



اثر گرادیان دمایی روی تحولات ریزساختاری شمش ضخیم فولاد زنگ‌زن آستنیتی نیترونیک ۵۰ حین نورد داغ

آرش قاسمی^۱، سید مهدی عباسی^{۲*}، مریم مرکباتی^۳، آدلی آخوندزاده^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

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

۴- پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: sma_abbasi@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۶ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

شبیه‌سازی

نورد با شیب دمایی

تحولات ریزساختاری

فولاد زنگ‌زن

چکیده

اصلاح اندازه دانه از طریق تبلور مجدد دینامیکی یکی از راه‌های مناسب جهت بهبود خواص مکانیکی شمش‌های فولادهای زنگ‌زن آستنیتی نیترونیک بالا حین نورد داغ می‌باشد. در این مقاله با استفاده به شبیه‌سازی بر پایه‌ی المان محدود و نتایج تجربی، اثر نورد معمولی و نورد با گرادیان دمایی روی تحولات ریزساختاری شمش فولاد زنگ‌زن آستنیتی حاوی نیترونیک ۵۰ حین نورد داغ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌وسیله‌ی آباکوس نشان داد که تحت شرایط گرادیان دمایی می‌توان یکنواختی کرنش در سطح مقطع را افزایش داد. در حالی‌که در شرایط نورد معمولی مقدار بیشینه کرنش در سطح نمونه است. نتایج ریز ساختاری حاصل از میکروسکوپ نوری برای نورد با گرادیان دمایی نشان داد میانگین اندازه دانه در مرکز شمش کمتر از سطح شمش بوده که نشان می‌دهد مقدار تبلور مجدد در مرکز شمش بیش‌از سطح نمونه است. اختلاف دما در مرکز نسبت به سطح نمونه منجر به کاهش قابل ملاحظه استحکام در مرکز شمش نسبت به سطح آن می‌شود. اختلاف میانگین اندازه دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی شده در سطح و مرکز شمش برای نورد با گرادیان دمایی کمتر از ۳ μm بود. وجود دانه‌های اولیه (میانگین اندازه دانه ۶۸ μm) و مرزهای تحذب یافته در مرکز شمش و دانه‌های یکنواخت و ریز در قسمت سطحی (۸/۵ μm) شمش تحت نورد معمولی (۱۰۰۰°C)، نشان داد که در مرکز شمش به دلیل پایین بودن دما و مقدار کرنش مؤثر، تبلور مجدد دینامیکی رخ نداده است. توزیع تقریباً یکنواخت دانه‌های آستنیت در جهت ضخامت شمش برای نورد با گرادیان دمایی نشان داد که این روش، برای نورد داغ شمش فولاد آستنیتی روشی مناسب نسبت به شرایط نورد معمولی است.

Effect of gradient temperature on the microstructural evolution of Nitronic 50 austenitic stainless steel thick ingot during hot rolling

Arash Ghasemi¹, Seyed Mahdi Abbasi^{2*}, Maryam Morakabati³, Adli Akhondzadeh⁴

1- PhD Candidate, Materials and Metallurgical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3- Associate professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

4- Researcher, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: sma_abbasi@mut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 29 September 2023

Accepted: 6 January 2024

Keywords:

Simulation

Gradient Temperature Rolling

Microstructural Evolution

Stainless Steels

Abstract

Grain refinement through dynamic recrystallization is one way to improve the mechanical properties of high nitrogen austenitic stainless-steel ingots during hot rolling. In this paper, by using simulation based on the finite element method and experimental results, the effect of conventional rolling and gradient temperature rolling on the microstructural evolution of Nitronic 50 austenitic stainless-steel ingot during hot rolling is investigated. The results of simulations showed that strain in the center of the ingot be increased under a gradient temperature, while the maximum strain value in the conventional rolling is on the surface. The microstructural results obtained from optical microscopy for gradient temperature rolling showed strain value in the center is more than the surface. The temperature difference between the center and the surface leads to a significant reduction in the strength center of the ingot against the surface. The difference in average grain size of dynamic recrystallized for gradient temperature in the surface and center was less than 3μm. The existence of primary grains (68μm average grain size) and bulged grain boundaries in the center of ingot and refinement and small grains in the surface area (8.5μm) in conventional rolling (1000°C) showed that dynamic recrystallization, due to low effective strain and temperature, has not occurred in the center of the ingot. The almost uniform distribution of austenite grains in the direction of ingot thickness for gradient temperature rolling showed that this method is an appropriate method for hot rolling of austenitic steel ingots compared to conventional conditions.

Please cite this article using:

Ghasemi A, Abbasi SM, Morakabati M, Akhondzadeh A. Effect of gradient temperature on the microstructural evolution of Nitronic 50 austenitic stainless steel thick ingot during hot rolling. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 August 23;10(6):65-76. doi: 10.22034/IJME.2024.416957.1833 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

تختال فوق‌سنگین (شمش‌های ضخیم)، تختال‌های فولادی نورد داغ شده‌ای هستند که ضخامتی بیش از 60mm دارند. این تختال‌ها (از جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی) کاربردهای بسیاری در ماشین‌آلات سنگین، سکویهای نفتی، کشتی‌ها و زیرسازها دارند [۲، ۱]. از ویژگی‌های این تختال‌ها می‌توان به استحکام و چقرمگی بالا در دماهای پایین، دمای انتقال شکست نرم به ترد پایین، خواص جوشکاری مطلوب و مقاومت در برابر شکست لایه‌ای با ریزساختار همگن اشاره نمود [۳]. تختال‌های فوق‌سنگین عموماً از شمش‌های ریختگی بزرگ نورد شده بدست می‌آیند. با این وجود افزایش روند کاهش سطح مقطع در مرکز این شمش‌ها در نوردهای معمولی دشوار است. مقدار کاهش سطح مقطع در مرکز شمش‌ها ناشی از کاهش کرنش در این ناحیه بوده که منجر به عدم کنترل کافی در فرآیند تبلور مجدد حین نورد داغ در مرکز نمونه می‌شود. در نتیجه دانه‌های درشت ساختار ریختگی شمش را نمی‌توان از بین برد. به همین دلیل فرآیند نورد با تغییرات گرادیان دمایی انجام می‌شود [۴-۶]. فرآیند نورد بصورت گرادیان دمایی سطح نسبت به مرکز شمش به این صورت است که حین تغییر شکل به علت دمای پایین سطح نسبت به مرکز، مقاومت سطح در برابر تغییر شکل بیشتر بوده در حالی که در مرکز آن بواسطه درجه حرارت بالاتر، مقاومت کمتر است. در نتیجه تغییر شکل در مرکز نسبت به سطح بیشتر می‌شود [۶، ۷]. با توجه به اینکه ساختار تبلور مجدد، وابسته به دما، نرخ کرنش و کرنش می‌باشد [۹، ۸]؛ در نرخ کرنش ثابت با افزایش دما و مقدار کرنش، کسر تبلور مجدد افزایش می‌یابد [۹]. در نتیجه با ایجاد گرادیان دمایی می‌توان اندازه دانه‌های تبلور مجدد در سطح و مرکز را یکنواخت کرد. دمای سطح و تغییر شکل کلی شمش‌های ضخیم بطور تجربی بدست می‌آیند اما مشاهده تحولات دمایی و تعیین مقادیر تنش و کرنش در طول ضخامت تختال فولادی دشوار است. به همین دلیل شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی تغییرات میدانی دما، تنش و کرنش حین فرآیند تغییر شکل می‌تواند مفید باشد. به عنوان مثال، ون و همکاران [۱۰] عملیات حرارتی فولادهای ریختگی را بصورت شبیه‌سازی عددی توسعه دادند و روند توزیع تنش و کرنش‌های ایجاد شده حین عملیات حرارتی را مشخص کردند. لویز و همکاران [۱۱]، در شبیه‌سازی المان محدود (FEM)^۱، اثر اندازه دانه آستنیت و مسیر سرد کردن را روی اعوجاج و تبدیل فاز در فولاد SAE5160 بررسی کردند و با مشخص کردن عوامل مختلف ناشی از اعوجاج، راه‌های مؤثر برای کاهش اعوجاج را پیشنهاد کردند. یعقوبی و همکاران [۱۲] با شبیه‌سازی در آباکوس رفتار ترمومکانیکی فولادها را توسعه دادند. خی و همکاران [۱۳] با مطالعه روی شمش‌های ضخیم در فولاد Fe1.3Mn0.76Cr0.37Ni نشان دادند که ایجاد گرادیان دمایی باعث افزایش استحکام در کل ضخامت نمونه شده و خواص مکانیکی همچون ازدیاد طول و انرژی ضربه آن را افزایش می‌دهد. انصاری و همکاران [۱۴] اثر فرآیند اغتشاشی اصطکاکی (FSP)^۲ با سرعت چرخش پین در فرآیند اوپلری-لاگرانژی (CEL)^۳ به‌وسیله آباکوس را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که مدل اوپلری-لاگرانژی با بهینه‌سازی فرآیند اغتشاشی اصطکاکی ابزار قدرت‌مندی برای شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده مکانیکی در صنعت می‌باشد. بروندبایر و همکاران [۱۵] شبیه‌سازی تنش پسماند و تحولات ساختاری در لوله‌های فولادی حین سرد کردن را مورد بررسی قرار دادند و راه‌حلی برای بهبود فرآیند پیشنهاد کردند. هان و همکاران [۱۶] نیز رفتار پلاستیسیته در کرنش‌های بالا را بر پایه ریز ساختار در شرایط کرنش صفحه‌ای در آباکوس با استفاده از روش حل گر ضمنی به‌طور کامل بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. کنزوویچ و همکاران [۱۷] با مدل‌سازی نورد و اکستروژن در آباکوس، رفتار و تحولات ریزساختاری بر اساس داده‌های طیف پلاستیسیته بلورها (SCP)^۴ را توسعه دادند. شویان و همکاران [۱۸] با شبیه‌سازی اثر گرادیان دمایی در فرآیند نورد روی تختال‌های سنگین، نشان دادند که با سرد شدن سطح نسبت به مرکز، تغییر شکل در مرکز بیشتر شده و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. چن و همکاران [۱] با شبیه‌سازی رفتار و تحولات ریز ساختاری از طریق اصلاح اندازه دانه‌های آستنیت در فولاد Q690، دریافتند که ایجاد گرادیان دمایی در جهت ضخامت شمش‌های ضخیم فولادی، باعث بهبود خواص مکانیکی در مرکز تختال می‌شود.

از گذشته تا کنون ثابت شده است که فرآیند شبیه‌سازی در صنعت بسیار مفید و مناسب می‌باشد. از آنجایی که فرآیندهای تغییر شکل گران قیمت و زمان‌بر بوده و همچنین مطالعه دقیق متغیرهای مؤثر این فرآیندها حین انجام آزمایش کار دشواری است؛ لذا شبیه‌سازی در این زمینه می‌تواند بسیار مفید باشد. بر این اساس مطالعات گسترده‌ای در خصوص شبیه‌سازی رفتار فلزات حجیم حین

¹ Finite Element Method

² Friction Stir Processing

³ Coupled Eulerian-Lagrangian

⁴ Spectral Crystal Plasticity

نورد انجام شده است. اما اطلاعات و تحقیقات زیادی در زمینه رفتار و تحولات ریزساختاری روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نیترونیك ۵۰ صورت نپذیرفته است. با این حال گیو و همکاران [۱۹] با مطالعه روی رفتار مکانیکی فولاد نیترونیك ۵۰ در محدوده دمایی 196°C - ۷۲۷ - نشان دادند که آلیاژ حاضر حتی در دماهای بسیار پایین کرنش شکست بیش از ۳۵٪ را خواهد داشت. از سوی دیگر، قاسمی و همکاران [۲۰] با مطالعه روی فولاد نیترونیك ۵۰ نشان دادند که شرایط بهینه نورد فولاد مذکور در دمای 1050°C می‌باشد. لذا در این پژوهش اثر تغییرات دمایی روی تحولات ریزساختاری حین نورد داغ برای فولاد نیترونیك ۵۰ بر اساس توزیع تنش و کرنش معادل توسط نرم‌افزار المان محدود محیط کامل آباکوس (CAE)^۱ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و در نهایت شرایط شبیه‌سازی شده با شرایط واقعی صحت سنجی شده است. با استفاده از تغییرات دمایی ایجاد شده و تأثیر آن روی استحکام ماده و به طبع تأثیر دما و مقدار کرنش روی تبلور مجدد و اصلاح اندازه دانه این نوع فولادها، می‌توان به ریزساختاری تقریباً یکنواخت در طول ضخامت تختال‌های حجیم دست یافت.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- شبیه‌سازی مدل ترمومکانیکی

حین فرآیند نورد داغ معمولاً تحولات متالورژیکی و تغییر شکل‌های ناهمگن اتفاق می‌افتند. در یک شرایط پیچیده برای نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به شرایط واقعی نیاز به کوپل^۲ بین پارامترهای مواد، شرایط مرزی و اولیه به عنوان یک مدل ریاضی کاملاً ضروری است. برای طراحی مدل سه‌بعدی شمش و غلتک‌ها، انجام مراحل شبیه‌سازی (اعمال شرایط مرزی و اعمال قیود) و استخراج نتایج از نرم‌افزار شبیه‌سازی محیط کامل آباکوس نسخه ۲۰۲۲ استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار جی مت پرو^۳ متغیرهای استفاده شده در شبیه‌سازی برای فولاد نیترونیك ۵۰ در جدول ۱ و متغیرهای تعریف شده در نرم‌افزار آباکوس در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. ابعاد شمش ضخیم $300 \times 170 \times 170 \text{ mm}$ و شعاع غلتک 500 mm انتخاب شد. جهت شبیه‌سازی از حل گر صریح دینامیکی، حرارتی، جابجایی^۴ استفاده شد. شبیه‌سازی نورد داغ تحت دو شرایط مختلف نورد متداول در دمای 1000°C (شرایط I) و نورد با گرادیان دمایی (شرایط II) با دما در مرکز 1200°C و سطح 1000°C انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دو حوزه تنش و کرنش مؤثر وارد شده بر شمش در جهت مقطع ضخامت مورد بررسی قرار گرفتند. در آزمایش نوع II اثر انتقال حرارت با محیط (25°C) روی توزیع دما در شمش شبیه‌سازی شد. شماتیک غلتک‌ها و نمونه برای هر دو شرایط I و II در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای به دست آوردن دقیق‌ترین نتایج تحلیل، بررسی همگرایی مش امری ضروری می‌باشد. بدین منظور از ریزتر کردن اندازه کلی مش تا جایی که اختلاف دو تنش متوالی از ۱۰٪ کمتر گردد، استفاده شده است. در نهایت بزرگ‌ترین اندازه مش همگرا شده (کمترین تعداد المان) را به عنوان اندازه مناسب مش که کمترین زمان حل را به خود اختصاص می‌دهد، در این پژوهش انتخاب شده است.

جدول ۱ متغیرهای استفاده شده در فرآیند شبیه‌سازی متناسب با دمای تغییر شکل

دما ($^{\circ}\text{C}$)	1000	1050	1100	1150	1200
چگالی (g/cm^3)	7.4	7.38	7.35	7.32	7.3
ضریب هدایت حرارتی ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	27.02	27.69	28.39	29.09	29.78
ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$)	0.68	0.69	0.67	0.68	0.69
ضریب انبساط خطی (10^{-6} K^{-1})	22.16	22.34	22.5	22.66	22.83
ضریب پواسن	0.336	0.338	0.340	0.342	0.344

¹ Complete Abaqus Environment

² Couple

³ JmatPro

⁴ Dynamic, Temp-dis, Explicit

جدول ۲ سایر متغیرهای ورودی به شبیه‌سازی

مقدار	متغیرهای ورودی
1000 (شرایط I)	دمای اولیه شمش (°C)
1200 (شرایط II)	دمای محیط (°C)
25	دمای غلتک‌ها (°C)
100	ضریب همرفتی هوا (kW/m ² °C)
0.015	ضریب انتشار تشعشع سطحی (kW/m ² °C)
0.8	ضریب اصطکاک
0.3	سرعت شمش (mm/sec)
500	سرعت چرخش غلتک (متناسب با سرعت ورودی شمش) (rad/sec)
0.5	

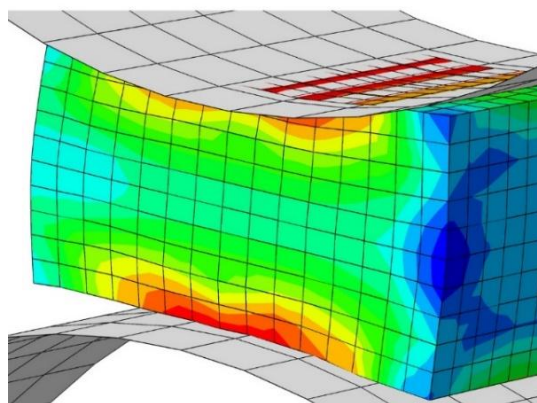
۲-۲-۲ شرایط تجربی

۲-۲-۱-۲ نورد داغ

ترکیب شیمیایی فولاد نیترونیك ۵۰ در جدول ۳ نشان داده شده است. شرایط نورد داغ این آلیاژ دقیقاً متناسب با شرایط شبیه‌سازی انجام شد. بطور خلاصه، در شرایط I شمش بلافاصله پس از خروج از کوره، تحت عملیات نورد قرار گرفت. در شرایط II، نمونه پس از خروج از کوره در معرض انتقال حرارت با هوای محیط قرار گرفته و پس از آن که دمای سطح شمش به ۱۰۰۰°C رسید (اندازه‌گیری با استفاده از ترموکوپل)، عملیات نورد انجام شد. ابعاد تختال نورد شده همانند شرایط شبیه‌سازی و دمای اولیه سطح تختال قبل از فرآیند نورد (۲۰٪ کاهش سطح مقطع) در هر دو نوع آزمایش ۱۰۰۰°C بود. پس از پایان نورد، نمونه‌ها در آب سریع سرد شدند.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ حاضر (فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نیترونیك ۵۰)

عنصر	C	N	Si	Mo	Mn	Ni	Cr	Fe
درصد وزنی	0.06	0.35	0.35	2.4	6.2	12.6	21.1	Bal.



شکل ۱ شماتیک غلتک‌ها و نمونه

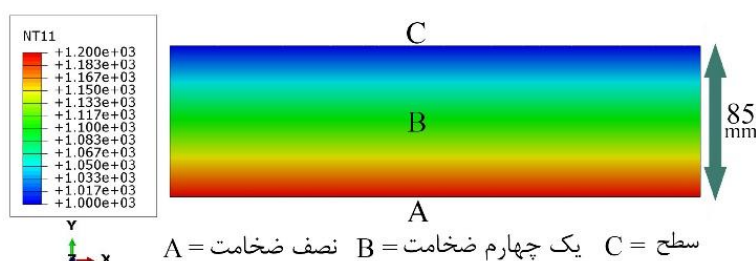
۲-۲-۲- بررسی‌های ریزساختاری

در هر دو آزمایش ریزساختار تختال‌های نورد شده در سطح، یک چهارم ضخامت و نصف ضخامت در جهت نورد بوسیله میکروسکوپ نوری (OM)^۱ بررسی شدند. نمونه‌ها ابتدا پولیش شده و سپس با استفاده از محلول با ترکیب مشخص اسید کلرید-اتانول-اسید نیتریک (45HCl-20Etanol-15HNO₃) حکاکی شدند. برای مشخص کردن میانگین اندازه دانه‌های آستنیت از نرم‌افزار کِلِمِکس^۲ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی میدان‌های تنش و کرنش مؤثر شمش‌های ضخیم نورد شده

شکل ۲ کانتور توزیع دما در شمش برای آزمایش شرایط II را نشان می‌دهد. توزیع دما بصورت گرادیدانی از مرکز شمش تا سطح آن قابل مشاهده است. دما با فاصله از مرکز شمش در جهت ضخامت کاهش یافته است. توزیع دما در شکل ۲ نشان می‌دهد هنگامی که دمای سطح ۱۰۰۰ °C باشد، دمای مرکز شمش همچنان ۱۲۰۰ °C است. مطابق با شکل ۲، ناحیه A مرکز شمش، ناحیه B یک چهارم ضخامت کل شمش و ناحیه C سطح شمش را معرفی می‌کند. در ادامه نواحی یاد شده با حروف A، B و C نمایانگر نواحی معرفی شده فوق هستند.

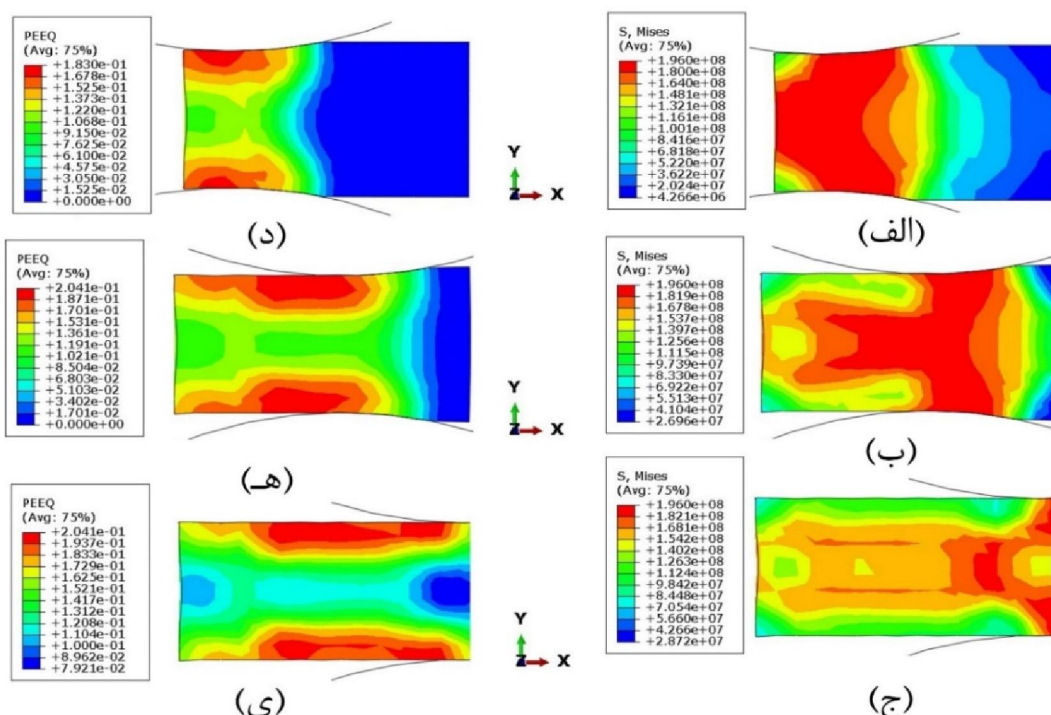


شکل ۲ کانتور توزیع دمایی روی نصف ضخامت شمش (به دلیل تقارن) برای شبیه‌سازی شرایط II

شکل ۳ کانتور توزیع میدان تنش و کرنش مؤثر شمش را برای آزمایش مطابق شرایط I نشان می‌دهد. بررسی‌های صورت گرفته در سه مرحله شروع، میانه و پایان نورد تقسیم‌بندی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مرحله شروع (شکل ۳-الف) توزیع تنش لازم برای تغییر شکل در سطح و مرکز نمونه یکسان می‌باشد. اما مقدار کرنش مؤثر بر شمش در سطح بیشتر است (شکل ۳-د تا ی). با ادامه‌ی نورد توزیع تنش لازم در سطح کمتر شده (شکل ۳-ب) و در مراحل پایانی (شکل ۳-ج)، توزیع تنش لازم برای تغییر شکل در سطح بسیار کمتر از مراحل قبل است. اما تنش در مرکز شمش برای تغییر شکل بسیار بیشتر از سطح آن است. در آزمایش نوع I نیرو در اثر شرایط مرزی از طریق سطح غلتک‌ها به ماده اعمال می‌شود. شرایط معادلات مکانیکی حاکم بر محیط پیوسته ایجاب می‌کند که کرنش در سطح بیشتر از مغز باشد گرچه توزیع تنش ممکن است بر عکس به اعمال شود [۲۱]. بر شمش در سطح بیشتر بوده و با توجه به ثابت بودن دما، نیرو به مرکز شمش کمتر وارد می‌شود. در نتیجه کرنش در سطح بیشتر بوده و در مرکز شمش کرنش کمتر است. با این وجود همچنان در تمام مراحل، کرنش در سطح بیشتر از مرکز آن است. استحکام ماده وابستگی کامل به دما دارد و با افزایش دمای تغییر شکل استحکام کاهش می‌یابد [۲۲-۲۴]. در یک دمای ثابت با افزایش تنش، کرنش بیشتر می‌شود و در دماهای بالاتر با تنش کمتر می‌توان به کرنش‌های بیشتری دست یافت. افزایش کرنش نیروی محرکه لازم برای جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی را تأمین می‌کند. در نواحی با کرنش زیاد، تبلور مجدد بیشتر اتفاق افتاده و میانگین اندازه دانه‌های آستنیت نیز ریزتر از نواحی دیگر می‌باشند [۲۵، ۲۶]. همان‌طور که بیان شد، نورد یک فرآیند ناهمگن است. برای واقعی‌سازی در شبیه‌سازی، نیروهای وارد شده از طرف غلتک بر یک المان مشخص، در هر لحظه از زمان انجام فرآیند می‌تواند متغیر باشد. اما آنچه که مشخص است؛ در آزمایش نوع I با افزایش فاصله از مرکز شمش در جهت ضخامت، کرنش افزایش می‌یابد.

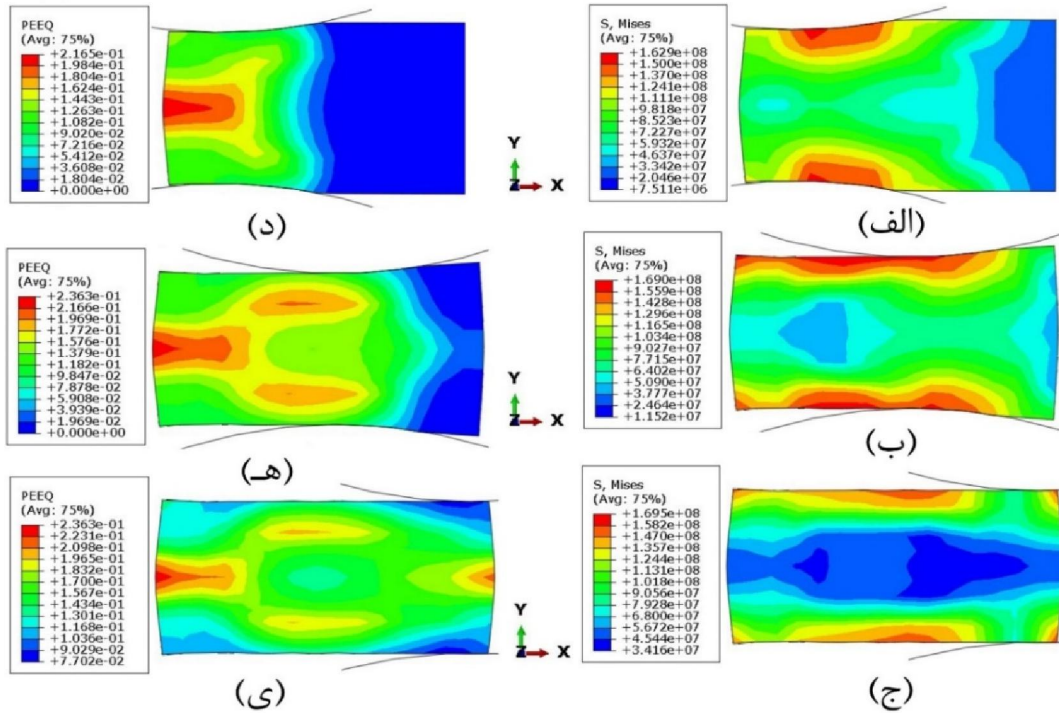
¹ Optical Microscopy

² Clemex

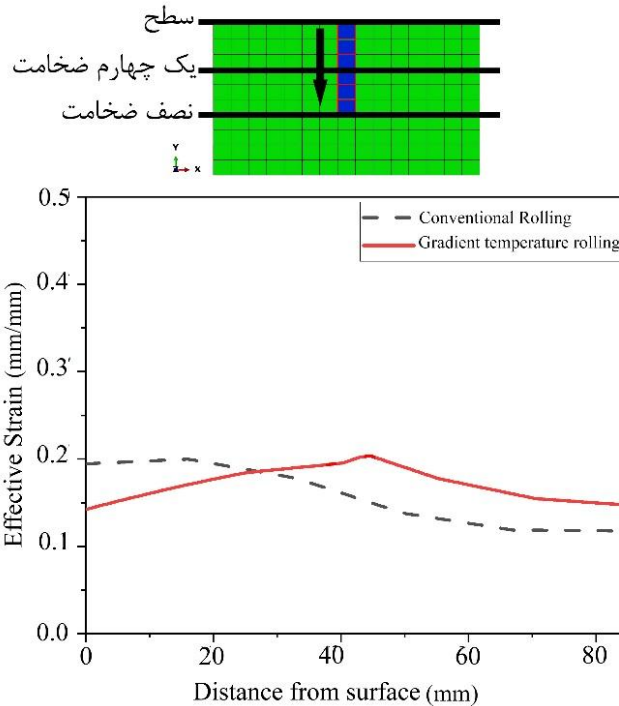


شکل ۳ کانتور توزیع میدان‌های تنش (الف، ب و ج) و کرنش مؤثر (د، ه و ی) برای مراحل شروع (الف و د)، میانی (ب و ه) و انتهای (ج و ی) نورد در شبیه‌سازی شرایط I

شکل ۴ کانتور توزیع میدان تنش و کرنش مؤثر در آزمایش شرایط (II) را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات دمایی بوجود آمده و اثر دمای تغییر شکل روی استحکام ماده، نیروی لازم برای تغییر شکل در مرکز شمش به دلیل دمای بالا نسبت به سطح کمتر است (شکل ۴-الف). براساس مراجع [۲۷، ۱۸، ۷] در دماهای بالا با تنش‌های کمتری می‌توان به کرنش‌های بیشتری دست یافت. همچنین از آن جایی که کرنش نیرو محرکه تبلور مجدد می‌باشد، لذا با افزایش مقدار کرنش، تبلور مجدد سریع‌تر توسعه یافته و نرم‌شدگی رخ می‌دهد. در پایان نورد نواحی نرم‌شده (به واسطه کرنش بیشتر) در مرکز بیشتر از حالت قبل (شکل ۴-ب) است. به عبارت دیگر، با افزایش فاصله از مرکز در جهت ضخامت، تغییر شکل با کرنش‌های کمتری رخ داده است (شکل ۴-ج). در شکل ۴-د تا ی کرنش در نواحی درونی شمش بیشتر از سطح است. شماتیک فاصله از سطح در راستای ضخامت (نصف ضخامت کل شمش) در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در شکل ۵-ب مشاهده شد که با آزمایش در شرایط I بیشترین مقدار کرنش در سطح و کمترین مقدار کرنش در مرکز رخ داده است. اما با آزمایش در شرایط II بیشترین مقدار کرنش در ناحیه B و کمترین مقدار کرنش در ناحیه C (سطح) اتفاق افتاده است. در ناحیه A (مرکز نمونه) کرنش کمتری نسبت به ناحیه B وجود دارد. دلیل آن را می‌توان بصورت زیر بیان نمود: ۱- استحکام ماده در ناحیه B نسبت به مرکز تقریباً برابر است. ۲- نیروی مؤثر وارد شده از غلتک از سطح به مرکز کاهش می‌یابد. لذا نیروی مؤثر وارد شده از سوی غلتک به ناحیه B نسبت به ناحیه A بیشتر خواهد بود. به همین دلیل کرنش در ناحیه B بیش از ناحیه A وارد شده است. همچنین غیرهمگن بودن تغییر شکل، مطابق شکل ۴-د و تأثیر المان‌ها روی المان‌های اطراف خود، می‌توان گفت که ابتدا بیشترین کرنش در ناحیه A رخ داده است و پس از نرم‌شدن و با وارد کردن نیرو بر نواحی اطراف خود باعث افزایش کرنش در مقاطع B شده است (شکل ۴-د تا ی).



شکل ۴ کانتور توزیع میدان‌های تنش (الف، ب و ج) و کرنش مؤثر (د، ه و ی) برای مراحل شروع (الف و د)، میانی (ب و ه) و انتهای (ج و ی) نورد در شبیه‌سازی شرایط II



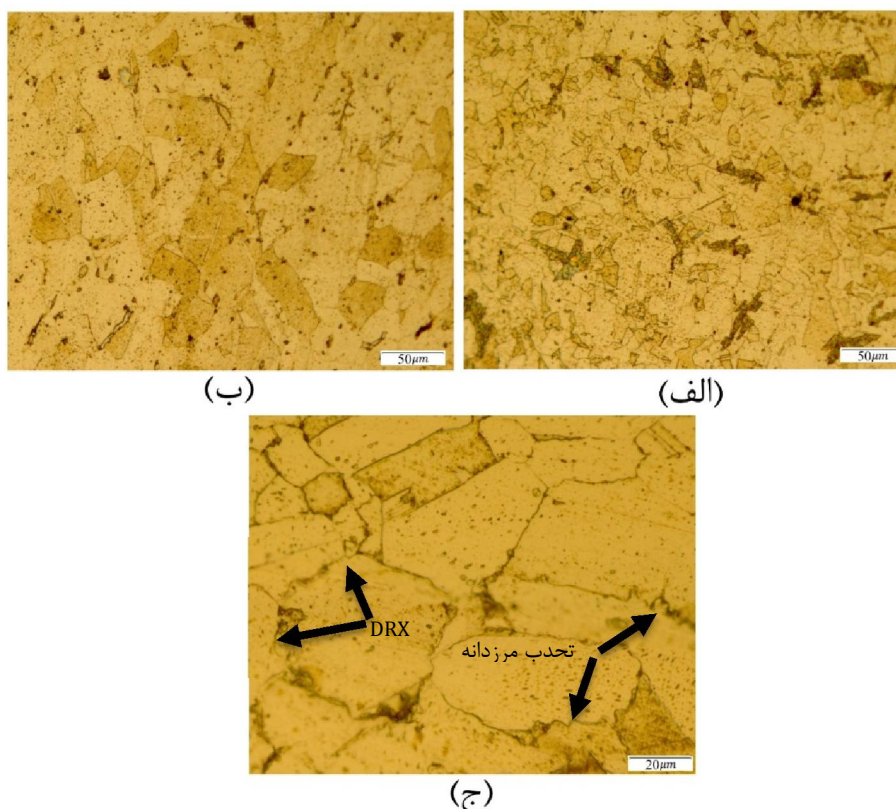
شکل ۵ الف) شماییک فاصله از سطح شمش در جهت ضخامت ب) منحنی‌های کرنش مؤثر برحسب فاصله از سطح برای هر دو شرایط I و II

به‌طور کلی در نورد معمولی به دلیل یکسان بودن استحکام ماده در مرکز و سطح به‌واسطه دمایی یکسان در کل شمش، نیروی کمتری به مرکز وارد شد و در نتیجه کرنش در ناحیه A کمتر از سطح بود. اما در نورد با تغییرات دمایی برخلاف شرایط نورد معمولی، کرنش در مرکز شمش بیشتر از سطح آن تقسیم شد. از آنجایی که افزایش دما منجر به کاهش استحکام می‌شود، لذا هنگامی که دمایی مرکز شمش بیشتر از سطح شمش باشد، مقاومت در برابر تغییر شکل در مرکز شمش نسبت به سطح آن کمتر خواهد بود.

عبارت دیگر، با مقدار نیروی کمتری می‌توان کرنش بیشتری در مرکز شمش ایجاد کرد. کرنش بیشتر منجر به افزایش نیرو محرکه برای جوانه‌زنی دانه‌های جدید تبلور مجدد شده و ریزساختار نهایی را ریز دانه می‌کند [۷، ۱۳]. اما در مقابل افزایش دمای تغییر شکل نیرو محرکه رشد دانه‌های تبلور مجدد می‌باشد [۱۸، ۲۲، ۲۳، ۲۸ و ۲۹]. در نتیجه با استفاده از نیرو محرکه‌های «مقدار کرنش» و «دما» می‌توان تعادل بین میانگین اندازه دانه‌های نهایی شمش‌های ضخیم در سطح و مرکز آن، ایجاد کرد. بنابراین، با استفاده از مباحث فوق، می‌توان بیان نمود که کرنش در مرکز شمش (ناحیه A) بیشتر از سطح آن (ناحیه C) رخ داده است.

۳-۲- بررسی‌های ریزساختاری

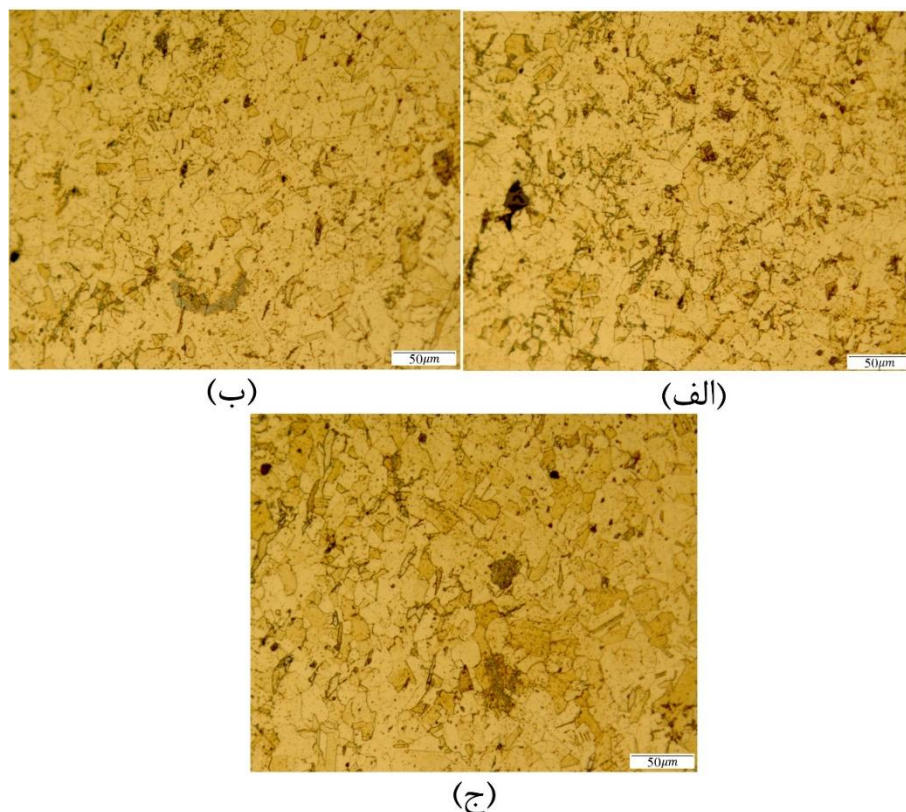
شکل ۶ ریز ساختار نورد معمولی را مطابق شرایط I نشان می‌دهد. در سطح شمش به دلیل کرنش زیاد، ریزساختار شامل دانه‌های ریز تبلور مجدد می‌باشد (شکل ۶-الف). در شکل ۶-ب به دلیل کرنش کمتر در ناحیه B، ریزساختار نسبت به سطح کمتر تبلور مجدد شده و وجود دانه‌های درشت اولیه نشان می‌دهد که تبلور مجدد کامل نشده است. در مرکز شمش (شکل ۶-ج) حضور دانه‌های ریز در مرزهای کشیده شده نشان می‌دهد که تبلور مجدد به تازگی در این ناحیه شروع شده است. به عبارت دیگر، کرنش در مرکز تنها به کرنش بحرانی رسیده است.



شکل ۶ ریزساختار نورد داغ شده شرایط نورد هم دما (I) در مقاطع الف) A (سطح)، ب) B (یک چهارم ضخامت) و ج) C (مرکز شمش)

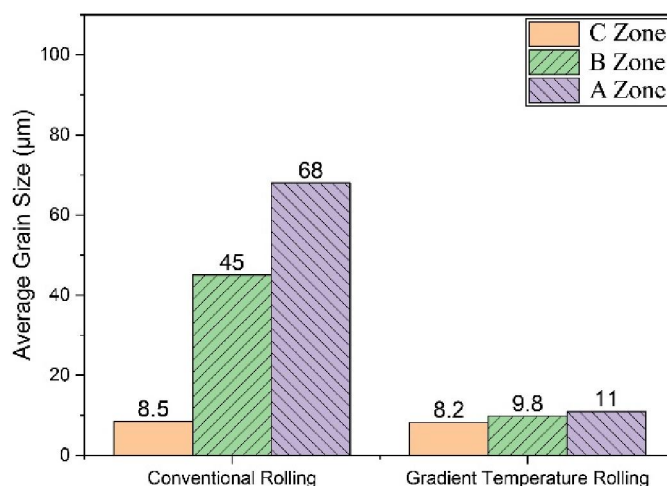
ریزساختار حاصل از نورد با تغییرات دمایی (شرایط II) در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق با مشاهدات ریزساختاری، سطح (شکل ۷-الف) حاوی دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی می‌باشد. شکل ۷-ب ریزساختار ناحیه B شمش را نشان می‌دهد. در این ناحیه وجود دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته، کامل شدن تبلور مجدد را تایید می‌کند. حضور دانه‌های هم محور در مرکز قطعه نشان می‌دهد که تبلور مجدد اتفاق افتاده است. اما به دلیل دمای بالای تغییر شکل در این ناحیه اندکی رشد دانه نسبت به ناحیه B شمش نیز اتفاق افتاده است (شکل ۷-ج). نزدیک بودن میانگین اندازه دانه‌های ریزساختار در مرکز و سطح شمش را می‌توان به ایجاد تعادل بین دما و مقدار تغییر شکل نسبت داد. دمای بالا نیروی لازم برای تغییر شکل را تسهیل کرده (مقاومت کمتر در برابر تغییر شکل) و

سبب کرنش بیشتر با مقادیر نیروی کمتر می‌شود. کرنش بیشتر نیز نیرو محرکه تشکیل دانه‌های جدید تبلور مجدد است. از طرف دیگر افزایش دما رشد دانه‌های تشکیل شده را به دنبال دارد. لذا افزایش کرنش و افزایش دما اثرات یکدیگر روی تحولات ریزساختاری ناشی از تبلور مجدد را که منجر به تعادل بین میانگین اندازه دانه‌ها در سطح و مرکز شمش می‌شوند، به دنبال دارد.



شکل ۷ ریزساختار نورد داغ شده شرایط تغییرات دمایی (II) در مقاطع الف) A (سطح)، ب) B (یک چهارم ضخامت) و ج) C (مرکز شمش)

شکل ۸ میانگین اندازه دانه‌های تبلور مجدد یافته را برای هر دو نوع نورد در ناحیه A (سطح)، B و ناحیه C (مرکز شمش) را نشان می‌دهد. در نورد معمولی (شرایط I) با افزایش فاصله از سطح، میانگین اندازه دانه‌های ریزساختار به دلیل کرنش کمتر، افزایش یافته است. به عبارت دیگر یکنواختی دما منجر می‌شود که استحکام در سطح و مرکز شمش یکسان باشد. به همین دلیل حین نورد تنش لازم برای تغییر شکل در مرکز بالا بوده و تغییر شکل کمتر است. این رفتار باعث می‌شود که کرنش در مرکز کمتر از سطح باشد. در نتیجه تبلور مجدد بصورت جزئی اتفاق می‌افتد. اما در شرایط تغییرات دمایی (شرایط II) با افزایش فاصله از سطح، میانگین اندازه دانه‌های تبلور مجدد در سطح و مرکز تقریباً برابر بوده و اختلاف آن‌ها کمتر از $3\mu\text{m}$ می‌باشد. در حالی که برای نورد معمولی (شرایط I) اختلاف میانگین اندازه دانه‌ها در سطح و مرکز شمش تقریباً $60\mu\text{m}$ است. اختلاف اندک در اندازه دانه‌های تبلور مجدد بین سطح و مرکز شمش تاییدی بر یکنواختی ریزساختار در امتداد ضخامت برای نورد در شرایط II یا همان نورد با تغییرات دمایی است. از آن‌جایی که مقدار کرنش در ناحیه B بیشتر از سطح است، اما همچنان میانگین اندازه دانه‌های آستنیت در سطح کمترین مقدار را دارد. دلیل آن‌را می‌توان به اختلاف دمای نواحی یاد شده نسبت داد. زیرا دما خود نیرو محرکه رشد دانه می‌باشد [۲۶، ۲۸ و ۲۹]. همچنین مقدار کرنش در سطح کمتر از مرکز بوده ولی به دلیل دمای بالاتر مرکز نسبت به سطح، میانگین اندازه دانه تبلور مجدد در مرکز نمونه بیشتر است. از طرف دیگر افزایش کرنش در ناحیه B به دلیل اختلاف اندک استحکام تسلیم در دماهای ناحیه B و A می‌باشد.



شکل ۸ میانگین اندازه دانه‌های آستنیت در شرایط نورد معمولی (I) و نورد با تغییرات دمایی (II) برای سه ناحیه A (مرکز شمش)، B (یک چهارم ضخامت) و C (سطح شمش)

بطور کلی در نورد معمولی به دلیل یکسان بودن استحکام مرکز و سطح شمش (ناشی از یکنواختی توزیع دما) تنش کمتری به مرکز وارد شد. در نتیجه کرنش در مرکز نسبت به سطح کمتر بود. به همین دلیل میانگین اندازه دانه‌های تبلور مجدد در راستای ضخامت شمش یکنواخت نبود. نورد با تغییرات دمایی به دلیل اختلاف دما در سطح و مرکز شمش منجر به کاهش استحکام در مرکز شد که نتیجه آن کاهش تنش لازم برای کرنش‌های بیشتر در مرکز شمش بود. دمای بالا و کرنش بیشتر باعث افزایش کسر تبلور مجدد شد. کرنش و دمای تغییر شکل تعادل بین میانگین اندازه دانه‌های تبلور مجدد را برای سطح و مرکز شمش فراهم کرد. لذا بر اساس نتایج شبیه سازی و بررسی‌های ریزساختاری، فرآیند نورد با تغییرات دمایی منجر به یکنواختی ریزساختار در طول ضخامت شمش نسبت به نورد معمولی شد.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثر تغییرات دمایی روی تحولات ریزساختاری (بر اساس توزیع تنش و کرنش مؤثر) شمش ضخیم فولاد زنگ-نزن آستنیتی نیترونیکی ۵۰ حین نورد داغ به کمک نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای نورد معمولی (شرایط I) نشان داد که کرنش مؤثر در سطح نسبت به مرکز نمونه بیشتر است؛ در حالی که برای نورد با تغییرات دمایی (شرایط II)، کرنش مؤثر در مرکز بیشتر از سطح شمش بود.
- ۲- بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که ریزساختار سطح شمش تحت نورد معمولی کاملاً تبلور مجدد شده در حالی که وجود دانه‌های مادر با تحذب مرزدانه در مرکز شمش نشان از وقوع تبلور مجدد به میزان بسیار کم و شروع جوانه‌زنی تبلور مجدد است.
- ۳- در این مطالعه مشخص شد که نورد با تغییرات دمایی یکی از راه‌های مناسب جهت یکنواخت شدن ریزساختار در سطح و مرکز تختال‌های سنگین (با ضخامت بالا) است.
- ۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی (توزیع تنش و کرنش مؤثر) نشان داد که نرم‌افزار آباکوس بر پایه المان محدود می‌تواند یک راه مناسب جهت پیش‌بینی رفتار نورد داغ تختال‌های سنگین باشد.

References

- [1] Chen X, Cai Q, Xie B, Yun Y, Zhou Z. Simulation of Microstructure Evolution in Ultra-Heavy Plates Rolling Process Based on Abaqus Secondary Development. *steel research international*. 2018 Dec;89(12):1800409. doi: 10.1002/srin.201800409
- [2] Gaosheng L, Wei Y, Qingwu C, He Z. Effect of gradient temperature rolling (GTR) and cooling on microstructure and properties of E40-grade heavy plate. *Archives of civil and mechanical engineering*. 2017 Mar; 17:121-31. doi: 10.1016/j.acme.2016.09.004

- [3] Hu J, Du LX, Xie H, Gao XH, Misra RD. Microstructure and mechanical properties of TMCP heavy plate microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Jun 23; 607:122-31. doi: [10.1016/j.msea.2014.03.133](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.133)
- [4] Ding J, Zhao Z, Jiao Z, Wang J. Central infiltrated performance of deformation in ultra-heavy plate rolling with large deformation resistance gradient. *Applied Thermal Engineering*. 2016 Apr 5; 98:29-38. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2015.12.021](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.021)
- [5] Fu H, Xu B, Xiao J, Li S, Kang T. Finite element simulation of deformation behavior of prefabricated holes in ultra-heavy plates by gradient temperature rolling. *Metalurgija*. 2020 Apr 1;59(2):175-8. doi: [10.1016/hrca.hr.2020.2.457](https://doi.org/10.1016/hrca.hr.2020.2.457)
- [6] Li H, Gong M, Li T, Wang Z, Wang G. Effects of hot-core heavy reduction rolling during continuous casting on microstructures and mechanical properties of hot-rolled plates. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020 Sep 1; 283:116708. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2020.116708](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116708)
- [7] Gao ZH, Yu W, Chen X, Xie BS, Cai QW. Effect of gradient temperature rolling process on promoting crack healing in Q500 heavy plates. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020 Mar; 27:354-61. doi.org/10.1007/s12613-019-1855-0. doi: [10.1007/s12613-019-1855-0](https://doi.org/10.1007/s12613-019-1855-0)
- [8] Liu J, Wang X, Liu J, Liu Y, Li H, Wang C. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of Cu-3Ti-3Ni-0.5 Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019 Apr 25; 782:224-34. doi: [10.1016/j.jallcom.2018.12.212](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.212)
- [9] Li C, Huang L, Zhao M, Zhang X, Li J, Li P. Influence of hot deformation on dynamic recrystallization behavior of 300M steel: Rules and modeling. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Oct 21; 797:139925. doi: [10.1016/j.msea.2020.139925](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139925)
- [10] Wen W, Guoping L, Chongxun W, Jie Z, Jianxin Z, Yajun Y, Xu S, Xiaoyuan J. Development and application of cast steel numerical simulation system for heat treatment. *International Journal of Metalcasting*. 2019 Jul 15; 13:618-26. doi: [10.1007/s40962-019-00305-4](https://doi.org/10.1007/s40962-019-00305-4)
- [11] Lopez-Garcia RD, Garcia-Pastor FA, Castro-Roman MJ, Alfaro-Lopez E, Acosta-Gonzalez FA. Effect of immersion routes on the quenching distortion of a long steel component using a finite element model. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016 Nov;69(9):1645-56. doi: [10.1007/s12666-015-0738-y](https://doi.org/10.1007/s12666-015-0738-y)
- [12] Yaakoubi M, Kchaou M, Dammak F. Simulation of the thermomechanical and metallurgical behavior of steels by using ABAQUS software. *Computational materials science*. 2013 Feb 1; 68:297-306. doi: [10.1016/j.commatsci.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.10.001)
- [13] Xie BS, Cai QW, Yun Y, Li GS, Ning Z. Development of high strength ultra-heavy plate processed with gradient temperature rolling, intercritical quenching and tempering. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Jan 5; 680:454-68. doi: [10.1016/j.msea.2016.10.119](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.119)
- [14] Ansari MA, Samanta A, Behnagh RA, Ding H. An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Apr 6; 101:1495-508. doi: [10.1007/s00170-018-3000-z](https://doi.org/10.1007/s00170-018-3000-z)
- [15] Brunbauer S, Winter G, Antretter T, Staron P, Ecker W. Residual stress and microstructure evolution in steel tubes for different cooling conditions—Simulation and verification. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Feb 18; 747:73-9. doi: [10.1016/j.msea.2019.01.037](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.037)
- [16] Han F, Roters F, Raabe D. Microstructure-based multiscale modeling of large strain plastic deformation by coupling a full-field crystal plasticity-spectral solver with an implicit finite element solver. *International Journal of Plasticity*. 2020 Feb 1; 125:97-117. doi: [10.1016/j.ijplas.2019.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.09.004)
- [17] Knezevic M, Kalidindi SR. Crystal plasticity modeling of microstructure evolution and mechanical fields during processing of metals using spectral databases. *JOM*. 2017 May;69(5):830-8. doi: [10.1007/s11837-017-2289-7](https://doi.org/10.1007/s11837-017-2289-7)
- [18] Shou-yuan B, Xin Z, Sheng-li L, Lin Z, Wei-juan L, Ling Y. Numerical simulation, microstructure, properties of EH40 ultra-heavy plate under gradient temperature rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2020 Jul 22; 791:139778. doi: [10.1016/j.msea.2020.139778](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139778)
- [19] Guo WG, Nemat-Nasser S. Flow stress of Nitronic-50 stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures. *Mechanics of Materials*. 2006 Nov 1;38(11):1090-103. doi: [10.1016/j.mechmat.2006.01.004](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.01.004)
- [20] Ghasemi A, Abbasi SM, Akhondzadeh A. The prediction microstructural evolution and behavior austenitic stainless steel Nitronic 50 during hot rolling. 9th International Conference & Exhibition on Materials Science & Metallurgical Engineering (iMat): 2020 Nov 10; (in persian).
- [21] Dieter GE, Bacon D. *Mechanical metallurgy*. New York: McGraw-hill; 1976 Dec. doi: [30977829/3393](https://doi.org/30977829/3393)
- [22] Babu KA, Mandal S, Athreya CN, Shakthipriya B, Sarma VS. Hot deformation characteristics and processing map of a phosphorous modified super austenitic stainless steel. *Materials & Design*. 2017 Feb 5; 115:262-75. doi: [10.1016/j.matdes.2016.11.054](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.054)
- [23] Samantaray D, Mandal S, Jayalakshmi M, Athreya CN, Bhaduri AK, Sarma VS. New insights into the relationship between dynamic softening phenomena and efficiency of hot working domains of a nitrogen

- enhanced 316L (N) stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Mar 26; 598:368-75. doi: [10.1016/j.msea.2013.12.105](https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.105)
- [24] Yanushkevich Z, Lugovskaya A, Belyakov A, Kaibyshev R. Deformation microstructures and tensile properties of an austenitic stainless steel subjected to multiple warm rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Jun 14; 667:279-85. doi: [10.1016/j.msea.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.008)
- [25] Zhang J, Di H, Wang X. Flow softening of 253 MA austenitic stainless steel during hot compression at higher strain rates. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Jan 5; 650:483-91. doi: [10.1016/j.msea.2015.10.084](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.084)
- [26] Zhang JS, Xia YF, Quan GZ, Wang X, Zhou J. Thermal and microstructural softening behaviors during dynamic recrystallization in 3Cr20Ni10W2 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018 Apr 30; 743:464-78. doi: [10.1016/j.jallcom.2018.01.399](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.399)
- [27] Liu YX, Lin YC, Zhou Y. 2D cellular automaton simulation of hot deformation behavior in a Ni-based superalloy under varying thermal-mechanical conditions. *Materials Science and Engineering: A*. 2017 Apr 13; 691:88-99. doi: [10.1016/j.msea.2017.03.039](https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.039)
- [28] Radionova LV, Perevozchikov DV, Makoveckii AN, Eremin VN, Akhmedyanov AM, Rushchits SV. Study on the Hot Deformation Behavior of Stainless Steel AISI 321. *Materials*. 2022 Jun 7;15(12):4057. doi: [10.3390/ma15124057](https://doi.org/10.3390/ma15124057)
- [29] Odnobokova MV, Belyakov AN, Dolzhenko PD, Kostina MV, Kaibyshev RO. On the strengthening mechanisms of high nitrogen austenitic stainless steels. *Materials Letters*. 2023 Jan 15; 331:133502. doi: [10.1016/j.matlet.2022.133502](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133502)