

## تأثیر میزان نورد سرد بر تشکیل آستنیت در فولاد کم کربن تاب کاری شده در ناحیه میان بحرانی\*

میمنت سادات محسن زاده<sup>(۱)</sup> محمد مزینانی<sup>(۲)</sup>

## چکیده

به دلیل این که تاب کاری میان بحرانی یکی از مراحل عمده تولید فولاد دوفازی به شمار می رود، مطالعه تشکیل آستنیت در این فولادها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، تأثیر میزان نورد سرد اولیه و دمای تاب کاری بر تشکیل آستنیت در فولاد ساده کم کربن مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ورق های فولادی به میزان های متفاوتی نورد سرد شدند و در دماهای مختلف تحت عملیات تاب کاری میان بحرانی قرار گرفتند و سپس، در محلول آب نمک و یخ سریع سرد شدند. برای بررسی روند گسترش ریزساختار و نیز، تعیین تأثیر عوامل مختلف بر جوانه زنی و رشد آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق)، نمونه ها در طول عملیات تاب کاری در بازه های زمانی مشخصی سریع سرد شدند و برای بررسی های ریزساختاری، مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان دادند که انجام نورد سرد و فرایندهای دیگری که افزون بر تشکیل آستنیت، حین مراحل مختلف هنگام گرمایش نمونه تا دمای استحاله، اتفاق می افتند، می توانند به میزان زیادی ریزساختار اولیه و در نتیجه، نحوه جوانه زنی و رشد آستنیت را تحت تأثیر قرار دهند. در ریزساختار فولادهای نورد نشده و نورد شده به میزان ۵۰ درصد، آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق) در محل توده های پرلیت تشکیل شد، اما در ریزساختار فولاد نورد شده به میزان ۷۰ درصد، کروی شدن لایه های سمیتیت باعث شد تا آستنیت از ریزساختاری شامل ذرات سمیتیت در زمینه فریتی تشکیل شود. در این حالت، جوانه زنی و رشد آستنیت به طور عمده در مرز دانه های فریت زمینه صورت گرفت. افزون بر این، مشخص شد که دمای تاب کاری میان بحرانی تأثیر قابل ملاحظه ای بر سینتیک تشکیل آستنیت دارد. سینتیک تشکیل آستنیت با استفاده از روش JMAK (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov) مدل سازی شد. بر اساس نتایج مدل سازی مشخص شد که تغییر ریزساختار فولاد بوسیله ای انجام نورد سرد تأثیر قابل ملاحظه ای بر سرعت تشکیل آستنیت در طول تاب کاری میان بحرانی دارد.

واژه های کلیدی فولاد دوفازی، تشکیل آستنیت، نورد سرد، تاب کاری میان بحرانی، گسترش ریزساختار.

### Influence of Cold Rolling on Austenite Formation in Plain Low-Carbon Steel Annealed in Intercritical Region

M.S. Mohsenzadeh

M. Mazinani

## Abstract

Since intercritical annealing is the main processing stage for the production of dual-phase steels (DPS), studies on the formation of austenite are of great importance. In this research, the effects of the cold rolling and intercritical annealing temperature on the formation of austenite in plain low carbon steel have been investigated. For this purpose, the steel sheets were cold rolled for different amounts of reductions and annealed at different intercritical temperatures followed by quenching into an ice brine solution. In order to investigate the microstructural evolution as well as the effect of controlling parameters on the nucleation and growth processes of austenite (martensite at room temperature) formation, the samples were quenched at various time intervals during intercritical annealing and their microstructures were analyzed using optical and scanning electron microscopes. The results showed that cold rolling and other processes occurring during the formation of austenite significantly influences the initial microstructure and the nucleation and growth of austenite phase. In un-deformed and 50% cold rolled specimens, austenite formed from the pre-existing pearlite colonies. However, in the 70 cold rolled specimens, cementite spheroidization within the deformed pearlite colonies caused austenite to be formed from a microstructure consisting of cementite particles embedded in a matrix of ferrite. In this situation, nucleation and growth of austenite phase took place mainly on the grain boundaries of ferrite matrix. Furthermore, it was found that the temperature of intercritical annealing treatment has a strong effect on the kinetics of austenite formation.

**Key words** Dual-Phase Steel, Austenite Formation, Cold Rolling, Intercritical Annealing, Microstructure Evolution.

\*نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۳/۵/۱۸ نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۴/۸/۱۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکترا، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. Email: Mazinani@ferdowsi.um.ac.ir

## مقدمه

لزوم کاهش وزن خودرو و در نتیجه آن، کاهش مصرف سوخت منجر به استفاده گسترده از فولادهای دوفازی (DPS) در صنایع خودروسازی شده است. شکل‌پذیری بهتر و نسبت بالاتر استحکام کششی به تسلیم فولادهای دوفازی در مقایسه با فولادهای کم‌آلیاژ استحکام بالا (HSLA)، امکان تولید قطعات فولادی با شکل‌های پیچیده‌تر با استفاده از ورق‌های نازک‌تر را فراهم کرده است. فولادهای دوفازی با ریزساختاری شامل زمینه نرم فریتی و ۱۰ تا ۳۰ درصد حجمی فاز سخت مارتنزیت، خواص مشخصه‌ای نظیر نسبت بالای استحکام کششی به تسلیم، نرخ بالای کارسختی و انعطاف‌پذیری مناسب را دارا هستند.

فولادهای دوفازی به‌روشن صنعتی معمولاً به دو شیوه تولید می‌شوند: ۱) تاب‌کاری میان‌بحرانی (دما ثابت) فولاد نورد سرد شده که معمولاً با فرایند گالوانیزه کردن همراه است، ۲) سرد کردن سریع فولاد در ادامه فرایند نورد داغ. نظر به این‌که تاب‌کاری میان‌بحرانی یکی از مراحل عمده تولید فولاد دوفازی به‌شمار می‌رود، با گسترش این نوع فولادها، مطالعه تشکیل فاز آستنیت در این عملیات حرارتی بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. در حقیقت، وضعیت آستنیت تشکیل شده در دمای میان‌بحرانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در گسترش ریزساختار نهایی فولاد دوفازی و در نتیجه، خواص مکانیکی آن خواهد داشت، چرا که فاز مارتنزیت تشکیل شده تقریباً دارای ترکیب و مورفولوژی فاز آستنیت می‌باشد. تاکنون تشکیل آستنیت از ریزساختارهای مختلفی شامل فریت-پرلیت در حالت نورد سرد و داغ شده [۱-۶]، فریت-کاربید کروی [۷، ۸]، و فریت-مارتنزیت [۹، ۱۰]، مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر متغیرهای فرایند تاب‌کاری میان‌بحرانی نیز بر تشکیل فاز آستنیت مطالعه شده است. در ساختار فریت-پرلیتی، جوانه‌زنی آستنیت درون توده‌های پرلیت، فصل مشترک توده‌های پرلیت با دانه‌های فریت و نیز، ذرات سمیتیت موجود در مرز دانه فریت انجام می‌شود. افزون بر این، نشان

داده شده است که جوانه‌زنی فاز آستنیت در مرز دانه فریت، بدون وجود ذرات کاربرد نیز می‌تواند صورت گیرد [۱۱]. در این حالت، کربن مورد نیاز برای رشد آستنیت به‌وسیله دانه‌های آستنیت شکل گرفته در توده‌های پرلیت تأمین می‌شود [۱۲]. اسپک و همکاران [۱]، با بررسی ساختارهای فریت-پرلیتی در فولادهای با ۰/۲-۰/۶ درصد وزنی کربن و ۱/۵ درصد وزنی منگنز، سه مرحله عمده را در تشکیل فاز آستنیت مشاهده کرده‌اند:

۱. رشد سریع آستنیت در پرلیت تا انحلال کامل پرلیت.
۲. رشد آهسته آستنیت در فریت که به‌طور عمده به‌وسیله نفوذ کربن در آستنیت کنترل می‌شود.
۳. تعادل نهایی که به‌وسیله نفوذ منگنز در آستنیت کنترل می‌شود.

وضعیت برای فولادهای فریت-پرلیتی نورد سرد شده متفاوت است. به‌دلیل انجام کار سرد، تبلور مجدد فریت و کروی شدن سمیتیت لایه‌ای در پرلیت تغییر شکل یافته، فرایندهایی هستند که افزون بر تشکیل آستنیت اتفاق می‌افتند. میزان هم‌پوشانی وقوع این فرایندها، به‌وسیله نرخ گرمایش تا دمای تاب‌کاری و ترکیب فولاد تعیین می‌شود [۴، ۳].

تاکنون مطالعات محدودی در زمینه تأثیر میزان نورد سرد اولیه بر تشکیل آستنیت در طول عملیات تاب‌کاری میان‌بحرانی انجام شده است [۱۴، ۱۳، ۳]. یانگ و همکاران [۳]، اثر نورد سرد را بر سینتیک تشکیل آستنیت و مورفولوژی آن بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیقات، مشخص شده است که تبلور مجدد فریت تغییر شکل یافته و کروی شدن سمیتیت لایه‌ای که قبل از تشکیل آستنیت رخ می‌دهند، توزیع دانه‌های آستنیت را تغییر می‌دهند. آستنیت ابتدا در ذرات سمیتیت کروی شده موجود در مرز دانه‌های فریت تبلور مجدد نیافته شکل می‌گیرد و پس از آن، بر روی ذرات سمیتیت موجود درون زمینه فریت تبلور مجدد یافته تشکیل می‌شود. افزون بر این، گزارش شده است که تغییر شکل سرد منجر به تسریع استحاله فریت به آستنیت می‌شود [۱۴]. نظر به این‌که تغییر ریزساختار اولیه فولاد به

تا ۱۰ دقیقه، تابکاری میان‌بحرانی شدند. نمونه‌ها در مرحله بعد، در محلول آب نمک و یخ سریع سرد شدند. برای بررسی روند گسترش ریزساختار در هر دما و میزان نورد سرد اولیه مشخص و نیز، تعیین تأثیر عوامل مختلف بر جوانه‌زنی و رشد فاز آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق)، بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های تابکاری شده با میکروسکپ‌های نوری و الکترونی روبشی انجام گرفت. ریزساختار نمونه‌ها در جهت نورد بررسی شد. طرح‌واره‌ای از مقطع مورد مطالعه از نمونه‌ها، در شکل (۱) نمایش داده شده است. برای انجام بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکپ نوری، نمونه‌ها ابتدا مانت شدند و پس از انجام مراحل سناده‌زنی و پولیش‌کاری، به وسیله محلولی شامل ۱۰ گرم نمک متابای سولفات سدیم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و محلول نایتال ۲ درصد (۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک در ۱۰۰ میلی‌لیتر الکل)، حکاکی شدند. مطابق با اطلاعات موجود در مراجع (به عنوان مثال به مرجع [۱۵] مراجعه شود)، جزایر مارتنزیت درون زمینه فریتی با استفاده از محلول آبی متابای سولفات سدیم کاملاً قابل مشاهده‌اند، بدون این‌که مرزهای فریت تحت تأثیر قرار گیرند. محلول نایتال علاوه بر آشکار کردن جزایر مارتنزیتی، مرز دانه‌های فریت را نیز مشخص می‌کند. افزون بر این، نمونه‌ها قبل از بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکپ الکترونی روبشی، با محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شدند، متالوگرافی کمی، با استفاده از نرم افزار کلمکس برای حداقل ۱۰ تصویر از هر ریزساختار انجام شد.

وسيلة انجام نورد سرد و فرایندهای دیگری که افزون بر تشکیل آستنیت، در طول گرمایش حین تابکاری میان‌بحرانی اتفاق می‌افتند، می‌تواند به میزان زیادی بر سینتیک تشکیل آستنیت و نحوه جوانه‌زنی و رشد آن و در نتیجه، ریزساختار نهایی و خواص مکانیکی فولاد دوفازی اثرگذار باشد، مطالعه تأثیر میزان نورد سرد بر تشکیل فاز آستنیت در طول عملیات تابکاری میان‌بحرانی و ریزساختار نهایی فولاد ضروری به نظر می‌رسد.

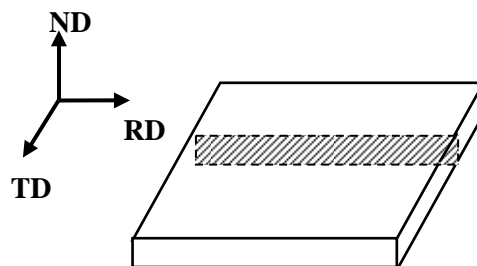
در این تحقیق، تأثیر میزان نورد سرد اولیه و دمای تابکاری میان‌بحرانی بر روند گسترش ریزساختار در طول تابکاری میان‌بحرانی و ریزساختار نهایی فولاد مطالعه شده است.

### مواد و روش‌های آزمایش

در این مطالعه، فولاد کم کربن St52، که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) آورده شده است، به صورت ورقی با ضخامت ۴/۶ میلی‌متر به کار رفت. این ورق فولادی، ابتدا در دمای ۹۲۵ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۳۰ دقیقه نرماله شد. اندازه دانه فریت در فولاد St52 تقریباً ۱۰/۳ میکرومتر بود. کسرهای حجمی فریت و پرلیت در فولاد به ترتیب ۷۴ و ۲۶ درصد اندازه‌گیری شد. به منظور سهولت در انجام نورد سرد، نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰۰×۲۰ میلی‌متر از ورق فولادی بریده شدند و سپس، به وسیله دستگاه نورد با غلطک‌هایی به قطر ۱۸ سانتی‌متر و سرعت ۴۰ دور در دقیقه، به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد نورد شدند. قطعاتی به ابعاد ۲۰×۲۰ میلی‌متر از هر نمونه بریده شدند و در دماهای ۷۴ و ۷۸۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان‌های مختلف در محدوده ۳۰ ثانیه

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد St52 بر حسب درصد وزنی

|      |           |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| عنصر | Fe        | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr    | Ni    |
| wt%  | باقیمانده | ۰/۱۶۵ | ۰/۴۱۱ | ۱/۱۵  | ۰/۰۱۸ | ۰/۰۱  | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۶۶ |
| عنصر | Mo        | Al    | Cu    | Co    | Ti    | Nb    | V     | W     |
| wt%  | ۰/۰۰۸     | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۶۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۲۸ |



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از مقطع مورد بررسی از نمونه فولادی نورد سرد شده (مقطع هاشور زده شده)

گذشت ۶۰ ثانیه، دانه‌های فریت تبلور مجدد یافته در ریزساختار قابل مشاهده‌اند (شکل ۴). در این مرحله، ۷۰ درصد از دانه‌ها تبلور مجدد یافته‌اند. با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی از این فولاد، ملاحظه می‌شود که مرفولوژی توده‌های پرلیت دچار تغییر شده است. بر اساس نتایج مطالعات قبلی، [۶، ۱۶]، احتمال می‌رود که در زمان ۶۰ ثانیه، لایه‌های سمیتیت درون توده‌های پرلیت شروع به کروی شدن کرده باشند. رادنیکی و همکاران [۱۶]، یک فولاد نورد سرد شده را تحت گرمایش پیوسته تا دمای ۸۴۰ درجه سانتیگراد قرار داده‌اند. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های کوئنچ شده از دماهای مختلف در این تحقیق، نشان داده است که قبل از تشکیل آستنیت، مرفولوژی پرلیت تغییر می‌کند. افزون بر این، کروی شدن لایه‌های سمیتیت در طول گرمایش پیوسته فولاد نورد سرد شده با نرخ گرمایش ۱ درجه بر ثانیه نیز گزارش شده است [۶]. دلیل وقوع این پدیده، اصلاح مرفولوژی لایه‌های سمیتیت به وسیله انجام نورد سرد بیان شده است. سینتیک کروی شدن لایه‌های سمیتیت به‌طور عمده به وسیله نفوذ اتم‌های کربن کنترل می‌شود. کروی شدن لایه‌های سمیتیت در توده‌های پرلیت می‌تواند در چند مرحله قطعه قطعه شدن کاربرد، گرد شدن لبه‌های تیز قطعات و سپس، رشد آن‌ها رخ داده باشد. این مراحل می‌توانند به صورت هم‌زمان پیش بروند. قطعه قطعه شدن و خمیدگی لایه‌های سمیتیت و نیز، حضور عیب‌های بلوری مانند جاهای خالی و نابجایی‌ها درون

### نتایج و بحث

#### بررسی روند گسترش ریزساختار در طول تاب‌کاری میان‌بحرانی

نتایج بررسی‌های ریزساختاری در مورد نمونه‌های فولاد St52 که به میزان ۷۰ درصد نورد شده و در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد تاب‌کاری شده‌اند، در این بخش شرح داده می‌شود. به منظور بررسی روند گسترش ریزساختار و تشکیل فاز آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق)، نمونه‌ها در طول عملیات تاب‌کاری در بازه‌های زمانی مشخصی سریع سرد شدند و برای انجام بررسی‌های ریزساختاری استفاده شدند.

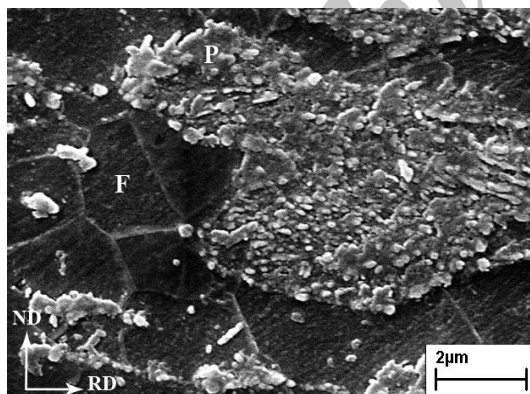
شکل (۲- الف و ب)، به ترتیب ریزساختارهای اولیه و نورد شده فولاد را نشان می‌دهد. در این ریزساختارها، فریت و پرلیت با دو رنگ متفاوت از یکدیگر قابل تمایزند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، زمینه ریزساختار فاز فریت می‌باشد که به صورت فاز روشن‌تر قابل تشخیص است. جزایر مشاهده شده در این تصویر با سطوح تیره‌تر، پرلیت می‌باشند. تغییر شکل قابل ملاحظه و توأمان فریت و پرلیت و جهت‌گیری آن‌ها در راستای نورد، به وضوح در تصویر (۲- ب) قابل مشاهده است. ریزساختار فولاد پس از گذشت ۳۰ ثانیه نگره‌داری در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد، در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به آنچه در این تصویر دیده می‌شود، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ریزساختار ایجاد نشده است و تبلور مجدد فریت نیز شروع و یا تکمیل نشده است. پس از



شکل ۳ تصویر میکروسکپ نوری از ریزساختار نمونه ۷۰ درصد نورد شده و تاب کاری شده در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ ثانیه (عدم وقوع تبلور مجدد)



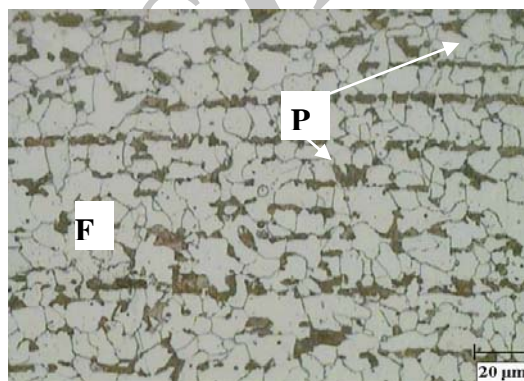
(الف)



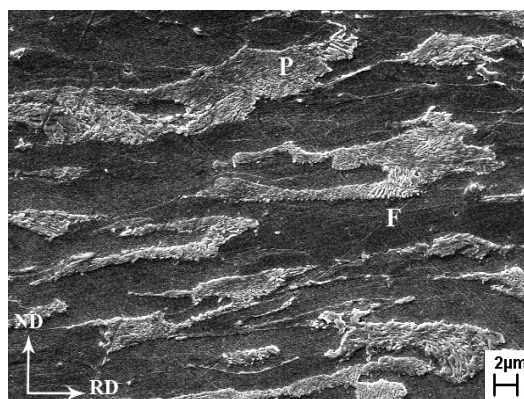
(ب)

شکل ۴ ریزساختار نمونه ۷۰ درصد نورد شده و تاب کاری شده در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ دقیقه (وقوع ۷۰ درصد تبلور مجدد)، (الف) تصویر میکروسکپ نوری، (ب) تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی

دانه‌های فریت (تغییر شکل یافته حین نورد سرد) و فصل مشترک فریت-سمنتیت به عنوان مسیرهای نفوذ سریع، فرایند کروی شدن را تسریع می‌کند. بنابراین، احتمال مشاهده این فرایند در نمونه‌های نورد سرد شده زیاد است. در نرخ‌های گرمایش پایین (مانند ۱ درجه بر ثانیه)، زمان کافی برای کروی شدن لایه‌های سمنتیت به صورت تقریباً کامل قبل از تشکیل آستنیت، وجود دارد. ذرات سمنتیت حتی می‌توانند در طول گرمایش درشت شوند، اما در نرخ‌های گرمایش بالا، لایه‌های سمنتیت به صورت قطعه قطعه شده باقی می‌مانند [۶].



(الف)



(ب)

شکل ۲ تصویر میکروسکپ نوری از ریزساختار فولاد نرماله شده (الف) و تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از فولاد نورد سرد شده به میزان ۷۰ درصد (ب)، شامل فاز فریت زمینه و توده‌های پرلیت. (P: پرلیت، F: فریت)

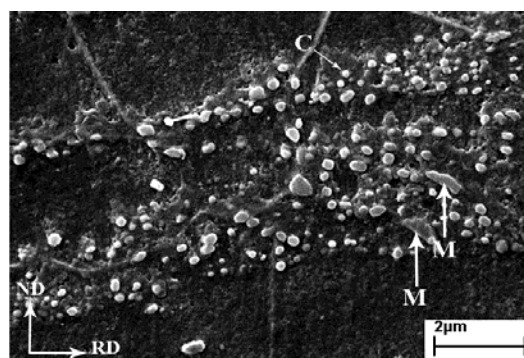


ریزساختار فولاد در این شرایط دارای اندازه دوگانه فاز/فازهای استحکام‌بخش است. در تصویرهای شکل (۶-ب) ملاحظه می‌شود که جزایر آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق)، به‌طور عمده در مرز دانه‌های فریت تشکیل شده‌اند. براساس تصاویر میکروسکوپی نمونه در زمان ۲ دقیقه، می‌توان گفت که جوانه‌زنی و رشد آستنیت از ریزساختار فریت-سمنتیت کروی اتفاق افتاده است. مشاهدات تجربی مشخص کرده‌اند که در این حالت، آستنیت در فصل مشترک فریت و ذرات سمنتیت واقع در مرز دانه‌های فریت جوانه‌زنی می‌کند و سپس به‌گونه‌ای رشد می‌کند که نزدیک‌ترین ذرات سمنتیت که در آن‌ها جوانه زنی آستنیت اتفاق نیفتاده است را در بر می‌گیرد [۲]. در ادامه، انحلال فاز سمنتیت درون زمینه فریت، به‌ازای رشد جزایر آستنیت در راستای مرز دانه صورت خواهد گرفت. بر اساس تحقیقات انجام شده، انحلال کامل ذرات سمنتیت در ریزساختار، پس از تشکیل آستنیت اتفاق می‌افتد [۸]. بررسی ریزساختاری یک فولاد نورد سرد شده در طول گرمایش پیوسته با نرخ ۱ درجه بر ثانیه، مشخص کرده است که ذرات سمنتیت کروی حتی در زمان تکمیل استحاله پرلیت به آستنیت در ریزساختار وجود دارند و حضور ذرات سمنتیت درون جزایر مارتنزیت (آستنیت در دمای بالا) نیز گزارش شده است. انحلال کامل ذرات سمنتیت، در مرحله تبدیل فریت به آستنیت اتفاق می‌افتد و در این مرحله، هیچ ذره‌ای درون فریت یا آستنیت قابل مشاهده نمی‌باشد [۶]. بنابراین، می‌توان گفت که در تحقیق حاضر، وجود ذرات سمنتیت در ریزساختار باعث شده است که توزیع دوگانه‌ای در اندازه‌ای فازهای استحکام‌بخش ایجاد شود. افزون بر این، حضور برخی از این ذرات درون جزایر مارتنزیت قابل مشاهده است (شکل ۶-الف و ب). با ادامه عملیات تاب‌کاری، این ذرات به‌تدریج حل می‌شوند. بنابراین، با گذشت زمان بیش‌تر (۸ دقیقه)، چنان‌که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، درصد ذرات ریز کاهش یافته و ریزساختاری که تنها شامل جزایر درشت فاز مارتنزیت (آستنیت در دمای میان‌بحرانی) می‌باشد،

تصویر ریزساختار فولاد در زمان ۲ دقیقه، افزون بر تکمیل تقریبی فرایند تبلور مجدد دانه‌های فریت، ریزساختاری شامل ذرات ریز را نشان می‌دهد (شکل ۵). اندازه ذرات سمنتیت در حدود ۲۰۰-۳۰۰ نانومتر می‌باشد. به نظر می‌رسد که گروهی از ذرات ریز، سمنتیت و تعدادی از آن‌ها مارتنزیت باشند. ذرات احتمالی فاز مارتنزیت به وسیله فلش در شکل (۵-ب) مشخص شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۵ ریزساختار نمونه ۷۰ درصد نورد شده و تاب‌کاری شده در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ دقیقه (تقریباً به‌طور کامل تبلور مجدد شده)، (الف) تصویر میکروسکپ نوری، (ب) تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی. فلش‌ها جزایر احتمالی فاز مارتنزیت را نشان می‌دهند. (C: فاز سمنتیت، M فاز مارتنزیت)

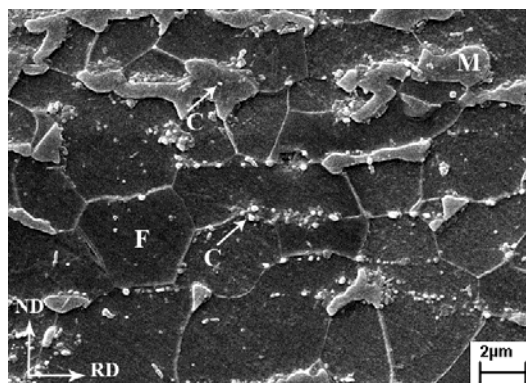
با افزایش زمان تاب‌کاری تا ۳/۵ دقیقه، جزایر آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق) در ریزساختار تشکیل شده‌اند. در حقیقت، در این زمان ریزساختار شامل ذرات ریز و جزایر درشت می‌باشد (شکل ۶).

تشکیل شده است.

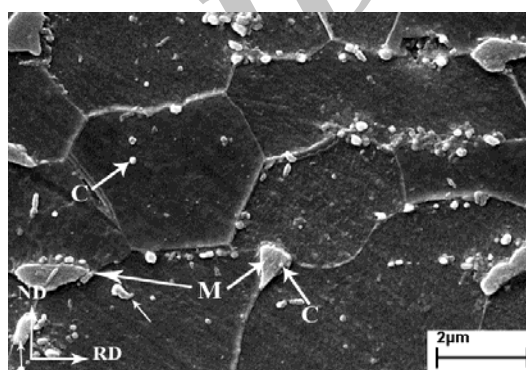
تأثیر میزان نورد سرد و دمای تاب‌کاری بر ریزساختار به‌منظور بررسی تأثیر میزان نورد سرد و دمای تاب‌کاری میان‌بحرانی بر ریزساختار فولاد، دو گروه نمونه شامل نمونه نورد سرد شده به‌میزان ۵۰ و ۷۰ درصد در دماهای ۷۴۰ و ۷۸۰ درجه سانتیگراد تحت عملیات تاب‌کاری میان‌بحرانی قرار گرفتند.

شکل (۸-الف)، ریزساختار نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده را پس از ۲/۵ دقیقه تاب‌کاری در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. این ریزساختار شامل فریت و پرلیت است. چنان‌که مشاهده می‌شود، دانه‌های فریت به‌طور کامل تبلور مجدد یافته‌اند و توده‌های پرلیت بدون تغییر در ریزساختار باقی مانده‌اند. کروی شدن جزئی لایه‌های سمنتیت در توده‌های پرلیت تا حدی قابل مشاهده است. در مدت زمان‌های ۳/۵ دقیقه و بیش از آن، ریزساختار حاصل از تاب‌کاری میان‌بحرانی، فولاد دوفازی شامل زمینه‌ی فریت و جزایر مارتنزیت است (شکل ۸-ب). با توجه به این‌که قبل از تشکیل آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق) توده‌های پرلیت بدون تغییر باقی می‌مانند، می‌توان نتیجه گرفت که جزایر مارتنزیت در نمونه ۵۰ درصد نورد سرد شده در محل توده‌های پرلیت تشکیل شده‌اند و شکل و توزیع آن‌ها به‌طور نسبی مشابه با توزیع و شکل پرلیت کار سرد شده است. در محدوده دمایی تاب‌کاری میان‌بحرانی، آستنیت در محل توده‌های پرلیت و در فصل مشترک سمنتیت-فریت جوانه‌زنی می‌کند و با تجزیه‌ی پرلیت، رشد می‌کند. به همین دلیل، شکل و توزیع جزایر مارتنزیت به‌طور نسبی مشابه با توزیع و شکل توده‌های پرلیت است. با افزایش مدت زمان تاب‌کاری میان‌بحرانی، مقدار فاز مارتنزیت تشکیل شده به‌کندی افزایش می‌یابد و این می‌تواند به‌دلیل وقوع استحاله فریت به آستنیت باشد.

نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های کار سرد شده به‌میزان ۷۰ درصد نشان می‌دهد که در طول تاب‌کاری میان‌بحرانی، کروی شدن لایه‌های سمنتیت در توده‌های پرلیت هم‌زمان با تبلور مجدد

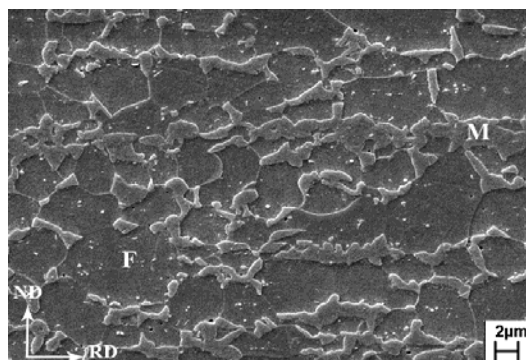


(الف)



(ب)

شکل ۶ تصویرهای میکروسکپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه فولادی ۷۰ درصد نورد شده و تاب‌کاری شده در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳/۵ دقیقه، در دو بزرگنمایی مختلف. (M: فاز مارتنزیت)



شکل ۷ تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه فولادی ۷۰ درصد نورد شده و تاب‌کاری شده در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۸ دقیقه

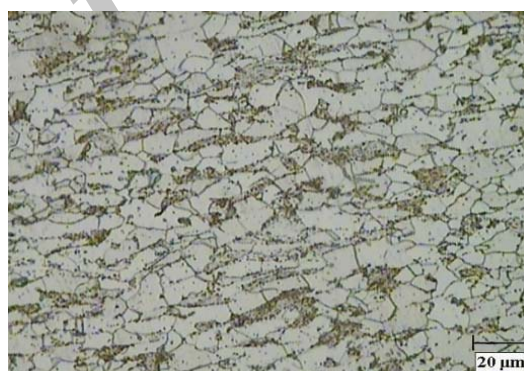


شکل ۹ تصویرهای میکروسکپ نوری از ریزساختار نمونه‌های فولادی ۷۰ درصد کار سرد شده برای مدت زمان ۵ دقیقه در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد

با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد نورد سرد باعث تغییر عمده‌ای در ریزساختاری که آستنیت از آن تشکیل می‌شود، شده است و نحوه جوانه‌زنی و رشد آستنیت را نیز به‌میزان زیادی تغییر داده است. در ریزساختار فولاد نورد شده به‌میزان ۵۰ درصد، آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق) در محل توده‌های پرلیت جوانه‌زنی و رشد کرده است، اما در ریزساختار فولاد نورد شده به‌میزان ۷۰ درصد، کروی شدن لایه‌های سمنتیت باعث شده است تا آستنیت از ریزساختاری شامل ذرات سمنتیت در زمینه‌ای از فریت تشکیل شود. در این حالت، جوانه‌زنی و رشد آستنیت به‌طور عمده در مرز دانه‌های فریت زمینه صورت گرفته است.

مدل (Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov) برای مدلسازی سینتیک تشکیل آستنیت حین تاب‌کاری تک‌دما به کار گرفته شد. به این منظور، داده‌های تجربی گزارش شده از تشکیل آستنیت در فولاد CK10 نورد نشده و نورد سرد شده به‌میزان ۵۰ و ۷۵ درصد به کار گرفته شد [۱۷]. لازم به ذکر است که روند گسترش ریزساختار در نمونه‌های نورد سرد شده کاملاً مشابه فولاد تحقیق حاضر است. بر اساس این مدل، کسر حجمی فاز آستنیت تشکیل شده حین نگه‌داری تک‌دما با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

فریت صورت گرفته است. در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد فرایند کروی شدن سمنتیت در حدود ۲ دقیقه تکمیل شده است (شکل ۵). پس از ۳/۵ دقیقه و بیش از آن تاب‌کاری در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد، مشاهده می‌شود که جزایر مارتنزیت (آستنیت در دمای بالا) نیز در ریزساختار تشکیل شده‌اند (شکل ۹). این جزایر به‌طور عمده در مرز دانه‌های فریت جوانه‌زنی و رشد کرده‌اند. می‌توان ریزساختار فولاد در این لحظه را ریزساختاری با اندازه دوگانه فاز استحکام‌بخش (ذرات و جزایر) در نظر گرفت. با افزایش بیش‌تر زمان تاب‌کاری، مقدار فاز مارتنزیت افزایش و میزان پیوستگی جزایر مارتنزیت افزایش یافته است، به‌گونه‌ای که کسر بیش‌تری از مرزدانه‌های فریت توسط فاز مارتنزیت اشغال شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸ تصویرهای میکروسکپ نوری از ریزساختار نمونه‌های فولادی ۵۰ درصد کار سرد شده برای مدت زمان‌های مختلف تاب‌کاری، (الف) ۲/۵ دقیقه، (ب) ۴ دقیقه، در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد



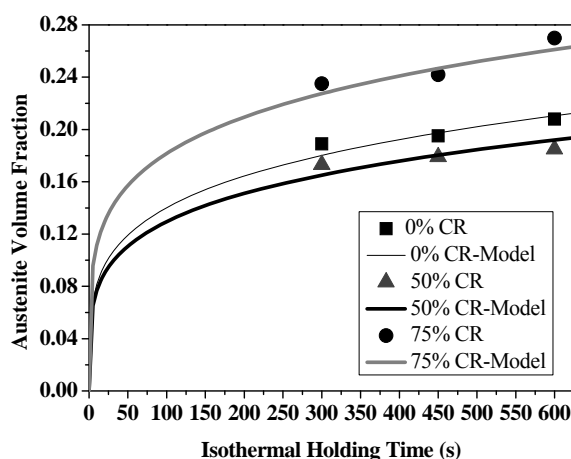
برای نمونه ۷۵ درصد نورد شده کمترین میزان و برای نمونه ۵۰ درصد نورد شده بیشترین میزان را دارد. برای تحلیل روند مشاهده شده در سینتیک تشکیل آستنیت، باید توجه داشت که این فرایند یک استحالتهای نفوذی شامل جوانه زنی و رشد است. با توجه به انحلال بیش تر کربن در فاز آستنیت نسبت به فریت در دمای خاص، جوانه زنی آستنیت در نواحی غنی از کربن اتفاق می افتد. هم چنین، فاز آستنیت به طور ترجیحی در عیب های غیر تعادلی پرانرژی جوانه زنی می کند، زیرا سد فعال سازی برای جوانه زنی در این نواحی کم تر است. نمونه‌ی ۷۵ درصد نورد سرد شده، در دمای تاب کاری میان بحرانی پس از گذشت ۶۰ ثانیه، شامل توزیعی از ذرات سمیتیت در زمینه‌ی فریتی است و شرایط ذکر شده برای جوانه زنی آستنیت، برای ذرات سمیتیت واقع در مرز دانه‌های فریت فراهم است. بنابراین، جوانه زنی آستنیت در این مناطق صورت می گیرد. در نمونه‌های نورد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده که شامل توزیعی از توده‌های پرلیت در زمینه‌ی فریت تبلور مجدد یافته هستند، فصل مشترک فریت-سمیتیت در توده‌های پرلیت، مکان‌های ترجیحی جوانه زنی آستنیت خواهند بود. افزون بر این، جوانه زنی آستنیت در مرز دانه‌های فریت نیز صورت می گیرد و در رقابت با آستنیت تشکیل شده در محل توده‌های پرلیت رشد می کند [۴]. در این حالت، کربن باید از نواحی آستنیت جوانه زده و در حال رشد درون پرلیت (حاوی منبع اصلی کربن از فاز سمیتیت درون آن) مسافت‌های نسبتاً زیادی را نفوذ کند تا رشد آستنیت جوانه زده در مرز دانه‌های فریت را فراهم کند. این در حالی است که در نمونه‌ی ۷۵ درصد نورد سرد شده، آستنیت تنها در نواحی مرز دانه‌های فریت جوانه زنی می کند و رقابتی برای رشد به این شکل ایجاد نمی شود و در نتیجه، سرعت تشکیل آستنیت در این نمونه بیشتر خواهد بود.

$$f=1-\exp(-0.693(t/t_{50})^n) \quad (1)$$

که در آن،  $f$  کسر حجمی فاز آستنیت تشکیل شده،  $t$  زمان فرایند،  $t_{50}$  زمان مورد نیاز برای پیشرفت استحالته به میزان ۵۰ درصد و  $n$  توان JMAK است. وابستگی دمایی عامل  $t_{50}$  به صورت زیر بیان می شود:

$$t_{50}=(t_{50})_0 \exp(Q/RT) \quad (2)$$

در این رابطه،  $(t_{50})_0$  مقدار ثابت،  $Q$  انرژی فعال سازی مؤثر برای تشکیل آستنیت،  $T$  دما (بر حسب کلین) و  $R$  ثابت جهانی گازهاست. در این مدل، سه عامل  $n$ ،  $(t_{50})_0$  و  $Q$ ، قابل تنظیم هستند که مقادیر آنها بوسیله‌ی انطباق نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل، مشخص می شود. نتایج حاصل از مدل سازی بر مبنای مدل JMAK در شکل (۱۰) نشان داده شده اند. برای هر سه ساختار نورد نشده، و نورد سرد شده به میزان ۵۰ و ۷۵ درصد، انطباق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از مدل JMAK و نتایج تجربی در محدوده‌ی زمان تاب کاری ۳۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه به دست آمده است. متغیرهای مدل برای سه نمونه‌ی فولاد مورد بررسی، در جدول (۳) آورده شده است. پیش بینی مدل برای تشکیل آستنیت در هر سه نمونه‌ی فولادی روند تقریباً یکسانی دارد. کسر حجمی فاز آستنیت با افزایش زمان تاب کاری هم چنان که انتظار می رود، افزایش یافته است. همان گونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود، سرعت تشکیل آستنیت در ساختاری که در ابتدا ۷۵ درصد نورد سرد شده است، نسبت به دو ساختار دیگر بیش تر است. افزون بر این، با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به نمونه های نورد نشده و ۵۰ درصد نورد سرد شده، مشخص می شود که به ازای زمان تاب کاری معین، نمونه‌ی نورد نشده کسر حجمی آستنیت بالاتری دارد. روند مشاهده شده در نرخ تشکیل آستنیت، در مقادیر  $t_{50}$  نیز انعکاس دارد. بر اساس مقادیر گزارش شده در جدول (۲)،  $t_{50}$



شکل ۱۰ سینتیک تشکیل آستنیت در طول تاب کاری در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد (نقاط نشان دهنده نتایج تجربی و خطوط نتایج حاصل از مدل سازی است)

جدول ۲ پارامترهای مدل JMAK

| ریزساختار        | n    | $t_{50}$ (s) | $(t_{50})_0$ (s)      | Q (kJ/mol) |
|------------------|------|--------------|-----------------------|------------|
| نورد نشده        | ۰/۲۵ | ۴۴۳۶۹        | $۱/۳ \times ۱۰^{-۵۵}$ | ۱۱۵۴/۵     |
| ۵۰ درصد نورد شده | ۰/۲۴ | ۸۱۵۶۷        | $۲ \times ۱۰^{-۵۵}$   | ۱۱۵۶       |
| ۷۵ درصد نورد شده | ۰/۲۳ | ۲۲۰۰۳        | $۱/۱ \times ۱۰^{-۵۵}$ | ۱۱۵۰       |

تشکیل آستنیت در فولاد کم کربن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که افزایش درصد نورد سرد، باعث تغییر عمده‌ای در ریزساختار اولیه فولاد می‌شود و نحوه جوانه‌زنی و رشد آستنیت را نیز به میزان زیادی تغییر می‌دهد. به دلیل انجام کار سرد، تبلور مجدد فریت و کروی شدن لایه‌های سمیتیت در پرلیت تغییر شکل یافته، فرایندهایی هستند که افزون بر تشکیل آستنیت اتفاق می‌افتند. در ریزساختار فولاد نورد شده به میزان ۵۰ درصد، آستنیت (مارتنزیت در دمای اتاق) در محل توده‌های پرلیت جوانه‌زنی و رشد کردند، اما در ریزساختار فولاد نورد شده به میزان ۷۰ درصد، کروی شدن لایه‌های سمیتیت باعث شد تا آستنیت از ریزساختاری شامل ذرات سمیتیت در زمینه فریتی تشکیل شود. در این حالت، آستنیت در فصل مشترک فریت و ذرات سمیتیت واقع در مرز دانه‌های فریت جوانه‌زنی کرد و سپس، به گونه‌ای رشد کرد که نزدیک‌ترین ذرات سمیتیت که در آن‌ها جوانه‌زنی آستنیت اتفاق نیفتاده بود را در بر بگیرد. با توجه به

پایینتر بودن میزان و سرعت تشکیل فاز آستنیت در نمونه ۵۰ درصد نورد شده نسبت به نمونه نورد نشده را می‌توان به کروی بون لایه‌های سمیتیت در توده‌های پرلیت در نمونه ۵۰ درصد نورد شده نسبت داد. در حقیقت، مجموعه پرلیت با سمیتیت کروی شده، بسیار آهسته‌تر از پرلیت معمولی به آستنیت تبدیل می‌شود [۴].

به منظور بررسی تأثیر دما بر روی ریزساختار فولاد، نمونه‌های با ۵۰ و ۷۰ درصد کار سرد در دمای ۷۸۰ درجه سانتیگراد تاب کاری میان‌بحرانی به مدت زمان‌های مختلف شدند. با مقایسه نتایج حاصل از این مرحله با نتایج به دست آمده از تاب کاری نمونه‌ها در دمای ۷۴۰ درجه سانتیگراد، مشخص می‌شود که دما تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تسریع تشکیل آستنیت داشته است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر میزان نورد سرد اولیه و دمای تاب کاری میان‌بحرانی بر روند گسترش ریزساختار و

دمای مربوطه، درصد ذرات ریز کاهش یافت و ریزساختاری که تنها شامل جزایر درشت فاز مارتنزیت (آستنیت در دمای میان‌بحرانی) بود، تشکیل شد. دمای تاب‌کاری نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تسریع تشکیل آستنیت داشت. سینتیک تشکیل تک‌دمای آستنیت به خوبی بوسیله‌ی روش JMAK مدل‌سازی شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی مشخص شد که تغییر ریزساختار فولاد بوسیله‌ی نور سرد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت تشکیل آستنیت در طول تاب‌کاری میان‌بحرانی دارد.

این‌که انحلال کامل ذرات سمیتیت در ریزساختار بعد از تشکیل آستنیت اتفاق می‌افتد، در نمونه‌های فولاد نورد شده به میزان ۷۰ درصد، ریزساختار شامل ذرات ریز و جزایر درشت بود. ریزساختار فولاد در این حالت، دارای اندازه‌ی دوگانه‌ی فاز استحکام‌بخش بود. بنابراین، می‌توان گفت که در تحقیق حاضر، وجود ذرات سمیتیت در ریزساختار باعث شده است تا توزیع دوگانه‌ای از اندازه‌ی فازهای استحکام‌بخش ایجاد شود. با ادامه‌ی عملیات تاب‌کاری، این ذرات به تدریج حل شدند. بنابراین، با گذشت زمان بیش‌تر نگره‌داری در

### مراجع

1. Speich G.R., Demarest V.A., Miller R.L., "Formation of Austenite During Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 12A, pp. 1419-1428, (1981).
2. Garcia C.I., Deardo A.J., "Formation of austenite in 1.5 pct Mn steels", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 12A, pp. 521-530, (1981).
3. Yang D.Z., Brown E.L., Matlock D.K., Krauss G., "Ferrite Recrystallization and Austenite Formation in Cold-Rolled Intercritically Annealed Steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 16A, pp. 1385-1392, (1985).
4. Huang J., Poole W.J., Militzer M., "Austenite Formation during Intercritical Annealing", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 35A, pp. 3363-3375, (2004).
5. San Martín D., de Cock T., García-Junceda A., Caballero F.G., Capdevilla C., García de Andrés C., "In situ study of austenite formation by dilatometry in a low carbon microalloyed steel", *Materials Science and Technology*, Vol. 58, pp. 926-929, (2008).
6. Azizi-Alizamini H., Militzer M., Poole W.J., "Austenite Formation in Plain Low-Carbon Steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42A, pp. 1544-1557, (2011).
7. Judd R.R., Paxton H.W., "Kinetics of Austenite Formation from a Spheroidized Ferrite-Carbide Aggregate", *Transactions of the metallurgical society of AIME*, Vol. 242, pp. 206-214, (1968).
8. Molinder G., "A Quantitative Study of the Formation of Austenite and the Solution of Cementite at Different Austenitizing Temperatures for a 1.27% Carbon Steel", *Acta Metallurgica*, Vol. 4, pp. 565-571, (1956).
9. Yi J.J., Kim I.S., Choi, H.S., "Austenitization during Intercritical Annealing of an Fe-C-Si-Mn Dual-Phase Steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 16A, pp. 1237-1245, (1985).
10. Mohant, R.R., Girina O.A., Fonstein N.M., "Effect of Heating Rate on the Austenite Formation in

- Low-Carbon High-Strength Steels Annealed in the Intercritical Region", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42A, pp. 3680-3690, (2011).
11. Navara E., Bengtsson B., Easterling K.E., "Austenite formation in manganese-partitioning dual-phase steel", *Materials Science and Technology*, Vol. 2, pp. 1196-1201, (1986).
  12. Savran V.I., Van Leeuwen Y., Hanlon D.N., Kwakernaak C., Sloof W.G., Sietsma J., "Microstructural Features of Austenite Formation in C35 and C45 alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38A, pp. 946-955, (2007).
  13. Tokizane M., Matsumura N., Tsuzaki K., Maki T., Tamura I., "Recrystallization and Formation of Austenite in Deformed Lath Martensitic Structure of Low Carbon Steels", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 13A, pp. 1379-13838, (1982).
  14. Beswick J., "Effect of Prior Cold Work on the Martensite Transformation in SAE 52100", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 1A, pp. 299-306, (1984).
  15. Mazinani M., "Deformation and Fracture Behavior of a Low Carbon Dual Phase Steel", Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, (2006).
  16. Rudnizki J., Bottger B., Prah U., Bleck W., "Phase-Field Modeling of Austenite Formation from a Ferrite plus Pearlite Microstructure during Annealing of Cold-Rolled Dual-Phase Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42A, pp. 2516-2525, (2011).
۱۷. بهادری ن.، مزینانی م.، "تولید فولاد دوفازی با مورفولوژی متفاوت فاز مارتنزیت و مدل‌سازی رفتار سیلان آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۰).