکام نهایی به دما نسبت به استحکام تسلیم بیشتر است.

۴- نمودارهای نرخ کارسختی بر حسب کرنش حقیقی در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C برای آزمایش کشش تک محوری با هندسه استاندارد ترسیم شد. در هر دو نمودار، سه مرحله

در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود با کاهش دما از دمای ۲۵°C و -۷۸°C، میزان سختی افزایش یافته است. این امر به این دلیل است که با کاهش دما، تنش لازم برای تسلیم ماده افزایش می‌یابد. همچنین افزایش توان کارسختی، افزایش ضریب استحکام و افزایش کسر حجمی مارتنزیت، به افزایش میزان سختی منجر می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دما بر سینتیک استحاله آستنیت به مارتنزیت و خواص کششی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ بررسی شد. به منظور رسیدن به این هدف، آزمایش کشش تک محوری در دو دمای ۲۵°C و -۷۸°C تا نقطه شکست انجام شد. همچنین در دمای ۲۵°C، آزمایش کشش با اعمال مقادیر مختلف کرنش (قبل از شکست نمونه) انجام شد. میزان کسر حجمی مارتنزیت در این آزمایش بوسیله دستگاه فریتسکوپ اندازه‌گیری شد. از مجموع بررسی‌ها، نتایج زیر به دست آمد:

۱- نتایج اندازه‌گیری کسر حجمی مارتنزیت بوسیله فریتسکوپ نشان داد که با افزایش میزان کرنش در دمای

و 78°C - محاسبه شد. مشخص شد که با کاهش دما، مقادیر ضریب استحکام و توان کارسختی فازهای آستنیت و مارتنزیت افزایش می‌یابند.

۶- در آزمایش کشش تک محوری با افزایش میزان کرنش حقیقی، مقدار میانگین سختی افزایش یافت. همچنین مقدار میانگین سختی در دمای 78°C - و 25°C به ترتیب 309 و 280 به دست آمد.

کارسختی مشاهده شد و همچنین مشاهده شد که نرخ کارسختی حین آزمایش کشش در دمای 78°C - نسبت به آزمایش کشش در دمای 25°C بیشتر است.

۵- مقادیر ضریب استحکام و توان کارسختی فازهای آستنیت و مارتنزیت با در نظر گرفتن مدل کارسختی هولومان و مدل سینتیک استحال اولسن-کوهن برای آزمایش کشش تک محوری با هندسه استاندارد در دو دمای 25°C

References

- [1] Padilha. A. F, Rios P. R. Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels. ISIJ Int 2002; 42: 325-337. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.325>
- [2] Smith WF. Structure and Properties of Engineering Alloys. McGraw-Hill, 1993.
- [3] Rajasekhara S, Ferreira PJ, Karjalainen LP, et al. Hall-Petch behavior in ultra-fine-grained AISI 301LN stainless steel. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 2007; 38: 1202-1210.
- [4] Davis JR. Alloy digest sourcebook : stainless steels. Material Park, OH : ASM international, 2000.
- [5] Hedström P. Deformation and Martensitic Phase Transformation in Stainless Steels. Luleå Univ Technol.
- [6] David A. Porter , kenneth E , Easterling MYS. Phase Transformations in Metals and Alloys. 3rd ed. 2009. Epub ahead of print 2009. DOI: 10.1201/9781439883570.
- [7] Haušild P, Davydov V, Drahošoupil J. Characterization of strain-induced martensitic transformation in a metastable austenitic stainless steel. Mater Des 2010; 31: 1821-1827. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.008>
- [8] Sato K, Ichinose M, Hirotsu Y. Effects of deformation induced phase transformation and twinning on the mechanical properties of austenitic Fe-Mn-Al alloys. ISIJ Int 1989; 29: 868-877.
- [9] Hedayati A, Najafzadeh A, Kermanpur A. The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel. J Mater Process Technol 2010; 210: 1017-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010>
- [10] G. B. Olsen M cohen. Kinetics of Strain-induced Martensitic Nucleation. J Assoc Physicians India; 62. <https://doi.org/10.1007/BF02672301>
- [11] Brooks JW, Loretto MH, Smallman RE. In situ observations of the formation of martensite in stainless steel. Acta Metall 1979; 27: 1829-1838. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90073-7)
- [12] Angel T. Formation of martensite in austenitic stainless steels effects of deformation, temperature, and composition. J Iron Steel Inst 1954; 177: 165-174.
- [13] Gerberich, W.W., Thomas, G., Parker, E.R. and Zackay, V.F., "Metastable Austenites: Decomposition and Strength", in Second International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Conference Proceedings, Vol. III, Metals Park, Ohio: American Society for Metals (1970), 894-99.
- [14] Schramm RE, Reed RP. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels. Metall Trans A 1975; 6: 1345-1351. <https://doi.org/10.1007/BF02641927>
- [15] Das A, Tarafder S, Chakraborti PC. Estimation of deformation induced martensite in austenitic stainless steels. Mater Sci Eng A 2011; 529: 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.039>
- [16] Talonen J, Hänninen H. Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels. Acta Mater 2007; 55: 6108-6118.
- [17] Anand A. Stainless Steel Grade Datasheets Atlas Steels Technical Department Stainless Steel Grade Datasheets. Atlas Steels Tech Dep 2013; 2 of 2.
- [18] Talonen J, Nenonen P, Pape G, et al. Effect of strain rate on the strain-induced γ , \rightarrow α' -martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 2005; 36 A: 421-432. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0313-y>
- [19] Kaoumi D, Liu J. Materials Science & Engineering A Deformation induced martensitic transformation in 304 austenitic stainless steel : In-situ vs . ex-situ transmission electron microscopy characterization. Mater Sci Eng A 2018; 715: 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.036>
- [20] Olson GB, Cohen M. A mechanism for the strain-induced martensitic transformations. J Less-Common Met 1972; 28: 107-118. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(72\)90173-7](https://doi.org/10.1016/0022-5088(72)90173-7)
- [21] Das A, Sivaprasad S, Ghosh M. Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel. Mater Sci Eng A 2008; 486: 283-286. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.039>
- [22] Talonen J. Effect of Strain-Induced Alfa'-Martensite Transformation on Mechanical Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. 2007.
- [23] De AK, Speer JG, Matlock DK. Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci 2006; 37: 1875-1886.
- [24] Dieter GE. Mechanical metallurgy. McGraw-Hill, 2011. Epub ahead of print 23 November 2011. DOI: 10.5962/bhl.title.35895.
- [25] Tourki Z, Bargui H, Sidhom H. The kinetic of induced martensitic formation and its effect on forming limit curves in the AISI 304 stainless steel. J Mater Process Technol 2005; 166: 330-336. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.08.010>
- [26] Shintani T, Murata Y. Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction. Acta Mater 2011; 59: 4314-4322. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.055>
- [27] Tsukada Y, Shiraki A, Murata Y. Phase-field simulation of nucleation and growth of $M_{23}C_6$ carbide and ferromagnetic phases during creep deformation in Type 304 steel. J Nucl Mater 2010; 401: 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.04.017>