

# مطالعه‌ای بر تأثیر عناصر آلیاژی روی خواص مکانیکی و ریزساختاری فولادهای پیشرفته استحکام بالا

حامد نامداراصل<sup>۱</sup>، محمد امامی<sup>۲</sup> و\*

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

\*مسئول مکاتبات: memami@ubonab.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

عناصر آلیاژی  
فولادهای پیشرفته استحکام بالا  
خواص مکانیکی  
TWIP  
TRIP

تحقیق حاضر، مروری بر مطالعات پیشین انجام شده بر تأثیر عناصر آلیاژی مختلف نظیر کربن، آلومینیم، سیلیسیم، منگنز، بور، مس، کروم، مولیبدن، هیدروژن، نیتروژن، تیتانیم، نیوبیوم، وانادیوم و نیکل روی خواص فولادهای پیشرفته استحکام بالا دارد. فولادهای پیشرفته استحکام بالا جزو جدیدترین نسل فولادها هستند که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این فولادها به واسطه داشتن ریزساختارهای پیچیده متشکل از فریت، مارتنزیت، بینیت و آستنیت باقیمانده دارای ترکیبی از استحکام بسیار بالا و ازدیاد طول نسبی زیاد هستند که این مهم با کنترل ریزساختار از طریق کنترل دقیق میزان و نوع عناصر آلیاژی و انجام عملیات حرارتی نظیر آنیل بین بحرانی و عملیات ترمومکانیکی مانند نورد گرم و نورد داغ قابل حصول است. تحقیقات گسترده‌ای بر توسعه این آلیاژها و بررسی مکانیزم‌های استحکام‌دهی و کرنش‌سختی این آلیاژها انجام شده است که در نهایت منجر به معرفی دو نوع از مهم‌ترین این فولادها با عناوین TRIP و TWIP گشته است که در آن‌ها عناصر آلیاژی نقشی تعیین‌کننده در ایجاد ریزساختار آستنیتی، تغییر انرژی نقص در چیدمان، تغییر چگالی نابجایی‌ها و نرخ کرنش‌سختی دارند. خلاصه‌ای از مطالعات پیشین به تفکیک عناصر آلیاژی و چگونگی تأثیر آن‌ها بر خواص مختلف این فولادها در مقاله حاضر ارائه می‌گردد.

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

## ۱ مقدمه

عوامل به‌نوبه خود فرآیندهای تغییر شکل از جمله لغزش نابجایی‌ها، مومسانی القاشده با استحاله<sup>۲</sup> (TRIP) و مومسانی القاشده با دوقلوبی<sup>۴</sup> (TWIP) را کنترل می‌کنند [۳]. در تحقیقات جدیدی که روی توسعه فولادهای پیشرفته استحکام بالا انجام می‌شود سعی می‌شود با استفاده از عناصر آلیاژی مناسب ترکیبی از خواص استحکام بالا، نرمی بالا و چگالی پایین‌تر نسبت به فولادهای کربنی و همچنین الزامات صنایع خودروسازی مانند رنگ‌پذیری، شکل‌پذیری و جوش‌پذیری حاصل شود. با توجه به این موضوع، تحقیق حاضر مروری خواهد داشت بر تحقیقات انجام شده بر مهم‌ترین عناصر آلیاژی مورد استفاده در فولادهای پیشرفته استحکام بالا و نقشی که این عناصر در خواص مکانیکی و فیزیکی و کنترل ریزساختار این فولادها ایفا می‌کنند.

فولادها بیشترین کاربرد را در تولید خودروهای امروزی دارد. در سال‌های اخیر الزامات زیست‌محیطی برای کاستن از انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیاری از شرکت‌های خودروسازی دنیا را واداشته است که موادی جایگزین بیابند تا وزن کلی خودرو کاهش پیدا کند [۱]. علی‌رغم تلاش‌های انجام شده، محدودیت‌هایی مانند هزینه‌های تولید، جوش‌پذیری، شکل‌پذیری، و در برخی موارد محافظت در برابر خوردگی و تمام‌کاری سطحی مانع از رشد و توسعه سریع آلیاژهای غیرآهنی در ساخت خودرو گردید. فولادهای پیشرفته استحکام بالا<sup>۱</sup> به دلیل داشتن ترکیبی از استحکام بسیار بالا و نرمی بالا می‌توانند جایگزین فولادهای ساده کربنی کم‌استحکام در بدنه خودرو شوند و بدین ترتیب ایمنی سرنشینان را در تصادفات بالا ببرند. استحکام بالای این فولادها این امکان استفاده از مقاطع نازک‌تر و در نتیجه کاهش وزن محصول را نیز می‌دهد. بنابراین این دسته از فولادها به‌عنوان رقیبی برای آلیاژهای غیرآهنی نظیر آلومینیم و منیزیم در صنعت خودرو مطرح گشته‌اند [۲]. معمولاً این آلیاژها خواص مکانیکی خود را از ساختارهای پیچیده حاوی فریت، مارتنزیت و آستنیت وام می‌گیرند. دستیابی به این ساختارها با کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی حاصل می‌شود. موارد مذکور تأثیر چشم‌گیری بر مقدار، پایداری و انرژی نقص در چیدمان<sup>۲</sup> آستنیت دارند، که این

## ۲ تأثیر عناصر آلیاژی بر خواص فولادهای پیشرفته استحکام بالا

### ۱.۲ کربن

کربن نقشی اساسی در خواص فولادهای پیشرفته با استحکام بالا بازی می‌کند. کربن پارامتر شبکه آهن را افزایش می‌دهد. کربن باعث افزایش انرژی آزاد

<sup>1</sup>Advanced High strength steel (AHSS)

<sup>2</sup>stacking fault energy (SFE)

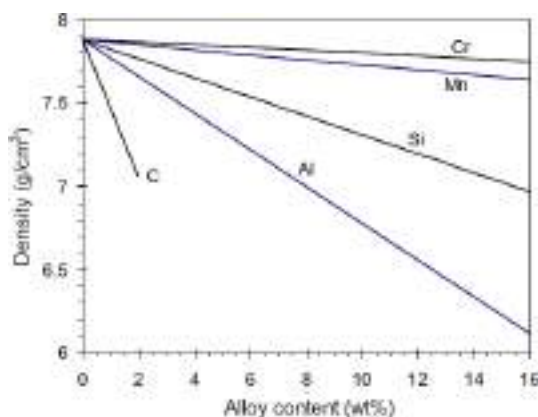
<sup>3</sup>Transformation Induced Plasticity

<sup>4</sup>Twinning Induced Plasticity

تفاوت منگنز با سایر فلزات انتقالی این است که برخلاف آن‌ها منگنز موجب کاهش SFE می‌شود، اما رابطه SFE با مقدار منگنز به صورت غیرخطی است به طوری که در آلیاژهای دوتایی Fe-Mn منگنز در ابتدا SFE را کم می‌کند که کمینه آن در ۱۶ at.% - ۱۰ منگنز اتفاق می‌افتد و بین ۱۶-۳۳ at.% به ازای هر ۱ at.% افزودن منگنز SFE،  $18 \text{ mJ/m}^2$  افزایش می‌یابد [۷]. پیرس و همکاران [۲۴] با بررسی آلیاژ  $\text{Fe-Mn-3Al-3Si}$  در شرایط نورد داغ و با مقادیر ۲۲، ۲۵ و ۲۸ درصد وزنی مشاهده کردند که با افزایش مقدار منگنز و در نتیجه افزایش SFE مکانیزم تغییر شکل از لغزش نابجایی‌ها و تبدیل مارتنزیت اپسیلین به مارتنزیت آلفا، به دوقلویی‌های مکانیکی و تشکیل مارتنزیت اپسیلین و در نهایت لغزش متقاطع نابجایی‌ها تغییر یافت. گزارش شده است که با افزایش مقدار منگنز بهترین ترکیب استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول حاصل می‌شود [۱۴]. در فولادهای منگنز متوسط (۷-۱۲ wt.%) استحکام تسلیم  $915 \text{ MPa}$ ، استحکام کششی نهایی  $1800 \text{ MPa}$  و درصد ازدیاد طول ۱۰٪ بعد از تغییر شکل داغ در دمای  $850^\circ \text{C}$  گزارش شده است. همچنین در پژوهش دیگر در فولادی حاوی ۷-۴ منگنز استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول به ترتیب  $1200 \text{ MPa}$ ،  $1400 \text{ MPa}$  و ۶٪ بعد از تغییر شکل داغ گزارش شده است. مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول حاصل از افزودن ۵ wt.% منگنز بعد از تغییر شکل داغ در فولادی دیگر نیز به ترتیب  $1060 \text{ MPa}$ ،  $1500 \text{ MPa}$  و ۱۱/۱٪ گزارش شده است. افزودن ۱۲-۵ منگنز از تشکیل فاز سمانتیت در فولادهای منگنز متوسط جلوگیری می‌کند و موجب پایداری فاز آستنیت می‌شود [۱۴، ۱۹، ۲۰، ۲۴، ۲۵].

### ۳.۲ آلومینیم

علت اصلی افزودن آلومینیم به فولادهای پیشرفته استحکام بالا کاهش چگالی فولاد و در نتیجه کاهش وزن نهایی بدنه خودرو است [۱۵]. شکل ۱ تأثیر افزودن برخی عناصر آلیاژی روی چگالی فولاد نمایش می‌دهد.



شکل ۱: تأثیر عناصر آلیاژی روی چگالی فولاد [۱۵].

افزودن آلومینیم باعث افزایش SFE می‌شود [۲۶، ۲۷]. در تحقیقات جونگ و همکاران [۲۸] مشاهده شد که با افزایش آلومینیم تا ۳ wt.% SFE پیوسته افزایش می‌یابد. آلومینیم روی ریزساختار و خواص تغییر شکلی و

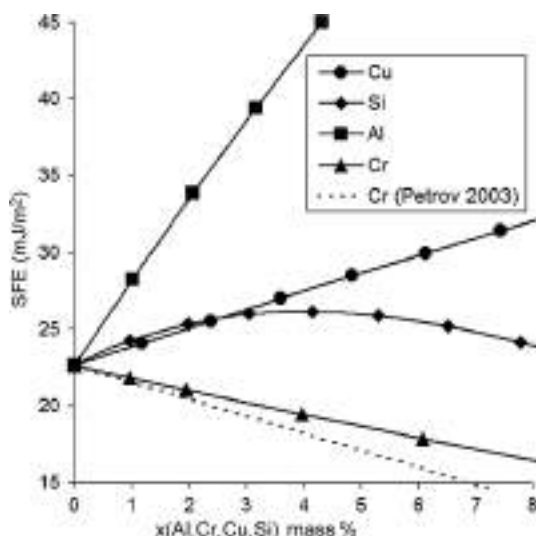
تبدیل آستنیت به مارتنزیت اپسیلین می‌شود؛ بدین معنی که افزایش کربن فولاد، آستنیت را نسبت به مارتنزیت اپسیلین پایدارتر می‌کند. کربن از طریق کاهش دمای نیل باعث بهبود خاصیت پارامغناطیسی فولادهای مذکور می‌گردد [۴-۸]. در مورد تأثیر کربن روی SFE نظرات متفاوتی وجود دارد، طبق مطالعات لی و همکاران [۹]، مقدار کربن تأثیر چندانی روی SFE ندارد، اما در پژوهش‌های دیگر افزایش شدید SFE در اثر بالا بردن مقدار کربن گزارش شده است [۱۰، ۱۱]. مطالعات پیشین روی تأثیرات کربن بر خواص مکانیکی فولادهای منگنز متوسط نورد داغ شده نشان داد که با افزودن کربن، سختی و درصد ازدیاد طول هم‌زمان افزایش می‌یابد [۱۲، ۱۳]. در فولادهای منگنز متوسط با مقدار کربن ۱/۲ wt.% - ۰/۶ استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول به ترتیب  $450 - 300 \text{ MPa}$ ،  $1800 - 1200 \text{ MPa}$  و ۵۰-۴۰٪ گزارش شده است [۱۴]. کربن موجب کاهش چگالی فولاد می‌شود [۱۵] و در ضمن نیرو محرکه شیمیایی برای ایجاد رسوبات کاربیدی  $\text{M}_3\text{C}$ ،  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  و  $\text{M}_7\text{C}_3$  را فراهم می‌کند [۲، ۱۵]. در فولادهای میکروآلیاژی، کربن با ایجاد فازهای سخت کاربیدی موجب بهبود خواص مکانیکی از قبیل استحکام کششی و مقاومت سایشی می‌گردد [۱۲]. طی تحقیقات ری و همکاران [۱۶] بر فولادهای Fe-Mn-C با مقادیر کربن ۱/۳ - ۵ at.% و منگنز ۳۸ - ۲۸/۵ at.% مشخص گردید که مقدار کربن تأثیر چندانی روی مدول یانگ ندارد [۱۷]. افزایش کربن اثر منفی روی جوش‌پذیری این فولادها دارد [۱۴، ۱۸]، بنابراین مقدار معمول کربن در فولادهای منگنز متوسط بین ۰/۶ wt.% - ۰/۱ پیشنهاد شده است [۱۴]. افزایش مقدار کربن موجب بهبود پایداری آستنیت شده [۱۹] و باعث کاهش دمای شروع استحاله مارتنزیت<sup>۵</sup> (Ms) و اندازه دانه‌های آستنیت می‌شود. همچنین زیاد بودن مقدار کربن، موجب جدایش شدید آن از مذاب حین ریخته‌گری می‌شود [۱۴].

### ۲.۲ منگنز

منگنز به‌عنوان یکی از عناصر آلیاژی اصلی در فولادهای پیشرفته استحکام بالا به‌منظور پایداری فاز آستنیت [۱۹، ۲۰] و کنترل SFE به‌عنوان جایگزینی برای عنصر گران‌قیمت و استراتژیک نیکل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]. منگنز می‌تواند چگالی فولاد را به میزان جزئی کاهش دهد [۱۵، ۱۸]. افزودن منگنز باعث ناپایداری اکسیدها شده و آن‌ها را داخل الکترولیت حل می‌نماید، مقاومت به خوردگی این نوع فولادها با افزایش مقدار منگنز کاهش می‌یابد [۲۱]. علاوه بر این افزایش منگنز ایجاد ترکیبات بین فلزی را سبب می‌شود [۲۲]. در تحقیقات فاجاردو و همکاران [۱۸] روی سیستم آلیاژی  $\text{Fe-Mn-3Al-3Si}$  ایجاد کاربیدهای  $\text{Fe}_3\text{C}$  و  $\text{Mn}_3\text{C}$  مشاهده شد. همچنین با افزودن ۲۸-۲۱ wt.% منگنز به سیستم آلیاژی فوق کاهش مقاومت به خوردگی در اثر ناپایدار شدن اکسیدهای منگنز گزارش گردید. در صورتی که مقدار منگنز بیش از ۲۵ wt.% باشد از استحاله مارتنزیتی جلوگیری می‌شود [۱۸]. هم‌چنین گزارش شده است که منگنز دمای تبدیل ساختار fcc به hcp را کاهش می‌دهد [۲۳].

<sup>5</sup>Martensite start temperature

افزایش می‌شود [۱۴]. افزودن سیلیسیم باعث ریزدانه‌گی [۳۰] و افزایش سختی و استحکام این نوع از فولادها در حین پیرسازی می‌شود. سیلیسیم همانند آلومینیم باعث کاهش چگالی می‌شود [۸، ۱۵]. سیلیسیم به خاطر افزایش چگالی دوقلویی‌های مکانیکی، استحکام تسلیم و استحکام کششی را بیشتر از آلومینیم افزایش می‌دهد [۳۰]، همدا و همکاران [۴۰] با مطالعه روی آلیاژ  $Fe-25Mn-3Si-3Al$  گزارش کرده‌اند که دوقلویی‌های مکانیکی زمانی رخ می‌دهند که تغییر طول نسبی ناهمگن کاهش یابد و نرخ کرنش تا  $S^{-1} \times 10^3 \times 1/5$  افزایش یابد. در ضمن سیلیسیم در مورد رفتار کرنش سختی دینامیکی این فولادها، رفتاری شبیه آلومینیم دارد [۳۰]. افزودن سیلیسیم موجب افزایش هم‌زمان استحکام تسلیم با مکانیزم محلول جامد و استحکام کششی از طریق نرخ کرنش سختی بالا و در نتیجه درصد ازدیاد طول بالا در آلیاژهای آستنیتی منگن‌دار گشته است [۳۰، ۳۳]. اما در عین حال گزارش شده است که مدول برشی با افزودن سیلیسیم کاهش می‌یابد [۴۱]. گزارش شده است که با افزودن ۱ wt.% سیلیسیم به سیستم آلیاژی  $Fe-17Cr-12Ni$  استحکام تسلیم از ۱۶۱ MPa به ۲۱۳ MPa افزایش یافت. افزودن این مقدار سیلیسیم به آلیاژ  $Fe-18Mn-0.6C$  سبب کاهش SFE به میزان  $4 \text{ mJ/m}^2$  گردید. کاهش SFE منجر به تسهیل لغزش صفحه‌ای و محدود شدن لغزش متقاطع نابجایی‌ها می‌شود [۳۰]. با وجود این، در برخی از پژوهش‌ها گزارش شده است که افزودن سیلیسیم تا ۴ درصد وزنی باعث افزایش SFE و بیشتر از این مقدار موجب کاهش SFE می‌شود [۱۷]. شکل ۲ تأثیر برخی از عناصر آلیاژی را روی SFE آستنیت نشان می‌دهد. همچنین سیلیسیم باعث کاهش دمای نیل (کوری) شده و از این طریق بر خواص آهنربایی تأثیر می‌گذارد [۴، ۵]. سیلیسیم مقاومت به خوردگی را نیز بهبود می‌بخشد [۱۸]. اما با این حال روی کیفیت سطحی تأثیر گذاشته و مشکلاتی را در ریخته‌گری پیوسته، جوش‌پذیری، پوشش‌دهی سطحی و گالوانیزه کردن فولاد ایجاد می‌کند [۱۴]. بدین ترتیب علی‌رغم تأثیرات مثبت سیلیسیم روی خواص فولادهای منگن‌دار، استفاده از آن با محدودیت روبرو است.



شکل ۲: تأثیر عناصر روی انرژی کرنش در چیدمان آستنیت [۱۷].

مکانیکی اثر می‌گذارد [۲۹-۳۱]. مجیدی و همکاران [۳۲] گزارش کرده‌اند که با افزودن ۲/۳ wt.% آلومینیم به آلیاژ  $Fe-18Mn-0.6C$  تنش تسلیم از ۳۶۶ MPa به ۴۰۵ MPa، میزان افزایش طول نسبی از ۵۲٪ به ۵۴٪ افزایش یافت و استحکام کششی به میزان جزئی کاهش پیدا کرد. کاهش استحکام کششی با افزودن آلومینیم به کاهش دوقلویی‌هایی مکانیکی در اثر افزایش SFE [۲۹، ۳۳] و افزایش استحکام تسلیم به استحکام بخشی با مکانیزم محلول جامد نسبت داده شده است [۲، ۳۴]. در عین حال، افزودن این عنصر باعث بزرگ شدن اندازه دانه از  $97 \mu\text{m}$  به  $148 \mu\text{m}$  گردید. کاهش چگالی دوقلویی‌های مکانیکی در اثر افزایش SFE [۳۵] که به نوبه خود به افزایش محل‌های جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد یافته در حین نورد داغ کمک می‌کنند [۳۶] عامل درشت‌دانه شدن گزارش شده است [۳۲]. افزودن هر ۱ wt.% آلومینیم باعث کاهش مدول یانگ به میزان ۲-۲/۵٪ می‌شود [۱۵]، این امر به کاهش انرژی شبکه محلول جامد  $Fe-Al$  و افزایش فاصله اتم‌های آهن و آلومینیم در شبکه نسبت داده شده است [۳۷]. یانگ و همکاران [۳۸] طی تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار آلومینیم، تنش سیلان و درصد ازدیاد طول افزایش می‌یابد. آلومینیم باعث افزایش دمای تبلور مجدد در فاز فریت می‌شود، برای ایجاد کاربیدها در این نوع فولادها مقدار آلومینیم باید بالای ۵ wt.% باشد، افزایش بیشتر کربن و آلومینیم نیرو محرکه شیمیایی برای ایجاد رسوبات را مهیا می‌کند و هم‌زمان پارامتر شبکه را افزایش می‌دهد [۱۵]. در پاره‌ای از مطالعات، افزودن آلومینیم باعث حذف منحنی دندانه‌ای ناشی از پیرکرنشی دینامیک<sup>۶</sup> در حین آزمون کشش گشته است. علت این امر به کاهش فعالیت و نفوذ اتم‌های کربن در هسته نابجایی و در نتیجه ممانعت کمتر آن‌ها از حرکت نابجایی‌ها نسبت داده شده است [۳۲]. افزودن آلومینیم از طریق ایجاد لایه سطحی محافظ آلومینا ( $Al_2O_3$ ) نفوذ هیدروژن به فولاد را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر با افزایش SFE، منجر به تضعیف تشکیل عوامل تشدیدکننده تردی هیدروژنی مانند مارتنزیت اپسین و دوقلویی می‌شود که در نتیجه آن‌ها حساسیت به ترک هیدروژنی فولاد کاهش می‌یابد [۳۰، ۳۹]. فاجاردو و همکاران [۱۸] بهبود مقاومت به خوردگی حفره‌ای را در صورت بیشتر بودن مقدار آلومینیم از سیلیسیم در سیستم آلیاژی  $Fe-Mn-3Al-3Si$  گزارش کرده‌اند. آلومینیم از طریق ایجاد لایه محافظ  $Al_2O_3$  پایدار موجب بهبود مقاومت به خوردگی می‌شود [۱۴]. آلومینیم از تشکیل رسوبات سمانتیت به وسیله افزایش دمای جوانه‌زنی کاربیدها جلوگیری می‌کند. در مورد تأثیر آلومینیم روی پایداری فازها گزارش شده است که افزودن آلومینیم موجب پایداری فاز آستنیت [۲۹، ۳۰] و همچنین موجب پایداری فاز فریت دلتا می‌گردد؛ هم‌چنین مقدار بالای آلومینیم مشکلات زیادی را در ذوب و ریخته‌گری ایجاد می‌کند بنابراین مقدار آن در کنار سیلیسیم نباید بیش از ۳ wt.% باشد [۱۴].

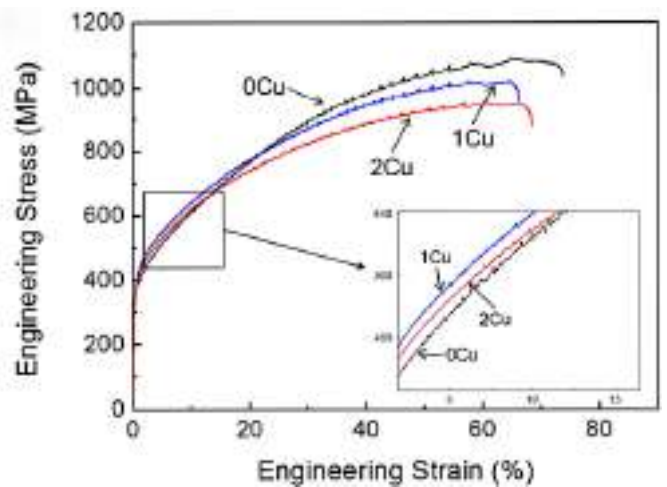
## ۴.۲ سیلیسیم

سیلیسیم پایدارکننده فریت است و به علت تأثیر بر افزایش دمای جوانه‌زنی کاربیدها برای جلوگیری از ایجاد کاربیدها و رسوب سمانتیت به این فولادها

<sup>۶</sup>Dynamic Strain Aging (DSA)

## ۵.۲ مس و نیکل

مس از جمله عناصری است که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است. در فولادهای پیشرفته حاوی مس، مس موجب تشکیل رسوبات یا خوشه‌های غنی از مس نانومتری در درون دانه‌ها و در نتیجه افزایش قابل توجه خواص مکانیکی فولاد می‌شود [۱۳، ۴۲]. مشاهده شده است که افزودن مس باعث افزایش SFE می‌شود [۱۷، ۳۳، ۴۳]. بر اساس تحقیقات جین و همکاران [۴۳] روی آلیاژ  $Fe-17Mn-0.8C$  افزودن مس تا مقدار ۲ wt.% موجب افزایش SFE گشته و علاوه بر آن کاهش نرخ کرنش سختی را نیز سبب شد. در این آلیاژ با افزایش مقدار مس میزان پیرکرنشی دینامیکی مطابق شکل ۳ کاهش یافت.



شکل ۳: تأثیر مس روی منحنی تنش-کرنش آلیاژ  $Fe-17Mn-0.8C$  [۴۳].

مس مقاومت به خوردگی را نیز بهبود می‌بخشد [۲۱]. افزودن مس موجب افزایش مقاومت تردی ناشی از هیدروژن می‌شود [۴۴]. اتم‌های هیدروژن در مرز دانه‌ها گیر می‌افتند و باعث شکست بین‌دانه‌ای در اثر محدودیت نفوذ هیدروژن می‌شود. افزودن مس موجب افزایش SFE و در نتیجه تسهیل لغزش متقاطع نابجایی‌ها و تغییر شکل پیوسته فولاد می‌شود، افزودن مس همچنین تغییر شکل موضعی در مرز دانه‌ها را تضعیف می‌کند و شروع ترک که منجر به شکست فولاد می‌شود را به مشکل مواجه می‌کند [۴۳]. افزودن مس نمی‌تواند مقدار هیدروژن حبس شده را کاهش دهد اما در افزایش درصد ازدیاد طول از طریق کاهش غلظت موضعی هیدروژن مؤثر است بدون اینکه بر استحکام اثر منفی بگذارد. مس همچنین باعث پایداری ساختار fcc و فاز آستنیت می‌گردد [۴، ۵، ۴۳، ۴۵].

افزودن عنصر نیکل موجب پایداری ساختار fcc و فاز آستنیت می‌شود [۸]. همچنین این عنصر SFE آستنیت را افزایش می‌دهد [۲۷، ۸]. طبق تحقیقات کالسار و همکاران [۲۷] روی سیستم آلیاژی  $(X = Ni, Al) Fe-12Mn-0.5C-nX$ ، با افزودن نیکل کسر بالایی از تغییر شکل دوقلویی مشاهده گشت. همچنین طی همین تحقیقات روی آلیاژهای  $Fe-12.5Mn-0.53C$  و  $Fe-12.3Mn-(0.53-4/8)Ni$  بالاتر از آلیاژ حاوی نیکل به دست آمد، اما درصد ازدیاد طول آلیاژ حاوی نیکل در حدود ۳۰٪

بیشتر از آلیاژ فاقد نیکل به دست آمد که احتمالاً می‌تواند به درصد بالاتر فاز نرم آستنیت نسبت داده شود.

## ۶.۲ کروم و مولیبدن

برخلاف اکثر عناصر افزودن کروم SFE را کاهش می‌دهد [۱۷، ۲۳، ۳۳، ۴۶]. وانگ و همکاران [۴۷] انرژی نقص در چیدمان آلیاژهای  $Fe-24Mn-6/3Cr-0.2N$  و  $Fe-24Mn-3/3Cr$ ،  $Fe-24Mn$  را به ترتیب  $25 mJ/m^2$ ،  $24 mJ/m^2$  و  $22 mJ/m^2$  گزارش کردند [۴۷]. همچنین کروم به میزان جزئی موجب کاهش چگالی فولاد می‌شود [۱۵]. کروم موجب افزایش قابل توجه استحکام تسلیم می‌شود، به طوری که در تحقیقات وانگ و همکاران [۴۷] با افزایش مقدار کروم از ۳/۳ wt.% به ۳/۶ wt.%، استحکام تسلیم تقریباً ۳۳ MPa افزایش یافت. گزارش شده است که در صورت انتخاب عملیات حرارتی مناسب و انحلال کاربونیتریدها و کاربیدهایی نظیر  $M_23C_6$  و  $M_7C_3$  افزودن کروم می‌تواند باعث افزایش قابل توجه چقرمگی دما پایین فولاد گردد [۳۳، ۴۷]. شوای و همکاران [۳۳] گزارش کرده‌اند افزودن مقدار معین کروم و مولیبدن به فولادهای TWIP موجب افزایش سختی و مقاومت به سایش از طریق مکانیزم محلول جامد و ایجاد کاربیده‌های کروم و کاربیده‌های مولیبدن گردیده و نیز موجب بهبود خواص خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون می‌گردد. افزودن این عنصر از طریق ایجاد اکسید کروم مقاومت به خوردگی را بهبود می‌بخشد [۲۱، ۳۳، ۴۷]. مقایسه آلیاژهای  $18Mn-1/0C-2Cr-1/0Mo$  و  $Fe-18Mn-1/0C$  نشان داد که در آلیاژ حاوی کروم و مولیبدن استحکام تسلیم (۴۴۴ MPa) حدود ۳٪ بیشتر از آلیاژ فاقد این عناصر (۳۴۰ MPa) بود، همچنین افزایش درصد ازدیاد طول با اضافه شدن این عناصر نیز گزارش شده است [۳۳].

مولیبدن به جهت خاصیت جذب عناصر محلول، با به تأخیر انداختن رسوبگذاری Nb (C, N) تأثیرگذاری نیوبیم و کربن را بر پایداری آستنیت افزایش می‌دهد. همچنین این عنصر سختی‌پذیری آستنیت را بهبود می‌بخشد، موجب اصلاح اندازه دانه و افزایش سختی از طریق ایجاد رسوبات نانومتری می‌شود [۲۰]. علاوه بر افزایش سختی، مولیبدن موجب بهبود خواص رسوب-سختی می‌شود [۴۸]. در فولاد  $Fe-0.17C-6/5Mn-1/1Al-0.22Mo-0.05Nb$  گزارش شده است که عناصر میکروآلیاژی مولیبدن و نیوبیم به پایداری حرارتی آستنیت باقیمانده در دمای بالا کمک کرده و باعث پایداری مکانیکی آستنیت در حین کشش و افزایش استحکام تسلیم فولاد گشته‌اند [۲۰].

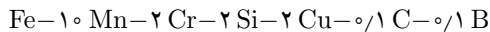
## ۷.۲ وانادیوم، نیوبیم و تیتانیم

افزودن وانادیوم، نیوبیم و تیتانیم موجب کنترل اندازه دانه و ریزدانه‌گی شده و در نتیجه افزایش استحکام تسلیم را سبب می‌شوند. گزارش شده است که تأثیر وانادیوم در افزایش استحکام بیشتر از نیوبیم و تیتانیم است. این عناصر انرژی فعال‌سازی تغییر شکل داغ را به طور محسوسی افزایش می‌دهند [۲۱، ۴۹-۵۱]. وانادیوم نرخ کرنش سختی و چگالی نابجایی‌ها را افزایش می‌دهد.

مزدانه‌ای دارند [۴۷]. لی و همکاران [۴۹] با مطالعه بر روی آلیاژ  $Fe-15Mn-2Cr-0.6C-xN$  گزارش کرده‌اند که نیتروژن استحاله آستنیت به مارتنزیت اپسین را تشویق می‌کند. همچنین مطالعه‌ای دیگر روی آلیاژ  $Fe-16Mn-(0.05-0.15)N$  افزایش تشکیل مارتنزیت اپسین با افزودن نیتروژن را تأیید نمود [۸].

## ۹.۲ بور

گزارش شده است که بور در آلیاژ



موجب افزایش استحکام می‌گردد. بور از طریق ایجاد فازهای سخت بورایدی  $M_2B$  که  $(M = Cr, Fe)$  از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری کرده و بهبود خواص مکانیکی مانند مقاومت به سایش و افزایش سختی را باعث می‌شود. با این حال در این سیستم آلیاژی حضور توأم کربن و بور از دید طول نسبی را کاهش داد. حذف کربن از این سیستم آلیاژی موجب بهبود قابل توجه نرمی آلیاژ گشت، اما استحکام آلیاژ به دلیل کاهش اعوجاج شبکه ناشی از حذف کربن کاهش یافت [۱۳]. جاس و همکاران [۱۲] با افزودن بور افزایش سختی را از  $296 HV$  به  $452 HV$  گزارش نمودند. بارن و همکاران [۵۵] با مطالعه سیستم آلیاژی  $Fe-Mn-Ti-B$  ایجاد فاز سخت  $Ti_2B$  و افزایش استحکام و کاهش چگالی را گزارش کرده‌اند.

## ۱۰.۲ هیدروژن

هیدروژن در دستگاه‌های آلیاژی به عنوان عنصر آلیاژی مطرح نیست و همواره عنصری مزاحم است. با این حال، با توجه به اهمیت آن در این بخش به طور خلاصه به آن پرداخته می‌شود. طبق تحقیقات دانگ وانگ و همکاران [۴۴] روی سیستم آلیاژی  $Fe-22Mn-0.6C$  مشخص شد که افزودن هیدروژن موجب افزایش اصطکاک شبکه و کاهش اندازه ناحیه پلاستیک و باعث افزایش دمای انتقال شکست نرم به ترد می‌شود. حل شدن اتم‌های هیدروژن در داخل ترک‌ها و فصل مشترک‌ها، انرژی چسبندگی را در مرز دانه‌ها و صفحات اتمی کاهش می‌دهد. افزودن هیدروژن موجب افزایش لغزش صفحه‌ای و همچنین موجب افزایش پدیده تجمع نابجایی‌ها می‌شود. هیدروژن موجب افزایش تحرک نابجایی‌ها شده و ماده را نرم می‌کند بنابراین تنش تسلیم و تنش سیلان در صورت اضافه شدن هیدروژن شدیداً کاهش می‌یابند [۴۴]. هیدروژن موجب ایجاد پدیده گلویی شدن در فولادهای  $Ni-Cr-Mo$  گشته است، همچنین باعث گسترش ترک‌ها بین باندهای لغزشی و مرز دانه‌ها می‌شود و اشاعه ترک‌ها را سرعت می‌بخشد [۴۳].

## ۳ خلاصه و نتیجه‌گیری

تأثیر چندین عنصر آلیاژی مهم بر رفتار مکانیکی و ریزساختار فولادهای پیشرفته استحکام بالا با بررسی مقالات اخیر علمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. کربن، به عنوان مهم‌ترین عنصر آلیاژی در فولادها موجب بهبود

این عنصر از طریق ایجاد محلول جامد و رسوب سختی موجب افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی [۵۲] و نیز به واسطه تغییر شکل دوقلویی باعث افزایش نرخ کرنش سختی و افزایش درصد ازدیاد طول می‌گردد [۳۳]. رسوبات ناشی از افزودن وانادیوم تبلور مجدد را به تأخیر می‌اندازند [۴۸]. در حالت کلی فولادهای TRIP به خاطر داشتن زمینه فریتی نرم، استحکام تسلیم پایینی دارند [۴۹]. هی و همکاران [۴۹] با استفاده از مکانیزم‌های چندگانه شامل رسوبات وانادیوم، جنگل نابجایی‌ها، نانو دوقلویی‌ها و فریت بین‌دانه‌ای موفق به افزایش استحکام فولاد  $Fe-10Mn-0.47C-2Al-0.7V$  شدند. گزارش شده است که وانادیوم از طریق رسوب سختی و ایجاد کاربیدهای وانادیوم ( $V_4C_3$ ) موجب افزایش استحکام تسلیم می‌شود [۵۲]. به طوری که در سیستم آلیاژی با ۱۰ wt.% منگنز و ۰/۷ wt.% وانادیوم، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول به ترتیب  $1150-1200 MPa$ ،  $1800-1500 MPa$  و ۱۵٪ گزارش شده است [۱۴].

نیوبیوم استحکام تسلیم را بدون کاهش درصد ازدیاد طول ناهمگن افزایش می‌دهد [۲۰، ۲۱]. این عنصر موجب افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی از طریق ایجاد محلول جامد و رسوب سختی و نیز افزایش نرخ کرنش سختی و افزایش درصد ازدیاد طول با مکانیزم تغییر شکل دوقلویی می‌گردد [۳۳]. رسوبات ناشی از افزودن نیوبیوم تبلور مجدد را به تعویق می‌اندازند [۴۸]. تیتانیم از طریق ایجاد رسوبات ریزسختی را افزایش می‌دهد [۲۱، ۵۰، ۵۱]. همچنین از طریق ایجاد محلول جامد و رسوب سختی، موجب افزایش استحکام تسلیم، استحکام کششی، افزایش نرخ کرنش سختی و افزایش درصد ازدیاد طول ناشی از تغییر شکل دوقلویی می‌گردد [۳۳]. افزودن این عنصر موجب ایجاد رسوبات  $TiN$ ،  $TiC$  و  $Ti_4C_2S_6$  شده و رشد دانه را به تأخیر می‌اندازد [۵۰]. هان و همکاران [۵۰] گزارش کرده‌اند رسوبات  $TiC$  موجود در مرز دانه از رسوبات  $TiC$  موجود در داخل دانه برای جلوگیری از رشد دانه مؤثرترند. رسوبات ایجاد شده، از تبلور مجدد در نورد داغ تا دمای  $1100^\circ C$  جلوگیری می‌کنند [۳۲]. در یک آلیاژ منگنز متوسط و کم کربن، مقدار بهینه تیتانیم برای بهبود خواص مکانیکی به ویژه مدول یانگ و اصلاح اندازه دانه ۰/۱۵ wt.% گزارش شده است [۵۰].

## ۸.۲ نیتروژن

نیتروژن پایدارکننده آستنیت است [۴۷]. نیتروژن همانند برخی عناصر SFE را افزایش می‌دهد [۸، ۱۰، ۲۶، ۴۶، ۵۳]. افزودن این عنصر با کاهش مقدار منگنز، مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد [۲۱]. افزودن نیتروژن استحکام را بدون کاهش چقرمگی افزایش می‌دهد [۴۷] و نیز موجب می‌شود استحکام بدون کاهش درصد ازدیاد طول نسبی در فولادهای TWIP افزایش یابد [۴۹] و تأثیر آن روی بهبود استحکام تسلیم بیش از کربن گزارش شده است [۴۷]. افزودن کروم و نیتروژن دمای  $M_s$  را کاهش می‌دهد [۵۴]. طبق مطالعات پیشین بر روی آلیاژ  $Fe-24Mn-6.3Cr-0.2N$  حاوی مقادیر جزئی آلومینیم، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری، نانو رسوبات  $AIN$  مشاهده شد، این نانو رسوبات تأثیر زیادی روی استحکام

- Dierk. Impact of nanodiffusion on the stacking fault energy in high-strength steels. *Acta materialia*, 75:147-155, 2014.
- [7] De Cooman, Bruno C, Estrin, Yuri, and Kim, Sung Kyu. Twinning-induced plasticity (twip) steels. *Acta Materialia*, 142:283-362, 2018.
- [8] De Cooman, BC. High mn twip steel and medium mn steel. in *Automotive Steels*, pp. 317-385. Elsevier, 2017.
- [9] Lee, Tae-Ho, Ha, Heon-Young, Hwang, Byoungchul, Kim, Sung-Joon, and Shin, Eunjoo. Effect of carbon fraction on stacking fault energy of austenitic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(12):4455-4459, 2012.
- [10] Lee, Seung-Joon, Fujii, Hidetoshi, and Ushioda, Kohsaku. Thermodynamic calculation of the stacking fault energy in fe-cr-mn-cn steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 749:776-782, 2018.
- [11] Schramm, RE and Reed, RP. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*, 6(7):1345, 1975.
- [12] Aguilar-Hurtado, Jose, Vargas-Uscategui, Alejandro, Zambrano, Dario, and Palma-Hillerns, Rodrigo. The effect of boron content on the microstructure and mechanical properties of fe50-xmn30co10cr10bx ( $x=0, 0.3, 0.6$  and  $1.7$  wt.multi-component alloys prepared by arc-melting. *Materials Science and Engineering: A*, 748, 03 2019.
- [13] Emami, Mohammad, Askari-Paykani, Mohsen, Farabi, Ehsan, Beladi, Hossein, and Shahverdi, Hamid Reza. Development of new third-generation medium manganese advanced high-strength steels elaborating hot-rolling and intercritical annealing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(9):4261-4274, 2019.
- [14] Hu, Bin, Luo, Haiwen, Yang, Feng, and Dong, Han. Recent progress in medium-mn steels made with new designing strategies, a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 33(12):1457-1464, 2017.
- [15] Chen, Shangping, Rana, Radhakanta, Haldar, Arunansu, and Ray, Ranjit Kumar. Current state of fe-mn-al-c low density steels. *Progress in Materials Science*, 89:345-391, 2017.
- [16] Reeh, S, Music, D, Gebhardt, T, Kasprzak, M, Jäpel, T, Zaefferer, S, Raabe, D, Richter, S, Schwedt, A, Mayer, J, et al. Elastic properties of face-centred cubic fe-mn-c studied by nanoindentation and ab initio calculations. *Acta Materialia*, 60(17):6025-6032, 2012.
- [17] Dumay, A, Chateau, J-P, Allain, S, Migot, S, and Bouaziz, O. Influence of addition elements on the stacking-fault energy and mechanical properties of an austenitic fe-mn-c steel. *Materials Science and Engineering: A*, 483:184-187, 2008.
- [18] Fajardo, S, Llorente, Irene, Jiménez, José Antonio, Bastidas, JM, and Bastidas, David M. Effect of mn additions on the corrosion behaviour of twip fe-mn-al-si austenitic steel in chloride solution. *Corrosion Science*, 154:246-253, 2019.
- خواص استحکامی می‌گردد. منگنز با وجود تأثیرات متعدد، مهم‌ترین عنصر در پایدارسازی و تغییر در نقص چیدمان آستنیت در نسل‌های جدید فولادهای AHSS است. آلومینیم عمدتاً برای کاهش چگالی فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما در هر حال می‌تواند روی خواص استحکامی و کرنش-سختی فولادها نیز مؤثر باشد. سیلیسیم با تأثیراتی مشابه آلومینیم عمدتاً برای جلوگیری از تشکیل کاربیدها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به دلیل مشکلات ظاهری که حین گالوانیزه کردن ایجاد می‌کند، استفاده از آن با محدودیت روبروست. مس به دلیل ایجاد رسوبات نانومتری درون دانه‌ها قابلیت استحکام‌بخشی همراه با بهبود نرمی توجه بسیاری را به خود جلب نموده است. نیکل نیز به عنوان پایدارکننده آستنیت نقش چشم‌گیری در بهبود درصد تغییر طول نسبی آلیاژها ایفا کرده است. کروم در مقادیر کم به بهبود چقرمگی و استحکام تسلیم و سختی این فولادها کمک می‌کند. وانادیوم، نیوبوم و تیتانیوم به صورت میکروآلیاژی موجب کنترل اندازه دانه و ریزدانه‌گی شده و در نتیجه افزایش استحکام تسلیم را سبب می‌شوند. مولیبدن سختی‌پذیری آستنیت را بهبود می‌بخشد، موجب اصلاح اندازه دانه و افزایش سختی از طریق ایجاد رسوبات نانومتری می‌شود. نیتروژن بعنوان عنصری آستنیت‌زا مطرح است اما تأثیری بسیاری بر افزایش سختی و استحکام تسلیم بدون تأثیر منفی بر چقرمگی دارد. بور نیز با ایجاد رسوبات ریز بورایدی استحکام آلیاژ را افزایش می‌دهد اما تأثیر آن در افزایش استحکام مارتنیزیت نسبت به کربن کمتر است. تمامی عناصر ذکر شده روی افزایش و یا کاهش SFE آستنیت کمابیش تأثیر دارند که این امر به نوبه خود مکانیزم‌های تغییر شکل را کنترل می‌کند.

## مراجع

- [1] Roy, Tapas Kumar, Bhattacharya, Basudev, Ghosh, Chiradeep, and Ajmani, SK. *Advanced high strength steel*. Springer, 2018.
- [2] Demeri, Mahmoud Y. *Advanced high-strength steels. Science, Technology, and Application, ASM International, USA*, 2013.
- [3] Song, Hyejin, Sohn, Seok Su, Kwak, Jai-Hyun, Lee, Byeong-Joo, and Lee, Sunghak. Effect of austenite stability on microstructural evolution and tensile properties in intercritically annealed medium-mn lightweight steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(6):2674-2685, 2016.
- [4] Medvedeva, NI, Park, MS, Van Aken, David C, and Medvedeva, Julia E. First-principles study of mn, al and c distribution and their effect on stacking fault energies in fcc fe. *Journal of Alloys and Compounds*, 582:475-482, 2014.
- [5] Abbasi, Afshin, Dick, Alexey, Hickel, Tilmann, and Neugebauer, Jörg. First-principles investigation of the effect of carbon on the stacking fault energy of fe-c alloys. *Acta Materialia*, 59(8):3041-3048, 2011.
- [6] Hickel, Tilmann, Sandlöbes, Stefanie, Marceau, Ross KW, Dick, Alexey, Bleskov, Ivan, Neugebauer, Jörg, and Raabe,

- [31] Schmitt, Jean-Hubert and Iung, Thierry. New developments of advanced high-strength steels for automotive applications. *Comptes Rendus Physique*, 19(8):641-656, 2018.
- [۳۲] سعید، مجیدی، شهرام، خیراندیش، و مجید، عباسی. اثر آلومینیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پرمنگنز آستنیتی Fe-۱۸ Mn-۰/۶ C.
- [33] Liu, Shuai, Qian, Lihe, Meng, Jiangying, Li, Dongdong, Ma, Penghui, and Zhang, Fucheng. Simultaneously increasing both strength and ductility of fe-mn-c twinning-induced plasticity steel via cr/mo alloying. *Scripta Materialia*, 127:10-14, 2017.
- [34] Jung, Il-Chan and De Cooman, Bruno C. Temperature dependence of the flow stress of fe-18mn-0.6 c-xal twinning-induced plasticity steel. *Acta materialia*, 61(18):6724-6735, 2013.
- [35] Canadinc, D, Sehitoglu, Huseyin, Maier, HJ, and Chumlyakov, YI. Strain hardening behavior of aluminum alloyed hadfield steel single crystals. *Acta Materialia*, 53(6):1831-1842, 2005.
- [36] Abbaschian, Reza and Reed-Hill, Robert E. *Physical metallurgy principles*. Cengage Learning, 2008.
- [37] Lehnhoff, GR, Findley, KO, and De Cooman, BC. The influence of silicon and aluminum alloying on the lattice parameter and stacking fault energy of austenitic steel. *Scripta Materialia*, 92:19-22, 2014.
- [38] Yang, HK, Zhang, ZJ, Tian, YZ, and Zhang, ZF. Negative to positive transition of strain rate sensitivity in fe-22mn-0.6 cx (al) twinning-induced plasticity steels. *Materials Science and Engineering: A*, 690:146-157, 2017.
- [39] Koyama, Motomichi, Akiyama, Eiji, Lee, Young-Kook, Raabe, Dierk, and Tsuzaki, Kaneaki. Overview of hydrogen embrittlement in high-mn steels. *international journal of hydrogen energy*, 42(17):12706-12723, 2017.
- [40] Hamada, AS, Kisko, A, Khosravifard, A, Hassan, MA, Karjalainen, LP, and Porter, D. Ductility and formability of three high-mn twip steels in quasi-static and high-speed tensile and erichsen tests. *Materials Science and Engineering: A*, 712:255-265, 2018.
- [41] Tian, Xing and Zhang, Yansheng. Effect of si content on the stacking fault energy in  $\gamma$ -fe-mn-si-c alloys: Part i. x-ray diffraction line profile analysis. *Materials Science and Engineering: A*, 516(1-2):73-77, 2009.
- [42] Zhou, Tao, Babu, R Prasath, Odqvist, Joakim, Yu, Hao, and Hedström, Peter. Quantitative electron microscopy and physically based modelling of cu precipitation in precipitation-hardening martensitic stainless steel 15-5 ph. *Materials & Design*, 143:141-149, 2018.
- [43] Kwon, Young Jin, Lee, Taekyung, Lee, Junmo, Chun, Young Soo, and Lee, Chong Soo. Role of cu on hydrogen embrittlement behavior in fe-mn-c-cu twip steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23):7409-7419, 2015.
- [44] Wang, Dong, Lu, Xu, Deng, Yun, Guo, Xiaofei, and Barnoush, Afroz. Effect of hydrogen on nanomechanical properties in fe-22mn-0.6 c twip steel revealed by in-situ electrochemical nanoindentation. *Acta Materialia*, 166:618-629, 2019.
- [19] Sun, Binhan, Ding, Ran, Brodusch, Nicolas, Chen, Hao, Guo, Baoqi, Fazeli, Fateh, Ponge, Dirk, Gauvin, Raynald, and Yue, Stephen. Improving the ductility of ultrahigh-strength medium mn steels via introducing pre-existed austenite acting as a "reservoir" for mn atoms. *Materials Science and Engineering: A*, 749:235-240, 2019.
- [20] Cai, Minghui, Li, Zhun, Chao, Qi, and Hodgson, Peter D. A novel mo and nb microalloyed medium mn trip steel with maximal ultimate strength and moderate ductility. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(12):5624-5634, 2014.
- [21] Hamada, Atef, Juuti, Timo, Khosravifard, Ali, Kisko, Anna, Karjalainen, Pentti, Porter, David, and Kömi, Jukka. Effect of silicon on the hot deformation behavior of microalloyed twip-type stainless steels. *Materials & Design*, 154:117-129, 2018.
- [۲۲] فتح الحسینی، آرش، علی زاد، سجاد، و اسدی اسدآباد، محسن. بررسی مقایسه ای رفتار خوردگی چهار فولاد آستنیتی کروم و منگنزدار و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ کم کربن در محلول ۱/۰ مولار اسید سولفوریک. *دوفصلنامه مهندسی متالورژی و مواد*، ۲۵(۲)، ۱۳۹۳.
- [23] Limmer, KR, Medvedeva, Julia E, Van Aken, David C, and Medvedeva, NI. Ab initio simulation of alloying effect on stacking fault energy in fcc fe. *Computational Materials Science*, 99:253-255, 2015.
- [24] Pierce, Donald T, Jiménez, Jose Antonio, Bentley, James, Raabe, Dierk, and Wittig, James E. The influence of stacking fault energy on the microstructural and strain-hardening evolution of fe-mn-al-si steels during tensile deformation. *Acta Materialia*, 100:178-190, 2015.
- [25] Li, ZC, Zhang, XT, Mou, YJ, Misra, RDK, He, LF, and Li, HP. The impact of intercritical annealing in conjunction with warm deformation process on microstructure, mechanical properties and trip effect in medium-mn trip steels. *Materials Science and Engineering: A*, 746:363-371, 2019.
- [26] Huang, BX, Wang, XD, Wang, L, and Rong, YH. Effect of nitrogen on stacking fault formation probability and mechanical properties of twinning-induced plasticity steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(4):717-724, 2008.
- [27] Kalsar, Rajib, Ray, Ranjit Kumar, and Suwas, Satyam. Effects of alloying addition on deformation mechanisms, microstructure, texture and mechanical properties in fe-12mn-0.5 c austenitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 729:385-397, 2018.
- [28] Jeong, JS, Woo, W, Oh, KH, Kwon, SK, and Koo, YM. In situ neutron diffraction study of the microstructure and tensile deformation behavior in al-added high manganese austenitic steels. *Acta Materialia*, 60(5):2290-2299, 2012.
- [29] Kim, Min Tae, Park, Tak Min, Baik, Kyeong-Ho, Choi, Won Seok, and Han, Jeongho. Effects of cold rolling reduction ratio on microstructures and tensile properties of intercritically annealed medium-mn steels. *Materials Science and Engineering: A*, 752:43-54, 2019.
- [30] Jeong, Kookhyun, Jin, Jae-Eun, Jung, Yeon-Seung, Kang, Singon, and Lee, Young-Kook. The effects of si on the mechanical twinning and strain hardening of fe-18mn-0.6 c twinning-induced plasticity steel. *Acta materialia*, 61(9):3399-3410, 2013.

- [45] Lee, Sangwon, Kim, Jinkyung, Lee, Seok-Jae, and De Cooman, Bruno C. Effect of cu addition on the mechanical behavior of austenitic twinning-induced plasticity steel. *Scripta Materialia*, 65(12):1073–1076, 2011.
- [46] Lee, Seung-Joon, Jung, Yeon-Seung, Baik, Sung-Il, Kim, Young-Woon, Kang, Mihyun, Woo, Wanchuck, and Lee, Young-Kook. The effect of nitrogen on the stacking fault energy in fe-15mn-2cr-0.6 c-xn twinning-induced plasticity steels. *Scripta Materialia*, 92:23–26, 2014.
- [47] Wang, XJ, Sun, XJ, Song, Cheng, Chen, H, Han, W, and Pan, F. Enhancement of yield strength by chromium/nitrogen alloying in high-manganese cryogenic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 698:110–116, 2017.
- [48] Han, Y, Shi, J, Xu, L, Cao, WQ, and Dong, H. Effect of hot rolling temperature on grain size and precipitation hardening in a ti-microalloyed low-carbon martensitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 553:192–199, 2012.
- [49] He, BB, Huang, BM, He, SH, Qi, Y, Yen, HW, and Huang, MX. Increasing yield strength of medium mn steel by engineering multiple strengthening defects. *Materials Science and Engineering: A*, 724:11–16, 2018.
- [50] Han, Y, Shi, J, Xu, L, Cao, WQ, and Dong, H. Effects of ti addition and reheating quenching on grain refinement and mechanical properties in low carbon medium manganese martensitic steel. *Materials & Design*, 34:427–434, 2012.
- [51] Han, Y, Shi, J, Xu, L, Cao, WQ, and Dong, H. Tic precipitation induced effect on microstructure and mechanical properties in low carbon medium manganese steel. *Materials Science and Engineering: A*, 530:643–651, 2011.
- [52] He, BB, Huang, BM, He, SH, Qi, Y, Yen, HW, and Huang, MX. Increasing yield strength of medium mn steel by engineering multiple strengthening defects. *Materials Science and Engineering: A*, 724:11–16, 2018.
- [53] Lee, Seung-Joon, Fujii, Hidetoshi, and Ushioda, Kohsaku. Thermodynamic calculation of the stacking fault energy in fe-cr-mn-cn steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 749:776–782, 2018.
- [54] Jiang, Bohong, Qi, Xuan, Yang, Shaoxiong, Zhou, Weiming, and Hsu, TY. Effect of stacking fault probability on  $\gamma$ - $\epsilon$  martensitic transformation and shape memory effect in fe-mn-si based alloys. *Acta materialia*, 46(2):501–510, 1998.
- [55] Baron, Christian, Springer, Hauke, and Raabe, Dierk. Effects of mn additions on microstructure and properties of fe-tib2 based high modulus steels. *Materials & Design*, 111:185–191, 2016.