

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

دانشکده معدن و متالورژی

کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد فلزی

بهینه سازی خواص مکانیکی فولاد TRIP پر آلیاژ از طریق کنترل ترکیب شیمیایی

نگارش:

مجتبی فلاحتی نژاد

اساتید راهنما:

دکتر نادر پروین

دکتر کامران دهقانی

استاد مشاور:

مهندس سید مهدی عباسی

اسفند ۱۳۸۴

## چکیده

پدیده Transformation Induced Plasticity اولین بار در آلیاژهای Fe-Ni مشاهده شد، که در اثر وقوع این پدیده، شکل‌پذیری فولادهای استحکام بالا، افزایش می‌یابد. این پدیده علاوه بر ترکیب شیمیایی فولاد نیاز به سیکل ترمومکانیکی خاصی دارد تا استحاله را کنترل کند. فولادهای TRIP ترکیب مناسبی از استحکام، داکتیلیتی، چقرمگی و مقاومت به خوردگی را دارا می‌باشند. به دلیل خاصیت جذب انرژی بالا، این فولادها امروزه در صنایع اتومبیل کاربرد دارند.

هدف از اجرای این پروژه بررسی پدیده در فولادهای پر آلیاژ، شناخت خواص مکانیکی و چگونگی دستیابی به خواص مطلوب از طریق کنترل ترکیب شیمیایی و همچنین بهینه‌سازی فرآیندهای ترمومکانیکی می‌باشد. در این پروژه با بررسی خواص عناصر آلیاژی و تاثیر آن بر فرآیند TRIP، ۵ ذوب با ترکیب شیمیایی متفاوت ریخته شد. از آنجایی که ترکیب شیمیایی فولادهای TRIP پرآلیاژ مشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتی است لذا شمش‌های ریخته شده حاوی مقادیر بالای کروم و نیکل می‌باشند. این شمش‌ها پس از اعمال سیکل‌های ترمومکانیکی از نظر خواص مکانیکی بررسی گردیدند. سپس به منظور مشاهده اثر نیویوم در این فولادها مقادیر مختلفی از این عنصر به ترکیب فولاد اضافه شد. در انتها با جمع بندی نتایج بدست آمده و بررسی اثر عنصر نیویوم در پدیده TRIP ترکیب مناسب فولاد TRIP پر آلیاژ تعیین گردید.

بر اساس آزمایشهای انجام شده، فولادی با خواص مکانیکی مطلوب، استحکام نهایی کششی ۱۵۶۴ MPa و ازدیاد طول ۴۰ درصد تهیه گردید. به منظور بررسی دقیق پدیده TRIP، تعیین میزان آستنیت باقیمانده در ادامه کار پیشنهاد می‌شود.

## کلمات کلیدی:

TRIP، آستنیت (Austenite)، مارتنزیت (Martensite)، فرآیند ترمومکانیکی (Thermomechanical Processing)، ترکیب شیمیایی (Chemical composition).

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مروری بر منابع
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- انواع فولادهای TRIP
۴	۳-۱- معرفی برخی از خواص فولادهای TRIP
۵	۴-۱- کاربرد فولادهای TRIP
۸	۵-۱- متالورژی فیزیکی فولادهای TRIP
۸	۱-۵-۱- ماهیت غیر نفوذی استحاله مارتنزیت
۸	۲-۵-۱- ماهیت جابجایی
۹	۳-۵-۱- انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل
۹	۴-۵-۱- ویژگیهای سینتیکی
۱۰	۵-۵-۱- فرآیندهای جوانه زنی و رشد
۱۰	۶-۵-۱- استحاله TRIP
۱۳	۷-۵-۱- دو قلوبی‌های تغییر شکلی در آستنیت
۱۶	۶-۱- روشهای تعیین مقدار آستنیت باقیمانده در فولادهای TRIP
۱۷	۷-۱- عوامل موثر در پدیده TRIP
۱۷	۱-۷-۱- دما
۱۸	۲-۷-۱- کرنش و کرنش سختی
۲۰	۳-۷-۱- ترکیب شیمیایی

۲۳	۸-۱- فولادهای زنگ نزن
۲۴	۱-۸-۱- کروم
۲۷	۲-۸-۱- نیکل
۲۹	۳-۸-۱- سایر عناصر آلیاژی
۳۲	۹-۱- نیویوم
۳۴	۱-۹-۱- حلالیت رسوبات نیویوم
۳۷	۲-۹-۱- بررسی اثر نیویوم بر دمای $M_s$
۳۸	۳-۹-۱- تاثیر نیویوم بر ساختار آستنیت و رسوبات تشکیل شده
۴۱	۴-۹-۱- نیویوم در محلول جامد
۴۱	۵-۹-۱- کاربیدها و نیتريدهای نیویوم
۴۳	فصل دوم: روش انجام آزمایش
۴۴	۱-۲- شمای کلی روش انجام آزمایش
۴۵	۲-۲- آلیاژ سازی
۴۶	۳-۲- تهیه قالب و پوشش قالب
۴۷	۴-۲- ذوب ریزی
۴۷	۵-۲- برشکاری
۴۷	۶-۲- کوانتومتری
۴۸	۷-۲- عملیات حرارتی و محیط کوئنچ
۴۸	۸-۲- نورد نمونه‌ها
۴۹	۹-۲- سیکلهای ترمومکانیکی

۵۱	۱۰-۲- تهیه نمونه‌های کشش
۵۲	۱۱-۲- آزمایش کشش
۵۳	۱۲-۲- آزمایش سختی سنجی
۵۳	۱۳-۲- آزمایش جذب آهنربا
۵۳	۱۴-۲- تهیه نمونه‌های متالوگرافی
۵۴	۱۵-۲- بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها
۵۵	فصل سوم: نتایج و بحث
۵۶	۱-۳- بررسی شمشهای ریخته شده
۵۶	۱-۱-۳- نتایج کوانتومتری از نمونه‌های ریخته شده
۵۷	۲-۱-۳- بررسی آخال در شمشهای ریخته‌گری
۶۰	۳-۱-۳- اثر ترکیب شیمیایی بر ریزساختار حاصل از ریخته‌گری
۶۳	۴-۱-۳- بررسی تبلور مجدد دینامیکی
۶۶	۵-۱-۳- شکست حین نورد در $1200^{\circ}\text{C}$ در ذوب T4
۶۹	۶-۱-۳- بررسی ورقهای تولیدی بعد از نورد در $450^{\circ}\text{C}$
۷۳	۲-۳- آزمون کشش
۷۳	۱-۲-۳- بررسی اثر ترکیب شیمیایی روی خواص مکانیکی
۷۹	۲-۲-۳- بررسی اثر محیط کوئنچ بر خواص مکانیکی
۸۱	۳-۲-۳- بررسی اثر سیکلهای مختلف ترمومکانیکی بر خواص مکانیکی

۸۷	۳-۲-۴- بررسی اثر نیویوم بر خواص مکانیکی فولاد TRIP
۹۲	۳-۳- سختی سنجی
۹۳	۳-۴- بررسی رسوبات تشکیل شده توسط EDAX
۹۹	۳-۵- بررسی رسوبات ریز در شکل‌های SEM
۱۰۱	۳-۶- تاثیر مدت زمان اچ کردن در ساختارهای SEM
۱۰۲	۳-۷- شکست شناسی
۱۰۸	فصل چهارم: نتیجه‌گیری
۱۰۹	نتیجه‌گیری
۱۱۱	پیشنهادات
۱۱۲	مراجع

**فصل اول:**

**مروری بر منابع**

## ۱-۱- مقدمه

افزایش قابل ملاحظه پلاستیسیته در اثر اعمال بار خارجی که ناشی از تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت می‌باشد را پدیده TRIP (Transformation Induced Plasticity) گویند. [۱]

اولین مشاهدات مربوط به افزایش غیر منتظره در شکل پذیری بعلت استحاله آستنیت - مارتنزیت مربوط به ۶۰ سال قبل است. در سال ۱۹۳۷، Gunther Wassermann در انستیتو متالورژی برلین، این پدیده را در آلیاژ Fe-Ni با حدود ۵۰٪ نیکل مشاهده کرد، که به علت تغییر فاز، توانست به مقادیر بالای تغییر شکل دست یابد. در سال ۱۹۶۷، Zackay و همکارانش به شرح این پدیده پرداختند، که چگونه استحاله در فولادهای آستنیتی، داکتیلیتی فولادهای استحکام بالا را افزایش می‌دهد. او این پدیده را به نام استحاله متأثر از کرنش نامید و نام مخفف آن را TRIP نهاد. [۲]

تا دهه ۷۰، تمام کاربردهای تکنیکی از اثر TRIP روی فولادهای زنگ نزن متمرکز بوده است. در اواخر دهه ۸۰ وجود آستنیت باقیمانده در فولادهای کم آلیاژی احتمال استفاده از اثر TRIP برای بهبود شکل پذیری در این فولادها را افزایش داد. برای این منظور علاوه بر کنترل ترکیب شیمیایی، نیاز به عملیات حرارتی خاصی است که رفتار استحاله را کنترل کند و از رسوب کاربید در آستنیت باقیمانده جلوگیری نماید. [۲]

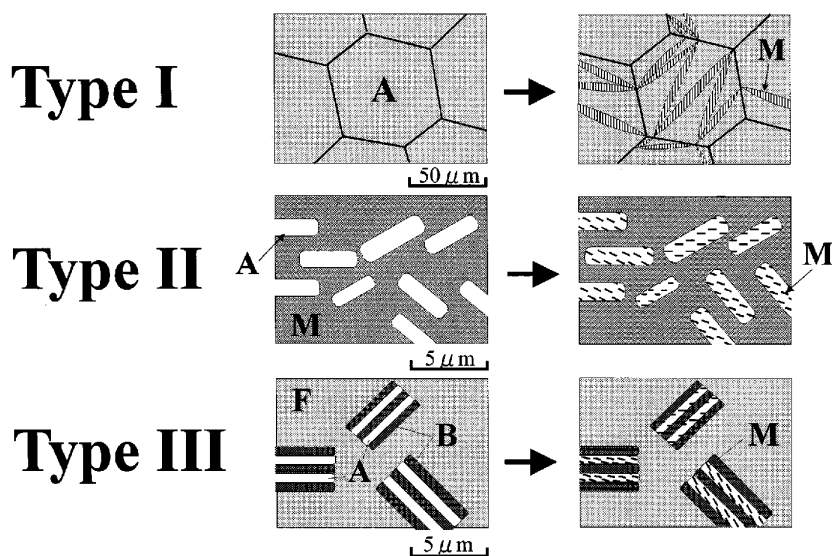
پدیده TRIP در فولادهای چند فازه کم آلیاژی شامل فاز آستنیت ناپایدار نیز مشاهده می‌شود. این فولادها بنام TRIP-aided یا فولادهای آستنیت باقیمانده شناخته می‌شوند. [۲]



## ۲-۱- انواع فولادهای TRIP

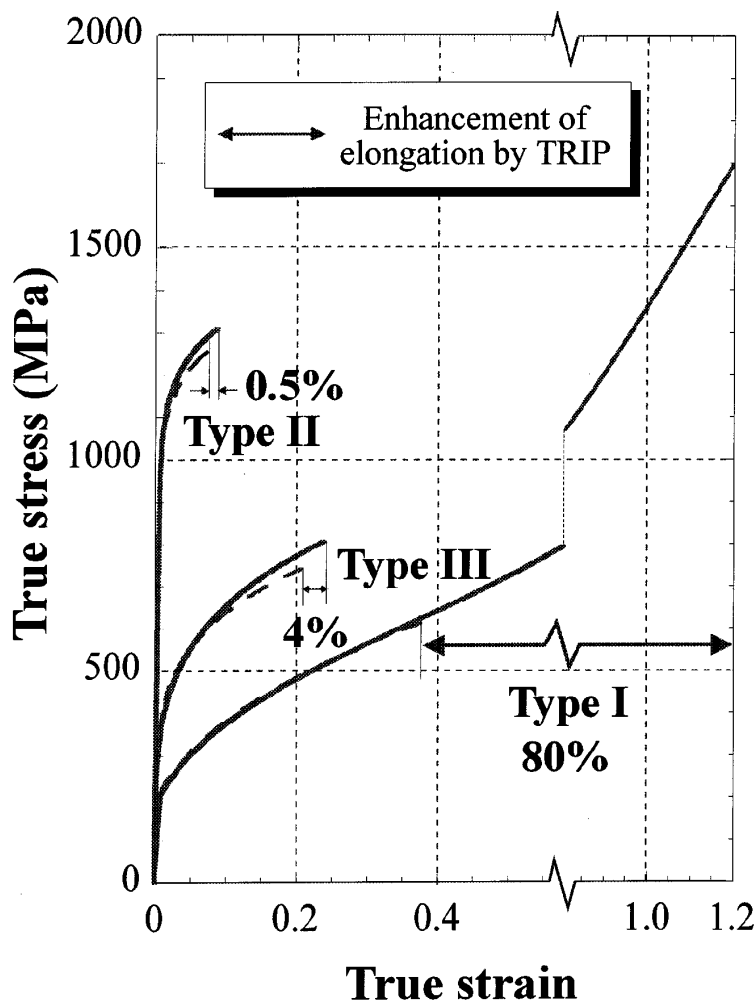
سه نوع مختلف از فولادهای TRIP در طی استحاله در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در نوع I ریز ساختار ترکیب آستنیت و مارتنزیت استحاله یافته در طی تغییر شکل است. چنین پدیده‌ای در فولادهای آستنیتی مشاهده می‌شود ولی کاربرد مهندسی این فولادها به علت عناصر آلیاژی بالا و هزینه زیاد محدود است. در نوع II آستنیت باقیمانده در زمینه مارتنزیت تمپر شده وجود دارد که توسط فرآیند استحاله مارتنزیت متاثر از کرنش تبدیل به مارتنزیت لایه‌ای می‌شود. در این مورد بهبود ازدیاد طول، کم می‌باشد. [۳]

اخیراً ورقهای فولادی استحکام بالا با مقدار Si زیاد برای کاربرد در اتومبیل به بازار عرضه شده است. در نوع III، ریز ساختار بینایت در زمینه فریت است و در نزدیکی بینایت، آستنیت باقیمانده همانند شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود. آستنیت باقیمانده با فرآیند استحاله مارتنزیت متاثر از کرنش تبدیل به مارتنزیت نوع II لایه‌ای می‌شود. به علت میزان پایین آلیاژ، بیشتر توجهات روی نوع III متمرکز است و در اینجا این سوال مطرح است که چرا با وجود میزان آستنیت باقیمانده کم، مانند نوع II، این فولادها ازدیاد طول عالی دارند. [۳]



شکل ۱-۱ - تغییر شماتیک ریز ساختار طی تغییر شکل در ۳ نوع فولاد TRIP [۳]

مقایسه بین سه نوع مختلف TRIP در شکل ۱-۲ آمده است. اختلاف بین TRIP نوع II و III مربوط به استحکام مارتنزیت القا شده توسط کرنش است. [۳]



شکل ۱-۲ - گزارش بهبود تغییر طول در سه نوع فولاد TRIP [۳]

### ۳-۱- معرفی برخی از خواص فولادهای TRIP

فولادهای TRIP ترکیب مناسبی از استحکام، داکتیلیتی، چقرمگی و مقاومت به خوردگی را دارا می‌باشند. آلیاژهایی با استحکام تسلیم  $1240 \text{ MPa}$  و  $25$  تا  $40\%$  ازدیاد طول، از آلیاژسازی و فرآیند ترمومکانیکی مناسب بدست می‌آید. چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای معتبری برای فولادهای TRIP موجود نیست، اما مقدار  $K_{IC}$  آنها، احتمالاً بیش از  $110 \text{ MNm}^{-\frac{3}{2}}$  است. بعلاوه مقاومت به خوردگی کلی TRIPها برابر با سری  $300$  فولادهای زنگ نزن استنیتی است. [۴]

اگر چه فولادهای پر استحکام در معرض تردی هیدروژنی و ترک خوردگی تنش (SCC) هستند، ولی فولادهای TRIP، مقاومت خوبی به تردی دارند و هنگامیکه بعنوان کاتد برای هیدروژن شارژ می‌شوند، شکست را به تعویق می‌اندازند. [۴]

فولادهای TRIP در محیط هیدروژنی ترد می‌شوند و در حضور هیدروژن به شیار حساس می‌باشند. نمونه‌های بدون شیار در مدت کوتاهی پس از تسلیم و با داکتیلیتی محدود می‌شکنند. به علت واکنش بین هیدروژن و مارتنزیت بدست آمده از تنش در طی تغییر شکل، استحکام و داکتیلیتی کاهش می‌یابد. [۴]

مارتنزیت القا شده توسط تغییر شکل استحکام آلیاژ را بالا می‌برد. هنگامیکه گلوبی اتفاق می‌افتد، آستنیت باقیمانده در منطقه گلوبی در اثر اعمال تغییر شکل به مارتنزیت تبدیل می‌شود. منطقه استحاله یافته تنش سیلان بالاتری در مقایسه با منطقه استحاله نیافته مجاور دارد. لذا پیشرفت گلوبی متوقف شده و بلافاصله منطقه مجاور گلوبی تغییر شکل داده و به مارتنزیت تبدیل می‌شود. [۵]

استحاله فازی که در طی تغییر شکل پلاستیک اتفاق می‌افتد، انرژی کرنشی شکست را جذب می‌کند. در غیر اینصورت این انرژی می‌تواند باعث گسترش شکست شود، در نتیجه پتانسیل تافنس افزایش می‌یابد. بایستی خاطر نشان کرد که سهم خالص تافنس از استحاله فازی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. زیرا مارتنزیت نسبت به آستنیت تردتر می‌باشد، بنابراین انرژی جذب شده برای تشکیل مارتنزیت در نوک ترک باید بیشتر از مقداری باشد که تردی ذاتی مارتنزیت را جبران کند. تافنس شکست در دماهایی کمتر از دمای اتاق بسیار بیشتر از مقادیر برونمایی شده از مقادیر دمایی بالاست، که نشان می‌دهد، استحاله آستنیت به مارتنزیت سهم اساسی روی تافنس شکست آلیاژهای TRIP در دمای اتاق دارد. [۶]

## ۱-۴- کاربرد فولادهای TRIP

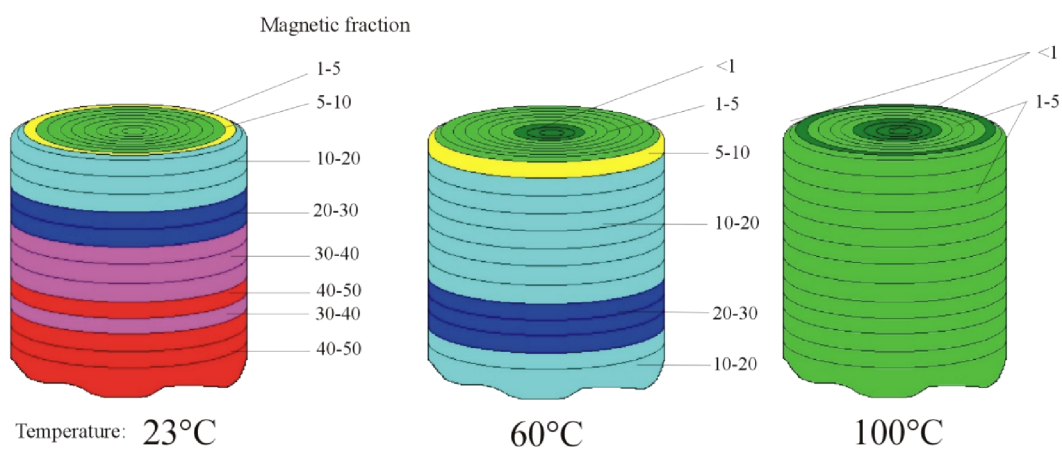
معمولاً دارا بودن استحکام و داکتیلیتی بالا در مواد مهندسی مورد نیاز می‌باشد، اما تئوری و تجربه بر این باور است که استحکام و داکتیلیتی با هم نسبت عکس دارند. [۷] برای بسیاری از کاربردها افزایش استحکام همراه با حفظ شکل پذیری از اهداف استفاده از مواد است. استحکام و داکتیلیتی بالا که در فولادهای TRIP مشاهده می‌شود، به این نیاز صنعت پاسخ می‌گوید.

معیار طراحی در ماشینهای مدرن در اروپا ایمنی است. این کار نیازمند طراحی مخصوص بدنه ماشین است که دارای استحکام بالا و جذب انرژی مناسب طی بار گذاری دینامیک باشند. [۲]

روشهای جدید شکل دهی مانند هیدرو فرمینگ نیاز به موادی با نرخ کرنش سختی بالا دارند تا از نازک شدن سریع در اثر مقادیر بالای کرنش جلوگیری شود. تجربه نشان داده است که

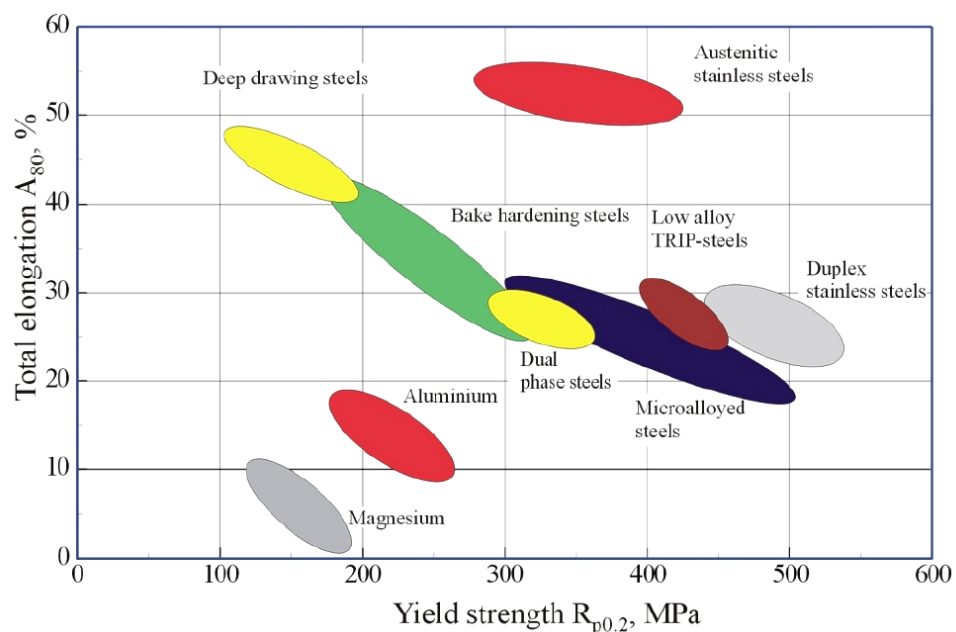
فولادهای TRIP از مزایای زیادی برای قطعات هیدرو فرمینگ برخوردار است. [۲] مارتنزیت تولیدی در طی کرنش می‌تواند از وقوع خرابی زود هنگام گلوبی با افزایش نرخ کرنش سختی جلوگیری نماید. [۷]

همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، اگر یک ورق از فولاد آستنیتی بصورت فنجان در آید، قسمتی از آن تغییر فاز داده و آستنیت تبدیل به مارتنزیت می‌شود، در قسمتهایی که تغییر شکل شدیدتر است، سیگنالهای مغناطیسی نشان دهنده مقدار استتاله مارتنزیت بیشتری است. [۲]



شکل ۱-۳ - توزیع مارتنزیت در فنجان استوانه‌ای کشش عمیق شده فولاد زنگ نزن آستنیتی 1.4301، نسبت حجمی مارتنزیت توسط اندازه‌گیری مغناطیسی تعیین شده [۲]

به منظور مقایسه حیطه کاربرد فولادهای مختلف و فولادهای TRIP، مقایسه خواص مکانیکی فولادهای mild و استحکام بالای مختلف به همراه آلیاژهای معمولی Al و Mg برای بدنه خودرو در شکل ۱-۴ آمده است. [۲]



شکل ۱-۴- رابطه بین داکتیلیتی و استحکام فولادهای نورد سرد شده و آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم [۲]

## ۱-۵-۵- متالورژی فیزیکی فولادهای TRIP

قبل از بررسی پارامترهای مختلف استحاله فولادهای TRIP به تعاریف اولیه استحاله حالت جامد در فلزات پرداخته می‌شود.

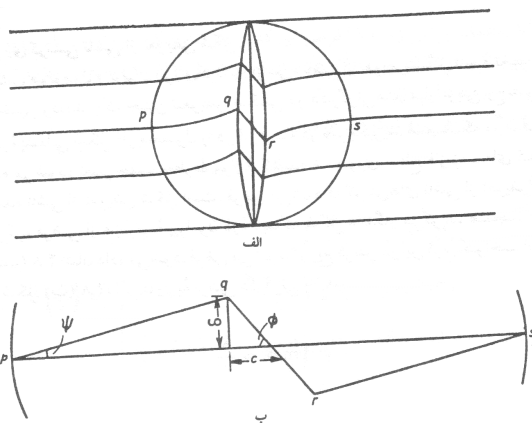
### ۱-۵-۱- ماهیت غیر نفوذی استحاله مارتنزیت

در حین استحاله مارتنزیتی، هر اتمی تمایل به حفظ نخستین همسایه‌های خود دارد. تبادل مکانی در بین اتمها که معمولاً در یک تحول نفوذی برقرار است، در این دگرگونی وجود ندارد. بدین ترتیب رشد کنترل شونده با فصل مشترک و نفوذ دامنه کوتاه و بلند در استحاله مارتنزیتی وجود ندارد. اما در برخی دگرگونی‌های مارتنزیتی مثلاً برگشت همزمان مارتنزیت تشکیل شده در فولادها، ممکن است به طور ضمنی نفوذ وجود داشته باشد. [۸]

البته عدم نفوذ دامنه بلند به این معنا است که در حین دگرگونی مارتنزیتی، ترکیب شیمیایی تغییر نمی‌کند. از عدم نفوذ دامنه کوتاه و این حقیقت که هر اتمی میل دارد اتم‌های مجاورش را حفظ کند، چنین استنباط می‌شود که یک فاز منظم در اثر دگرگونی مارتنزیتی به فاز منظم دیگری تبدیل می‌شود. [۸]

### ۱-۵-۲- ماهیت جابجایی

ماهیت استحاله مارتنزیتی از نوع جابجایی است و با یک فرآیند برش رخ می‌دهد. هنگامیکه محصول استحاله به سطح آزاد ماده می‌رسد، برش سبب برجستگی‌های سطحی می‌شود. همچنانکه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است، خطوط یا خراشهای عمودی ایجاد شده روی سطح صیقلی، بعد از استحاله بدون از دست دادن پیوستگی خود در فصل مشترک، کج می‌شوند. این فصل مشترک یک صفحه کریستالوگرافی کاملاً معین با شاخص‌های میلر ویژه است. این صفحه به عنوان صفحه رابط شناخته می‌شود. مشاهداتی از قبیل پیوستگی خطوط یا خراش‌ها در فصل مشترک بیانگر آن است که صفحه رابط، صفحه‌ای بدون اعوجاج و بدون دوران است. [۸]



شکل ۵-۱ - تغییر جهت خطوط خراشی در هنگام تغییر شکل ناحیه دگرگون شده [۸]

### ۱-۵-۳- انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل

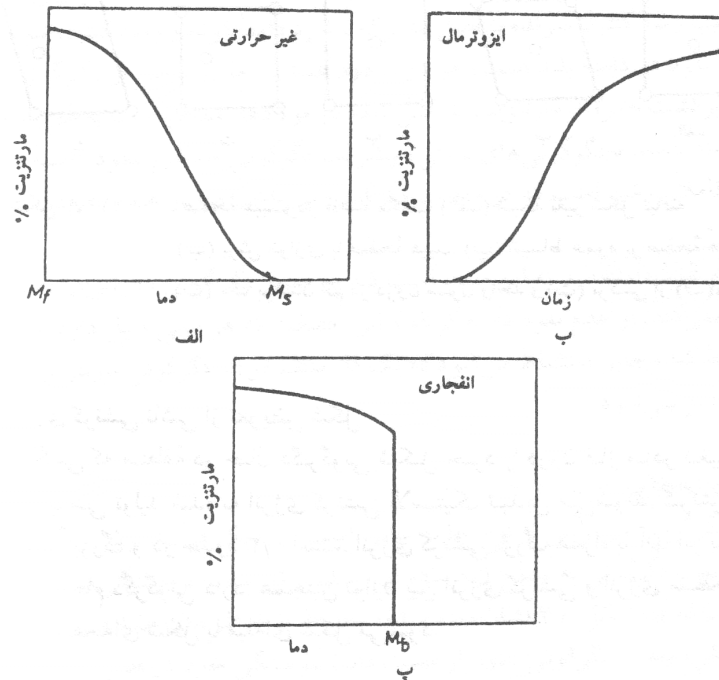
هنگامیکه منطقه در حال دگرگونی شکل خود را درون فاز آستنیت تغییر می‌دهد، کرنش برشی تولید شده به انرژی کرنش الاستیک تبدیل می‌شود. کرنش برشی در فولادها، نسبتاً بزرگ و در حدود ۰/۲ است. این انرژی کرنشی، اثر بازدارندگی شدیدی در انجام دگرگونی دارد. [۸]

### ۱-۵-۴- ویژگیهای سینتیکی

معمولاً مارتنزیت به صورت غیر حرارتی یعنی بدون کمک ظاهری انرژی حرارتی تشکیل می‌شود. همانطور که در شکل ۱-۶ (الف) نشان داده می‌شود، این دگرگونی در دمای کاملاً معین  $M_s$ ، آغاز و در دمای پایینتر  $M_f$  تقریباً کامل می‌شود. تغییر شکل پلاستیک فاز آستنیت در دمایی بالاتر از دمای  $M_s$  سبب تحریک دگرگونی می‌شود. بالاترین دمایی که تغییر شکل پلاستیک سبب تحریک دگرگونی می‌شود به  $M_d$  موسوم است، که متناظر با آن  $A_d$  تعریف می‌شود. [۸] که در ادامه به بررسی بیشتر آن پرداخته می‌شود.

همانطور که در شکل ۱-۶ (ب) نشان داده می‌شود، در برخی آلیاژها، دگرگونی مارتنزیتی به طور ایزوترمال یعنی در دمایی ثابت به صورت تابعی از زمان انجام می‌شود، در اینجا برای جوانه‌زنی مارتنزیت، فعال سازی حرارتی کاملاً ضروری است. [۸]

همانطور که در شکل ۱-۶ (پ) نشان داده می‌شود، در آلیاژهای دیگر، به ویژه هنگامیکه محدوده دگرگونی پایینتر از دمای اتاق است، در یک دمای مشخصه  $M_b$  دگرگونی مارتنزیتی به صورت انفجاری آغاز می‌شود، مقدار مارتنزیت تشکیل شده در  $M_b$  بین ۱۰ تا ۶۰٪ است. [۸]



شکل ۱-۶ - سه نوع سینتیک، الف- غیر حرارتی- ب- ایزوترمال- پ- انفجاری [ ۸ ]

### ۱-۵-۵- فرآیندهای جوانه زنی و رشد

تغییرات فازی مختلف که دارای نقش مهمی در نظریه جوانه زنی کلاسیک اند، در جوانه زنی مارتنزیت نقش چندانی ندارند. در اینجا حرکت نابجاییهای مرز در حال پیشروی، بر سینتیک جوانه زنی غلبه دارد. عمدتاً این حرکت پدیده‌ای با سرعت زیاد است که وابستگی زمانی آن قابل اندازه‌گیری نیست. سرعت‌ها مستقل از دما و دارای مقادیر یکسانی برای انواع سینتیک‌های مختلف‌اند. با این سرعت‌های بالا، کنترل کننده بودن رشد در دگرگونی‌های مارتنزیتی غیر ممکن است. [ ۸ ]

### ۱-۶-۵- استحاله TRIP

در فولادهای TRIP، فاز آستنیت در سرد کردن تا دمای اتاق پایدار باقی می‌ماند. در این فولادها، اگر چه  $M_s$  زیر درجه حرارت اتاق است، اما  $M_d$  بسوی منطقه مثبت دمایی شیفت یافته است. تغییر شکل در درجه حرارت اتاق منجر به تشکیل مارتنزیت می‌شود. بنابراین، استحاله آستنیت به مارتنزیت در طی آزمایش یا کار رخ می‌دهد. [ ۹ ]

استحاله  $\alpha' \rightarrow \gamma$  در طول صفحات {220} آستنیت آغاز می‌شود. [ ۱۰ ] در مورد فولادهای TRIP، استحاله  $\alpha' \rightarrow \gamma$  طی تغییر شکل پلاستیک منجر به استحکام به همراه داکتیلیتی

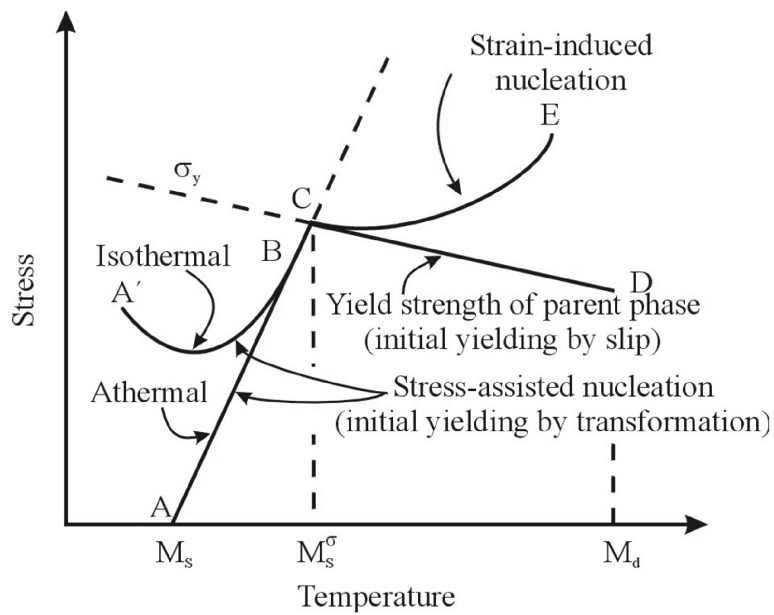


می‌شود. استحاله دیگر مارتنزیت  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  علت بازیافت کامل شکل در فولادهای حافظه‌دار پایه آهن (SMAs) Shape Memory Alloys است. [۱۱]

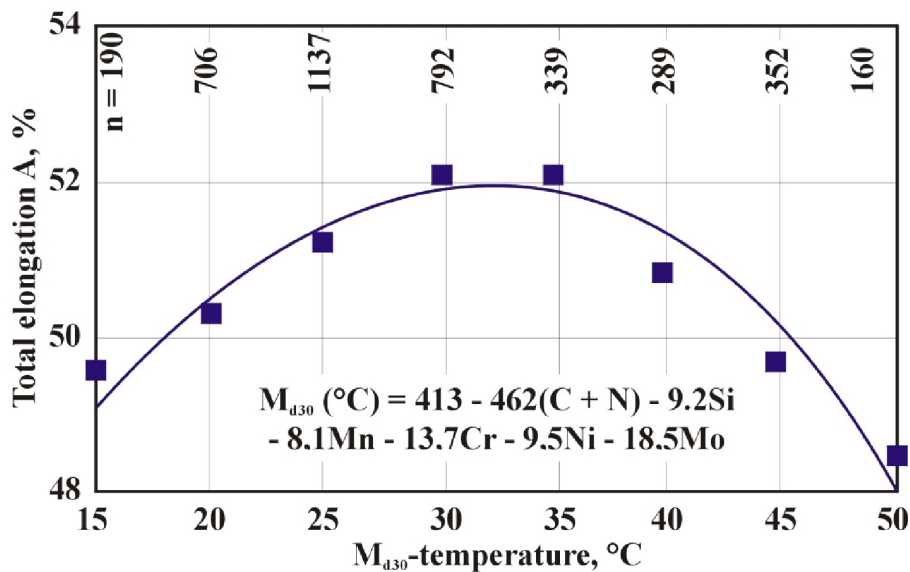
در مورد استحاله مارتنزیت در فولادهای TRIP پراپلاژ، ساختار کریستالوگرافی از FCC آستنیت به BCT (Body Centered Tetragonal) مارتنزیت، تغییر می‌کند. وقوع استحاله مارتنزیت در فولاد TRIP با تغییر حجم منطقه استحاله یافته همراه است، در نتیجه نواحی اطراف برای آزاد سازی تنش بصورت پلاستیک در می‌آیند. [۱۱]

استحاله فاز آستنیت به مارتنزیت با کرنش همراه است، در طی استحاله، طول محور آستنیت FCC، افزایش و یا کاهش داشته و منجر به تشکیل شبکه BCT مارتنزیت می‌شود. [۱۱]

یکی از مشخصه‌های کلیدی برای ایجاد اثر TRIP، کنترل رفتار استحاله آستنیت به مارتنزیت در طی تغییر شکل است. برای این منظور باید تغییر شکل بالاتر از دمای شروع استحاله مارتنزیت اعمال شود، ولی در پایین تر از دمایی باشد که پایداری مکانیکی فاز آستنیت را مشخص می‌کند. پایین دمای  $M_s$  فاز آستنیت از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است و استحاله مارتنزیت بدون نیاز به تغییر شکل اتفاق می‌افتد. در بالای  $M_s$ ، آستنیت می‌تواند در اثر تغییر شکل به مارتنزیت، تغییر شکل دهد (شکل ۷-۱). دو دمای  $M_s^\sigma$  و  $M_{d30}$  برای تعریف پایداری آستنیت تعریف می‌شوند که در حضور کرنش یا تنش در مقابل تغییر شکل مقاومت می‌کند.  $M_s^\sigma$  دمایی است که در آن استحاله آستنیت به مارتنزیت از حالت به کمک تنش (stress assistant) به حالت القا شده توسط کرنش (strain induced) تغییر می‌کند. در این دما، تنش لازم برای جوانه‌زنی مارتنزیت برابر با استحکام تسلیم آستنیت است. در بالاتر از این دما، آستنیت کرنش دهی شده و جوانه‌زنی مارتنزیت توسط کرنش پلاستیک انجام می‌شود. جوانه‌زنی توسط تنش در یک زمان ثابت باقی می‌ماند. با افزایش بیشتر دما به دمای  $M_d$  رسیده که در بالاتر از آن حتی در اثر اعمال کرنش نیز آستنیت پایدار می‌ماند و استحاله مارتنزیت اتفاق نمی‌افتد. برای اهداف عملی دمای  $M_{d30}$  را بعنوان دمایی که ۳۰٪ تغییر شکل کششی منجر به ۵۰٪ استحاله آستنیت به مارتنزیت می‌شود، تعریف می‌کنند. از  $M_{d30}$  برای تعریف پایداری آستنیت فولادهای زنگ نزن استفاده می‌شود. دمای  $M_{d30}$  را می‌توان از فرمول‌های تجربی که بر اساس ترکیب شیمیایی هستند بدست آورد. رابطه استاتیکی بین  $M_{d30}$  محاسبه شده و مقادیر تغییر شکل یکنواخت برای نوارهای سرد فولادهای زنگ نزن 1.4301 در شکل ۸-۱ نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که دمای بهینه برای تغییر شکل بین ۳۰ تا ۳۵°C وجود دارد. در دماهای بالاتر اثر TRIP به اندازه کافی مشاهده نمی‌شود. در دماهای



شکل ۱-۷ - دیاگرام شماییک تنش و دما منجر به استحاله مارتنزیتی [۹]



شکل ۱-۸ - رابطه استاتیکی بین دمای  $M_{d30}$  محاسبه شده و تغییر طول

یکنواخت فولاد زنگ نزن آستنیتی 1.4301 [۲]

پایین تر استحاله خود به خود اتفاق می افتد. با وجود فرمولهای زیادی که برای  $M_{d30}$  وجود دارد، نتایج متفاوت می باشد. بنابراین تخمین دمای تغییر شکل با استفاده از این فرمولها یک روش تجربی است و گاهی ممکن است رفتار ماده را تخمین زده و گاهی نیز این رفتار را تخمین نزنند. [۲]

$$M_{d30} (^{\circ}C) = 413 - 462(C + N) - 9.2Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 9.5Ni - 18.5Mo .$$

تغییر شکل پلاستیک توسط سه مکانیزم صورت می‌گیرد: لغزش (Slip)، دو قلوئی (Twinning) و استحاله مارتنزیت (Martensite reaction). این سه فرآیند می‌توانند جداگانه و یا با واکنش بر هم عمل نمایند. در جایی که لغزش قفل می‌شود، تغییر شکل پلاستیک تولید تمرکز تنش داخلی (internal stress concentration) می‌کند. تنش‌های بیشتر به این مناطق منجر به جوانه‌زنی مارتنزیت می‌گردد. [۱۲]

#### ۱-۵-۷- دو قلوئی‌های تغییر شکلی در آستنیت

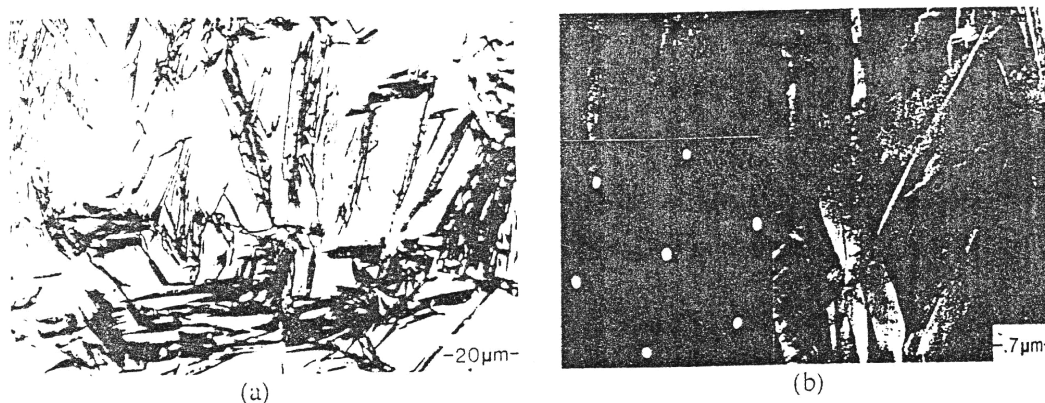
فولادهای آستنیتی گروه مهمی از آلیاژهای صنعتی به همراه رنج وسیعی از خواص است. نقش این آستنیت پایدار یا شبه پایدار در تغییر شکل بهبود خواص مانند کار سختی بالا یا داکتیلیتی کششی بالا است، که در رنج کاربردهای صنعتی مفید است. این خواص توسط مکانیزم‌هایی شامل برهمکنش بین لغزش و پتانسیل دو قلوئی مکانیکی در آستنیت پر آلیاژ است، همچنین استحاله مارتنزیت با تغییر شکل القا می‌شود. ریز ساختار تغییر شکلی این فولادهای آستنیتی نسبتاً پیچیده است و تشخیص اختلاف بین دو قلوئی‌های مکانیکی و مارتنزیت مشکل می‌باشد. دو قلوئی‌های مکانیکی در فلزات FCC، زیاد معمول نیست، اما غلظت بالای عناصر محلول که به طور همزمان تنش برشی برای لغزش را بالا می‌برد و انرژی نقص چیده شدن را کاهش می‌دهد، به آن کمک می‌کند. تشکیل دو قلوئی‌های تغییر شکلی بعنوان مثال در فولادهای آستنیتی گزارش شده است. [۱۳]

دو قلوئی تغییر شکلی و استحاله مارتنزیت که توسط تغییر شکل القا می‌شود، متفاوت هستند. استحاله مارتنزیت همچنین توسط تغییرات انرژی آزاد شیمیایی نیز تحریک می‌شود، که هر دو از نظر ریز ساختاری مشابه هستند و برش با نفوذ کم یک منطقه صفحه‌ای شکل از کریستال اولیه است، که آن را از ماده اطراف جدا می‌کند. از طرف دیگر تشکیل مارتنزیت در آلیاژهای با Ni بالا یا فولادهای آستنیتی پیچیده‌تر گزارش شده است، اگر چه تشخیص مارتنزیت القا شده توسط کرنش از باندهای دو قلوئی همچنان مشکل است. در جدول ۱-۱ ترکیب فولادهای مورد بررسی در این زمینه لیست می‌شود. [۱۳]

جدول ۱-۱ - ترکیب شیمیایی فولادهای مورد بررسی [۱۳]

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	$M_s$ (°C)	$M_d$ (°C)
TRIP steel	0.29	2.02	0.81	7.7	8.9	4.09	-196	35
High Ni alloy	0.6	-	-	22.8	-	-	-60	100

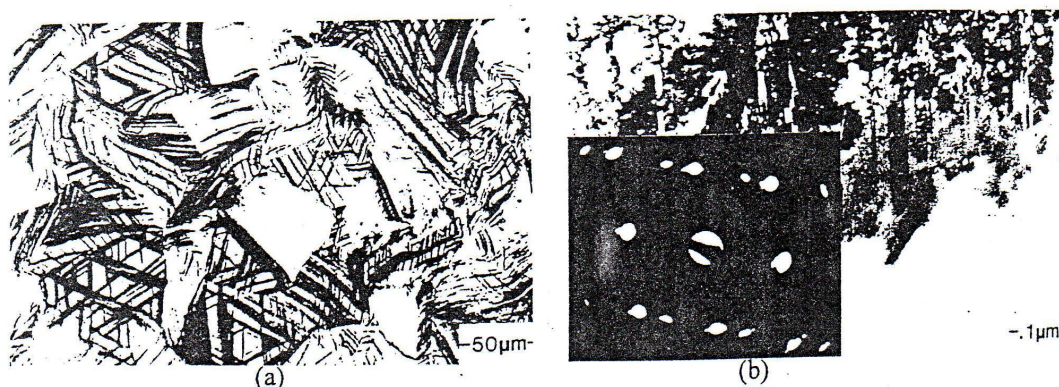
در این فولادها در دماهای کمتر از دمای اتاق و در حدود  $M_s$  مارتنزیت BCC صفحه‌ای شکل، تشکیل می‌شود که در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. [۱۳]



شکل ۹-۱ - ریز ساختار تولیدی در آستنیت Ni بالا کرنش داده تا شکست (a)  $-40^{\circ}\text{C}$  و (b)  $-20^{\circ}\text{C}$ ، ریز ساختار

#### الکترونی [۱۳]

از طرف دیگر در دماهای بالاتر از دمای اتاق مکانیزم تغییرشکلی حاکم سخت‌شوندگی آستنیت است و دوقلوبی‌های تغییر شکلی بوجود می‌آید. شکل ۱۰-۱ از نمونه‌ای است که در  $100^{\circ}\text{C}$  تغییر شکل داده که هیچ اثری از تشکیل مارتنزیت مشاهده نمی‌شود. حداکثر تغییر طول در  $100^{\circ}\text{C}$  مشاهده شده است، که علت آن می‌تواند بهبود یکنواختی افزایش طول با افزایش کار سختی به علت دوقلوبی‌های تغییر شکلی زیاد باشد. [۱۳]



شکل ۱۰-۱ - باند ساختاری در آستنیت پر Ni، کرنش داده شده تا شکست در  $100^{\circ}\text{C}$  (a) ریز ساختار روشن و (b) ریز ساختار

#### الکترونی [۱۳]