

بسمه تعالی

دانشگاه شهید بهشتی  
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی



## فصل هفتم: آستنیت در فولادها

برگرفته از کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها  
(نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار)

دکتر محمود سمیع زاده

m\_sameezadeh@sbu.ac.ir

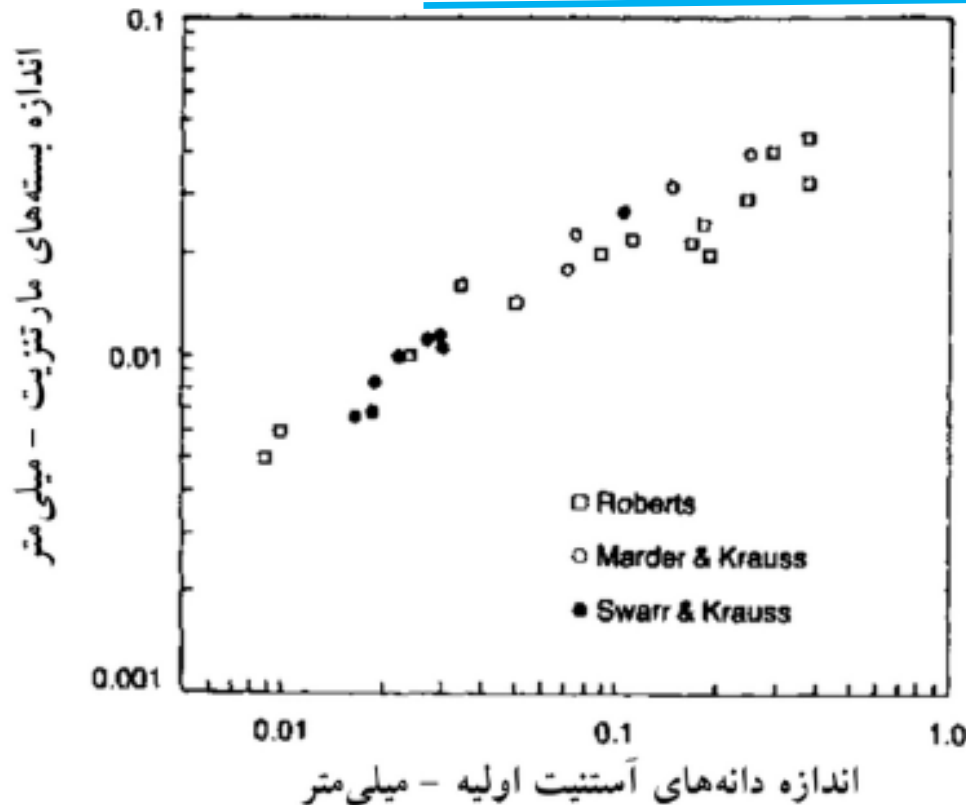
## نقش آستنیت در خواص مکانیکی فولادها

تشکیل آستنیت و کنترل اندازه دانه‌های آن، از جمله عوامل مهم در رابطه با بسیاری از روش‌های عملیات حرارتی فولادها هستند. چگونگی دگرگونی آستنیت و خواص مکانیکی ساختارهای حاصل از آن، به شدت تحت اثر اندازه دانه‌های آستنیت، درصد کربن و عناصر آلیاژی که به صورت محلول در آستنیت وجود دارند، قرار می‌گیرند. مهم‌ترین عوامل اثرگذار روی اندازه دانه‌ها، درصد کربن و هم‌چنین درصد عناصر آلیاژی محلول در آستنیت عبارت‌اند از: ساختار اولیه، دما و زمان آستنیت‌ه کردن.

از دیدگاه دگرگونی، **مرزدانه‌های آستنیت** محل‌های مناسبی برای جوانه‌زنی فازهای پرویوتکتوئید و پرلیت هستند. از این رو، **در آستنیت درشت دانه، محل‌های مناسب برای جوانه‌زنی کم‌تر است و** در نتیجه دگرگونی نفوذی آستنیت به **تعویق** می‌افتد. این پدیده باعث می‌شود که سختی‌پذیری فولاد افزایش یابد.

همچنین اندازه دانه‌های آستنیت با تغییر دادن دمای  $M_s$ ، روی دگرگونی تشکیل مارتنزیت اثر می‌گذارد. در فولادهای Fe-Ni و Fe-Ni-C **کاهش اندازه دانه‌های آستنیت به طور چشمگیری دمای  $M_s$  را کاهش می‌دهد.** به این علت که **کاهش اندازه دانه‌ها باعث افزایش استحکام آستنیت در برابر تغییر شکل برشی می‌شود.** در فولادهای ساده کربنی نیز اثرات مشابه دیده شده است.

از آنجایی که جوانه‌زنی فازهای پرویوتکتوئید و پرلیت، بیشتر از مرز دانه‌های آستنیت انجام می‌شود، هر چه دانه‌های آستنیت ریزتر باشند، ساختار محصول‌های حاصل از دگرگونی نفوذی آن (یعنی پرلیت و یا فریت) نیز ظریف‌تر خواهد بود. در فولادهای کم‌کربن نرماله و آنیل‌شده که ریزساختار آنها بیشتر فریتی است، با کاهش اندازه دانه‌ها، استحکام و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابند. با ریز شدن دانه‌های آستنیت، خواص مکانیکی مارتنزیت تشکیل‌شده از آن بهبود می‌یابد. از این رو، توصیه می‌شود که قطعه‌های فولادی را نخست نرماله و سپس سخت کنند.



در فولادهای کم‌کربن، **اندازه بسته‌های مارتنزیت به طور مستقیم بستگی به اندازه دانه‌های آستنیت دارد.** بنابراین در این نوع فولادها، استحکام مارتنزیت را می‌توان به یکی از عوامل اندازه دانه‌های آستنیت و یا **اندازه بسته‌های مارتنزیت ارتباط داد و نتایج یکسان خواهد بود.**

شکل ۷-۱ ارتباط بین اندازه بسته‌های مارتنزیت و اندازه دانه‌های آستنیت. نتایج نشان‌داده‌شده با مربع، مربوط به آلیاژ Fe-Mn و دیگر نتایج، مربوط به فولاد ۰.۲٪ Fe هستند [۱].

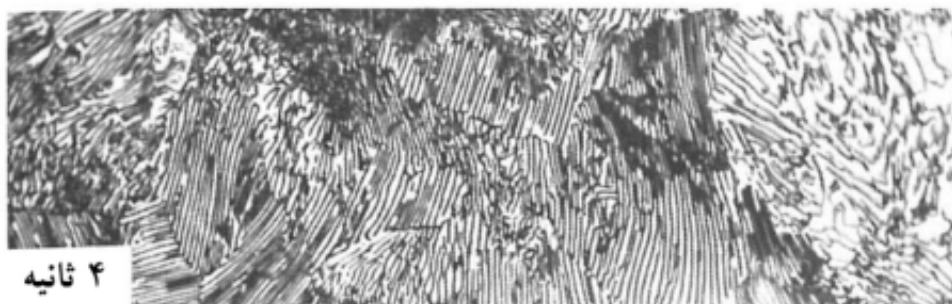
□ چقرمگی (Toughness) فولادهای سخت شده (که از طریق آزمون شارپی اندازه گیری شده) با کاهش اندازه دانه‌ها، افزایش می‌یابد.

به طور خلاصه، بهترین فرایندهای متالورژیکی و عملیات حرارتی عبارت‌اند از: فرایندهایی که در آنها از آستنیت شدن در دماهای خیلی بالا و تشکیل دانه‌های درشت آستنیت و در نتیجه، تمایل به ترد شدن بین دانه‌ای (مرز دانه‌ها) در فولادهای سخت‌شده جلوگیری شود.

## تشکیل آستنیت

روش تشکیل آستنیت در یک فولاد بستگی به ریزساختار آن دارد.

طبق شکل ۷-۲ برای بررسی **تشکیل و رشد آستنیت از پرلیت** در یک فولاد یوکتوئیدی، نمونه در ناحیه آستنیت به مدت زمانهای مختلف نگهداری شده و سریع در آب سرد شده است، نواحی آستنیت شده به مارتنزیت تبدیل می‌شوند که بصورت لکه‌های سفیدرنگ و بطور کامل متمایز از ساختار پرلیت لایه‌ای، روی شکل مشخص هستند.



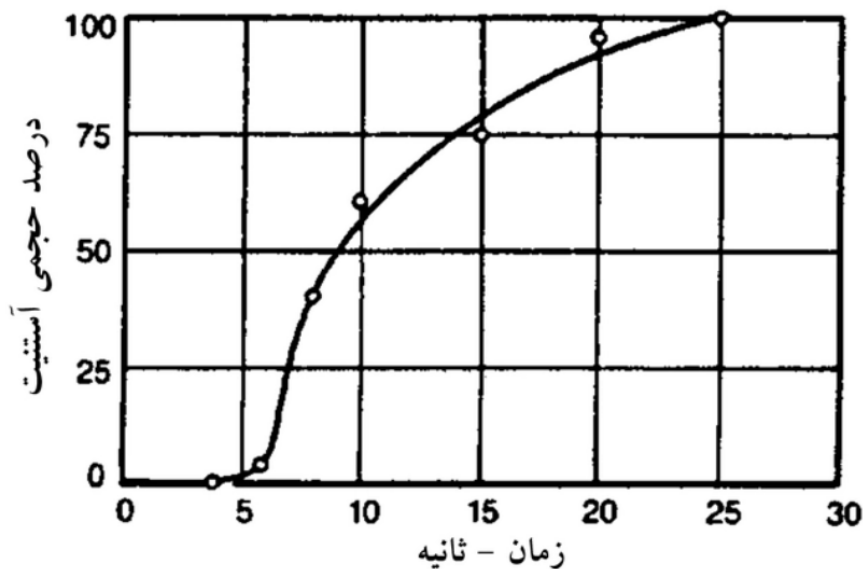
شکل ۷-۲ اثر زمان بر تشکیل آستنیت (نواحی سفیدرنگ) از پرلیت [۱].

تشکیل آستنیت از پرلیت را در یک فولاد یوکتوئیدی ساده کربنی نشان می‌دهد، مشخص است که در این دگرگونی، نفوذ نقش اساسی را ایفا می‌کند:



به این صورت که فریت با ۰/۰۲ درصد کربن باید با سمیتیت با ۶/۶۷ درصد کربن در هم آمیخته شوند تا این که آستنیت با ۰/۸ درصد کربن به وجود آید. بنابراین، افزون بر این که فولاد باید در ناحیه تشکیل آستنیت قرار گیرد، دما و زمان نگهداری نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند. همان‌طور که از شکل ۲-۷ مشخص است، در یک دمای ثابت، درصد آستنیت تشکیل‌شده، تابعی از زمان نگهداری فولاد در ناحیه آستنیت می‌باشد.

منحنی شکل ۳-۷ از سه ناحیه تشکیل شده است:



(1) ناحیه تشکیل جوانه‌های آستنیت. در این ناحیه درصد آستنیت تشکیل شده، بسیار کم و قابل چشم‌پوشی و در حد تشکیل جوانه‌ها است.

(2) رشد جوانه‌هایی که در مرحله اول بوجود آمده‌اند و رشد جوانه‌ای جدیدی که در این ناحیه تشکیل می‌شود. در این مرحله نرخ تشکیل آستنیت برحسب زمان بسیار زیاد است.

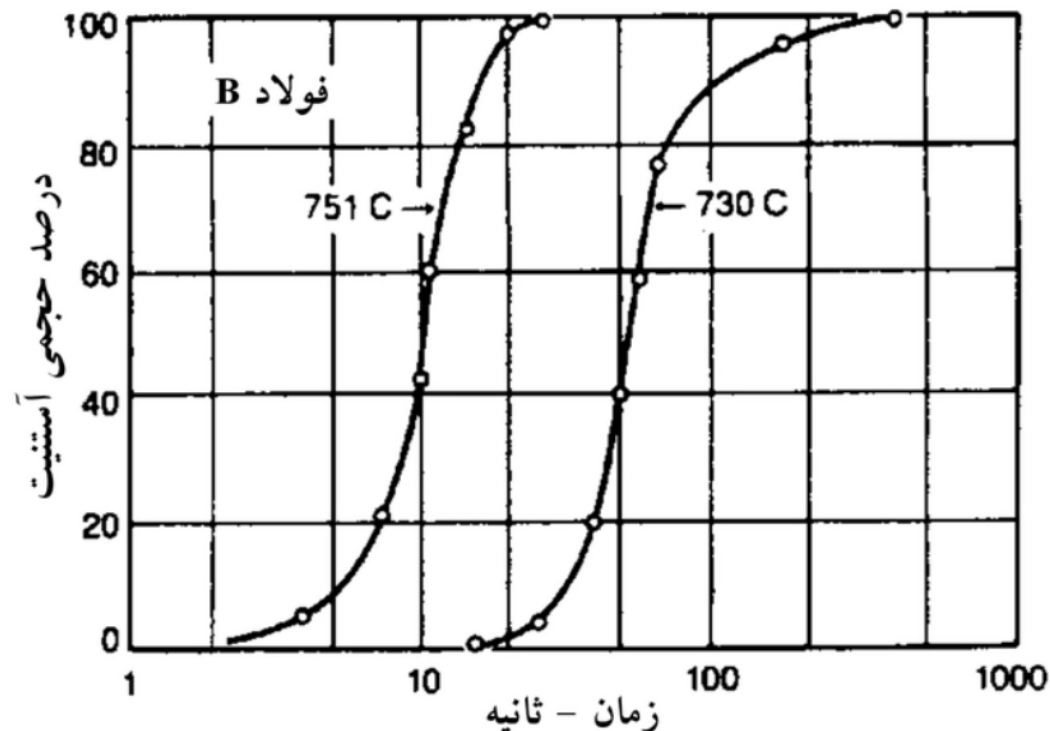
(3) بعد از رشد دانه‌های آستنیت به یکدیگر برخورد می‌کنند و رشد آن‌ها به مناطقی محدود می‌شود که هنوز مقداری پرلیت در بین دانه‌ها باقی‌مانده است، پس نرخ تشکیل آستنیت نیز با گذشت زمان بطور پیوسته کم‌تر می‌شود.

شکل ۳-۷ درصد حجمی آستنیت تشکیل‌شده از پرلیت بر حسب زمان در فولاد ساده کربنی یوکتوئیدی در دمای ثابت [۱].



رابطه قبل نشان می‌دهد که تشکیل آستنیت نیازمند نفوذ است و با توجه به اینکه با افزایش دما نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد، نتایج نشان داده شده در شکل ۴-۷ قابل توجیه هستند.

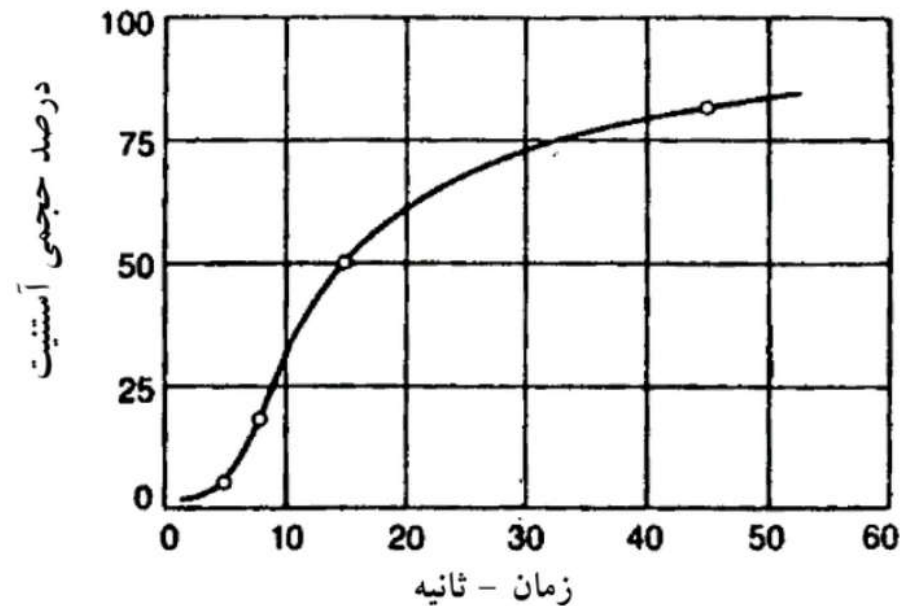
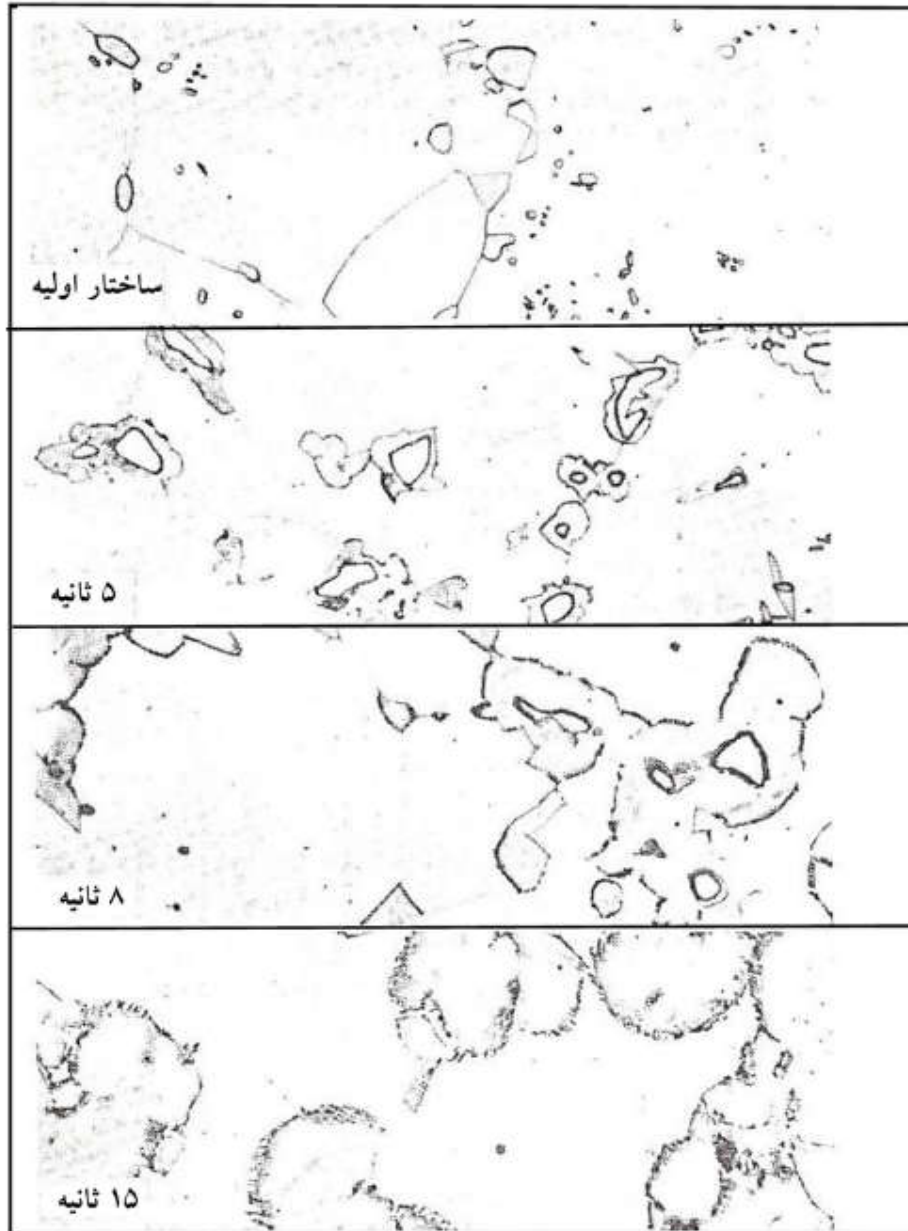
نکته دیگری که از مطالعه تصاویر میکروسکوپی شکل ۲-۷ بدست می‌آید این است که سمنتیت موجود در ساختار پرلیت، بطور کامل در آستنیت حل نشده و همچنان بصورت ذره‌های ریز کروی باقی مانده است. این ذره‌های سمنتیت تنها در صورتی حل می‌شوند که نمونه‌ها برای مدت طولانی‌تر در دمای آستنیت شدن نگه داشته شوند.



شکل ۴-۷ اثر دمای آستنیت کردن روی نرخ تشکیل آستنیت از پرلیت در فولاد یونکتویدی [۱].

در فولادی با ریزساختاری شامل **زمینه فریتی و سمنتیت کروی**، آستنیت در **فصل مشترک** فریت-سمنتیت جوانه می‌زند و رشد می‌کند. بنابراین ذره‌های سمنتیت به سرعت توسط **هاله‌ای از آستنیت** احاطه می‌شوند. از این لحظه به بعد، **ادامه رشد** آستنیت نیازمند انحلال سمنتیت و نفوذ کربن از طریق هاله آستنیت به سمت فریت است.

این موضوع باعث می‌شود که **نرخ تشکیل آستنیت از ساختار سمنتیت کروی**، بسیار کم‌تر از **نرخ تشکیل آستنیت از ساختار اولیه پرلیتی** باشد. در ساختارهای پرلیتی با کنار هم قرار گرفتن لایه‌های نازک فریت و سمنتیت **مسافت لازم برای نفوذ کربن** به منظور تشکیل آستنیت کاهش می‌یابد و نرخ تشکیل آستنیت افزایش خواهد یافت.



شکل ۶-۷ تشکیل آستنیت بر حسب زمان از ساختار اولیه با سمنتیت کروی [۱].

شکل ۵-۷ تشکیل آستنیت از ساختار اولیه با سمنتیت کروی [۱].

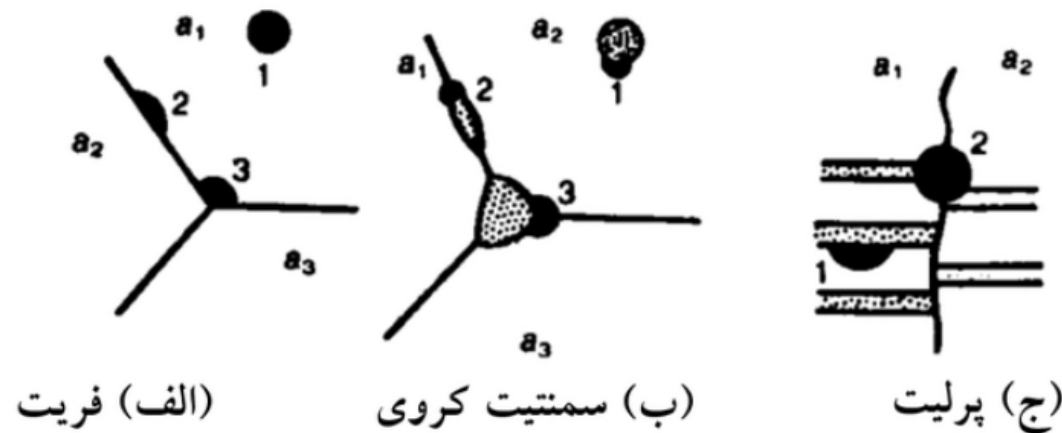


## محل‌های مناسب برای تشکیل جوانه‌های آستنیت

□ در ساختارهای **فریتی**، جوانه‌های آستنیت، بیش‌تر در **محل تلاقی** مرزدانه‌های فریت و همچنین **روی مرزدانه‌ها** تشکیل می‌شوند.

□ در ساختار **سمنتیت کروی**، آستنیت **روی ذره‌های سمنتیت کروی** و بیش‌تر در **محل تلاقی** مرز دانه‌ها با سمنتیت کروی جوانه می‌زند.

□ در ساختار **پرلیتی**، **محل‌های تلاقی دسته‌های پرلیت** و همچنین **فصل مشترک لایه‌های سمنتیت-فریت** داخل دسته‌ها، محل‌های مناسبی برای تشکیل جوانه آستنیت هستند.



شکل ۷-۷ محل‌های جوانه‌زنی برای تشکیل آستنیت از ساختارهای اولیه:  
(الف) فریت، (ب) سمنتیت کروی و (ج) پرلیت [۱].

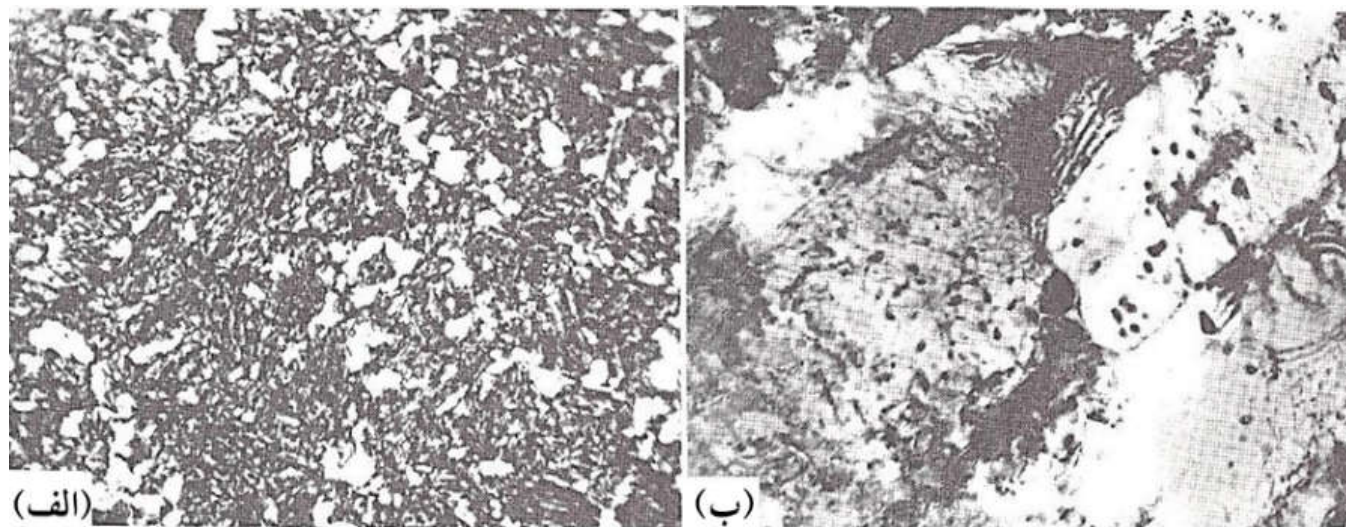
در رابطه با تشکیل آستنیت از ساختارهای مارتنزیتی در فولادهای کربنی، گفته می‌شود که آستنیت می‌تواند به دو شکل مختلف به وجود آید: یکی آستنیت با دانه‌های هم‌محور که در مرز دانه‌های آستنیت اولیه (پیش از تشکیل مارتنزیت) جوانه می‌زند و دیگری آستنیت سوزنی‌شکل که با جوانه زدن در بین صفحه‌های مارتنزیتی تشکیل می‌شود.

در فولادهای کربنی با ساختار مارتنزیتی که در اثر حرارت دادن به آسانی بازگشت می‌شوند، اعتقاد بر این است که تشکیل آستنیت براساس انحلال سمنتیت تشکیل شده در ضمن بازگشت و تابع نفوذ می‌باشد، درحالی که در فولادهای Fe-Ni و Fe-Ni-C گزارش شده است که به احتمال زیاد آستنیت سوزنی‌شکل، توسط یک سازوکار برشی به وجود می‌آید.

در هر حال تشکیل آستنیت از مارتنزیت و مارتنزیت بازگشت داده شده بسیار سریع‌تر از دیگر ساختارها است.

ارزیابی‌هایی که روی نمونه‌های فولادی AISI ۴۳۴۰ با ساختار مارتنزیتی انجام شده، نشان داده‌اند که آستنیت در مدت زمان بسیار کوتاهی (حدود دو ثانیه) تشکیل می‌شود. سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد شدن این نوع آستنیت، بیشتر از سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد شدن آستنیت معمولی می‌باشد. این موضوع گویای این واقعیت است که تشکیل سریع آستنیت منجر به ایجاد معایب بلوری در آن می‌شود که در نهایت موجب افزایش استحکام و سختی مارتنزیت حاصل از آن خواهد شد. به منظور گرم کردن سریع و در نتیجه، کاهش زمان آستنیت شدن، از گرم کردن القایی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در چنین شرایطی، سختی بیشتر از حد معمول که به دست می‌آید، به سختی اضافی<sup>۲</sup> موسوم است.

۱-Induction heating    ۲-Superhardness



شکل ۷-۸ (الف) تشکیل دانه‌های هم‌محور آستنیت (نواحی سفیدرنگ) از ساختار مارتنزیتی در فولاد ۴۳۴۰. نمونه تا ۷۱۵ درجه سانتی‌گراد (۱۳۱۹ درجه فارنهایت) سریع گرم شده، به مدت شش ثانیه نگهداری شده و سپس در روغن سریع سرد شده است. ریزساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی ۱۳۰۰× (ب) مارتنزیت بازگشت داده‌شده در نمونه الف. دانه‌های بسیار ریز و ظریف فریت با ذره‌های سمیتیت کروی در آنها نشان داده شده‌اند. ریزساختار الکترونی، بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰۰× [۱].

## اندازه دانه آستنیت

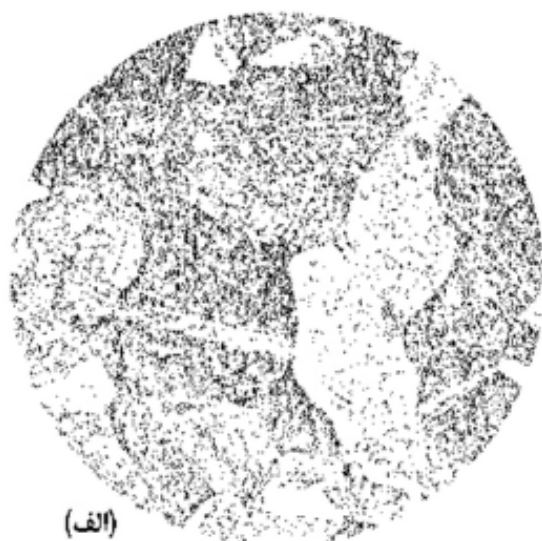
اندازه دانه‌های آستنیت را بطور معمول برحسب عدد اندازه دانه ASTM مشخص می‌کنند. در این روش اگر  $N$  تعداد دانه‌ها در بزرگنمایی  $100X$  در یک اینچ مربع باشد، **عدد اندازه دانه  $n$**  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N = 2^{(n-1)}$$

**عدد اندازه دانه رابطه معکوس با اندازه دانه دارد**، با بزرگ شدن دانه‌ها تعداد آن‌ها در یک اینچ مربع کاهش می‌یابد.

اندازه دانه آستنیت اولیه از شماره ۱ تا شماره ۹ مربوط به ساختار مارتنزیتی فولاد ساده کربنی با کربن متوسط در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است. نمونه‌های مربوط به ریزساختار شکل ۷-۱۰، نخست به طور مختصر، بازگشت داده شده و سپس در محلول الکلی شامل کلریدریک و پیکریک اسید حکاکی شده‌اند. ظاهر شدن دانه‌ها و بنابراین، مرز دانه‌های آستنیت، به دلیل جهت‌های بلوری مختلفی است که صفحه‌های مارتنزیتی در دانه‌های مختلف دارند.

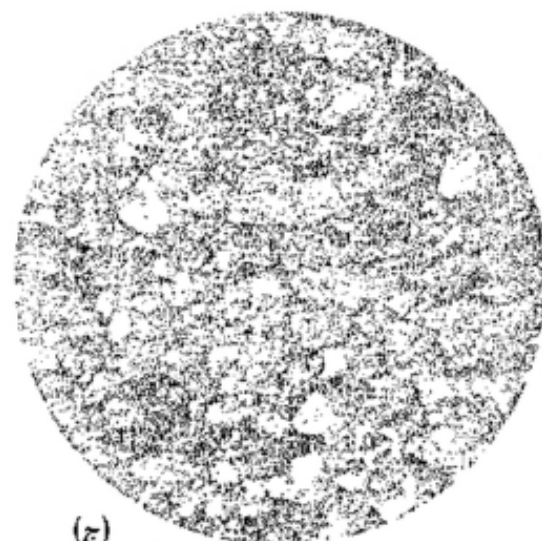




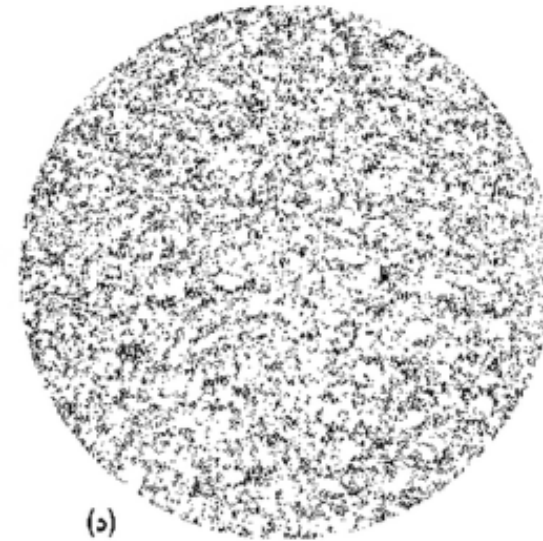
(الف)



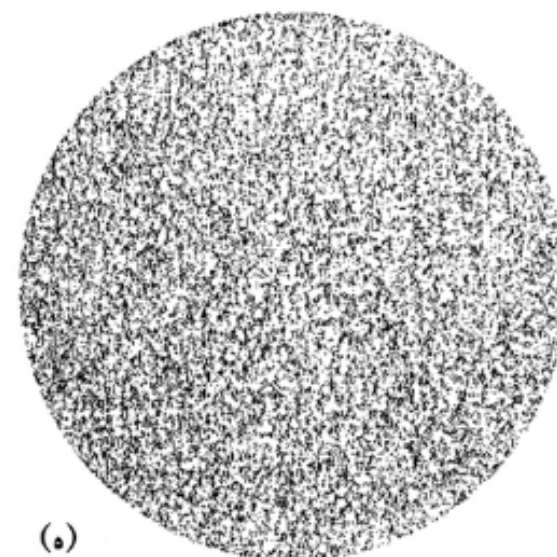
(ب)



(ج)



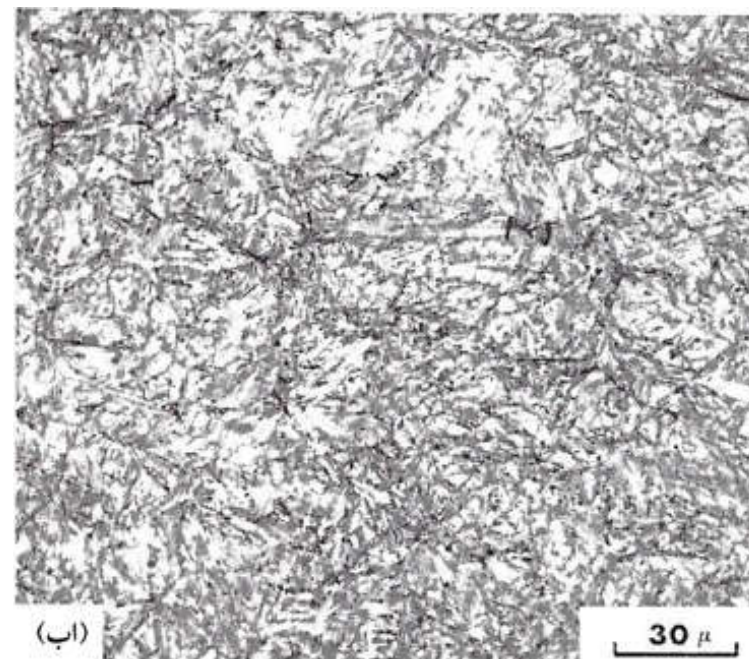
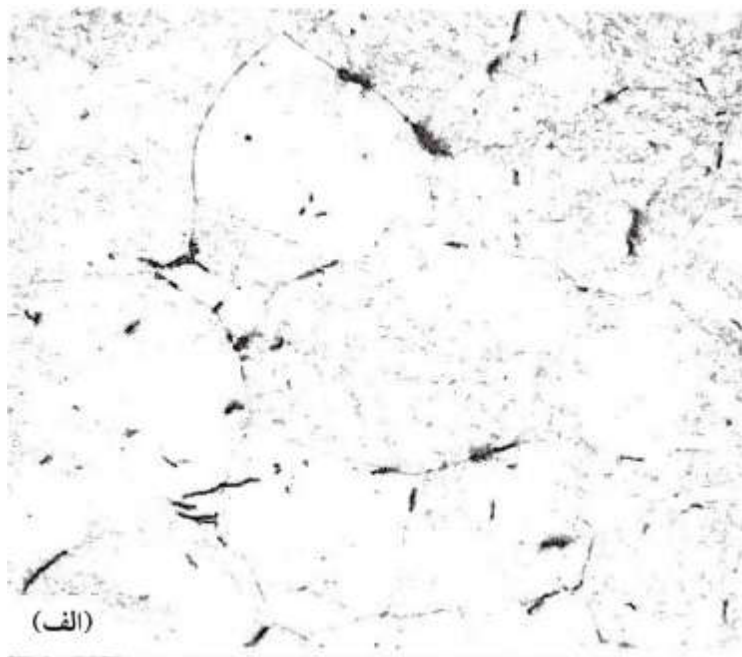
(د)



(ه)

شکل ۷-۱۰ ریزساختارهای میکروسکوپی مارتنزیت با عدد اندازه دانه متفاوت برای آستنیت اولیه. (الف) ASTM NO.۱، (ب) ASTM No.۳، (ج) ASTM No.۵، (د) ASTM No.۷، (ه) ASTM No.۹. این نمونه‌ها پس از مارتنزیت شدن، کمی بازگشت داده شده و پس از پولیش، در محلول الکلی شامل کلریدریک و پیکریک اسید حکاکی شده‌اند. بزرگ‌نمایی  $100\times$  [۱].

برای **مشخص کردن مرزدانه‌های آستنیت** اولیه (شکل الف)، نمونه پس از سریع سرد شدن و پیش از بازگشت، به مدت ۱۵ دقیقه در محلول جوشان ۲۵ گرم سود سوزآور، ۱۰۰ میلی‌لیتر آب و ۲ گرم پیکریک اسید قرار داده شده و سپس بطور جزئی در محلول نایتال حکاکی شده است. در صورتی که محلول حکاکی نایتال به تنهایی استفاده شود (شکل ب) مرزدانه‌های آستنیت اولیه به هیچ وجه ظاهر نمی‌شوند و به جای آن ساختار مارتنزیتی مشخص می‌شود.

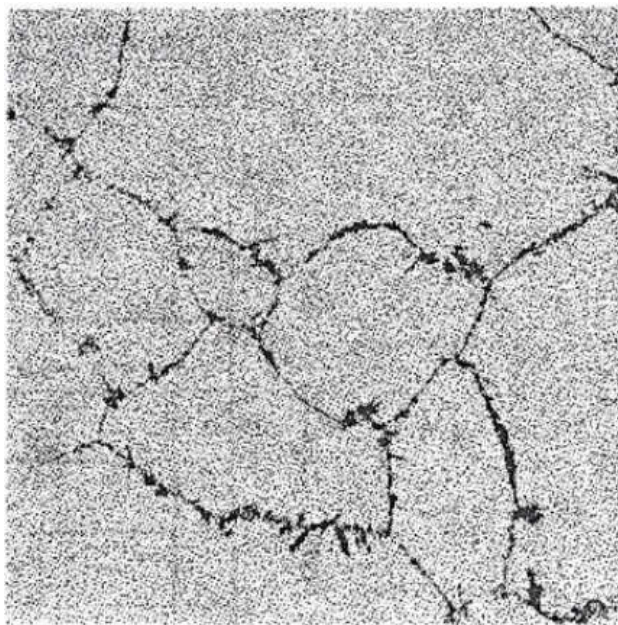


شکل ۷-۱۱ ریزساختار آلیاژ Fe-۱/۲۲C که پس از آستنیت‌شدن به مدت دو دقیقه در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد (۱۷۴۰ درجه فارنهایت) در آب سریع سرد شده باشد. (الف) به منظور آشکار شدن مرزدانه‌ها حکاکی شده است. (ب) به منظور ظاهر شدن مارتنزیت و آستنیت باقیمانده حکاکی شده است [۱].



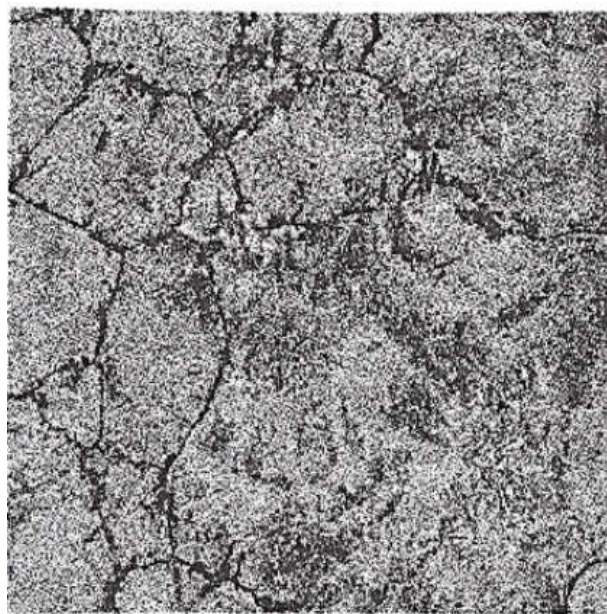


نایتال دو درصد



محلول جوشان سدیم پیکرات

در روش مک کوئید و اهن که برای ظاهر کردن دانه‌های آستنیت در فولادهای کربنی و آلیاژی به کار می‌رود، نمونه کوچکی از فولاد را به مدت ۸ ساعت در دمای ۹۲۵ درجه سانتی گراد به روش پودری، کربن می‌دهند و سپس به آهستگی تا دمای اتاق سرد می‌کنند. در این شرایط، سمنتیت حاصل از جذب کربن محیط در مرزدانه‌های آستنیت در سطح نمونه رسوب خواهد کرد. سپس نمونه را از وسط به دو نیم تقسیم می‌کنند و پس از پولیش کردن توسط محلول شیمیایی مناسب آن را حکاکی خواهند کرد. محلول‌های شیمیایی مورد استفاده در این روش بطور معمول نایتال، پیکرال و یا محلول جوشان بازی سدیم پیکرات هستند.



محلول الکلی سدیم پیکرات، حکاکی  
الکترولیتی (زمان یک دقیقه، شدت  
جریان یک آمپر بر سانتی متر مربع)

شکل ۷-۱۳ نمونه‌هایی از استفاده  
از محلول‌های حکاکی برای  
مشخص کردن شبکه پیوسته  
سمنتیت در مرز دانه‌های آستنیت  
در روش مک کوئید و اهن [۲۲].

۱- McQuaid & Ehn

## جدول ۷-۱ روش‌های ظاهر کردن دانه‌های آستنیت.

روش	ملاحظه‌ها
محلول پیکریک اسید	<p>(الف) مورد استفاده برای بازه گسترده‌ای از فولادها با ساختارهای مارتنزیتی یا بینیتی</p> <p>(ب) حکاکی در دمای اتاق</p> <p>(ج) غیرمنتظره، همیشه جواب نمی‌دهد.</p> <p>(د) ممکن است، روی دانه‌های تبلور مجدد نیافته جواب دهد.</p>
کربن‌دهی مک‌کویید	<p>(الف) برای بازه محدودی از فولادها استفاده می‌شود (بیشتر برای فولادهای هیپوئوتکتوئید).</p> <p>(ب) به طور معمول هشت ساعت عملیات حرارتی در دمای ۹۲۵ درجه سانتی‌گراد</p> <p>(ج) ممکن است، اندازه واقعی دانه‌ها در فولاد اولیه را مشخص نکند.</p>
اکسیداسیون	<p>(الف) برای بازه محدودی از فولادها استفاده می‌شود (بیشتر برای فولادهای هیپوئوتکتوئید).</p> <p>(ب) نیاز به عملیات حرارتی به مدت یک ساعت در دمای ۸۵۵ درجه سانتی‌گراد است.</p> <p>(ج) ممکن است، اندازه واقعی دانه‌ها در فولاد اولیه را مشخص نکند.</p>
عملیات در خلأ	<p>(الف) برای بازه گسترده‌ای از فولادها استفاده می‌شود.</p> <p>(ب) نیاز به حرارت دادن به مدت یک ساعت یا کمتر در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است.</p> <p>(ج) پتانسیل کامل روش مشخص نیست.</p> <p>(د) ممکن است، اندازه واقعی دانه‌های فولاد اولیه را مشخص نکند.</p>
استفاده از فریت یا سمیتیت اولیه	<p>(الف) برای بازه گسترده‌ای از فولادهای هیپو و هایپریوتکتوئید استفاده می‌شود.</p> <p>(ب) نیاز به حرارت دادن در دمایی بالای <math>Ac_1</math> (<math>Ac_3</math>) و سپس سرد کردن کنترل‌شده دارد.</p> <p>(ج) برای برخی از فولادهای دیگر با درصد کربن محدود استفاده می‌شود.</p>

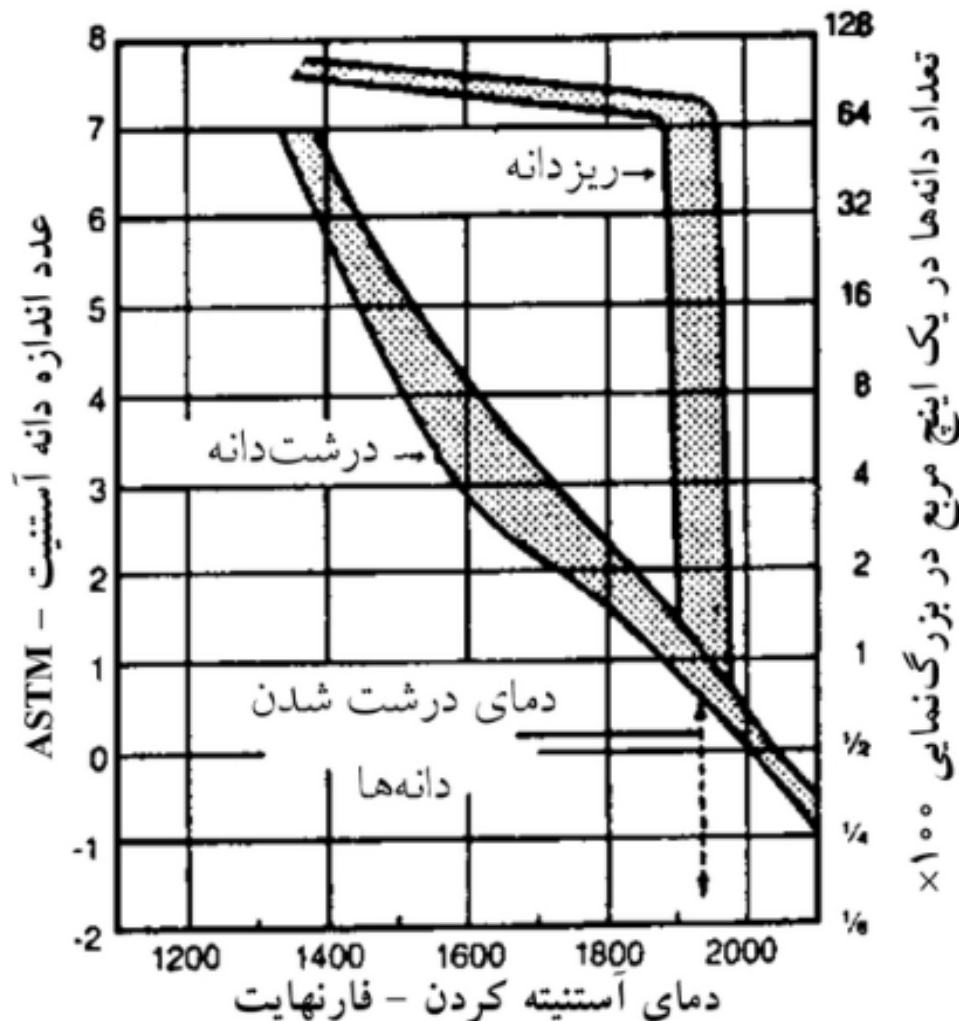
## کنترل اندازه دانه‌های آستنیت

فولادها ممکن است، درشت‌دانه یا ریزدانه باشند. از جمله عوامل بسیار مهم و اثرگذار روی اندازه دانه‌های فولاد، روش اکسیژن‌زدایی مذاب در ضمن تهیه فولاد است. فولادهایی که توسط آلومینیوم اکسیژن‌زدایی شده باشند، دارای ذره‌های بسیار ریز و پراکنده اکسید و نیتريد آلومینیوم در ساختار خود هستند که از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کنند و بنابراین دارای دانه‌های ریز هستند. از طرف دیگر، فولادهایی که دارای دانه‌های درشت‌اند، به طور معمول توسط سیلیسیم اکسیژن‌زدایی شده‌اند. در این شرایط، ذره‌های ریز و پراکنده‌ای که بتوانند از رشد دانه‌ها جلوگیری کنند، در فولاد تشکیل نخواهند شد. چگونگی رشد دانه‌ها در دو نوع فولاد یادشده به طور کامل متفاوت است



همانطور که در شکل ۷-۱۴ مشخص است، در فولاد درشت دانه با افزایش دما، دانه‌های آستنیت با گذشت زمان درشت می‌شوند؛ در حالی که در آستنیت ریزدانه تا قبل از یک دمای آستنیت به نسبت زیاد، اندازه دانه‌ها تا حدودی ثابت باقی می‌ماند و با رسیدن به این دما دانه‌ها بسیار سریع رشد می‌کنند.

دمایی که رشد سریع دانه‌ها در فولاد ریزدانه شروع می‌شود، به دمای خشن شدن دانه‌ها (Grain coarsening temperature) موسوم است. گاهی به رشد سریع دانه‌ها در این مرحله، رشد منقطع دانه (Discontinuous grain growth) و یا تبلور مجدد ثانویه (Secondary recrystallization) گفته می‌شود.

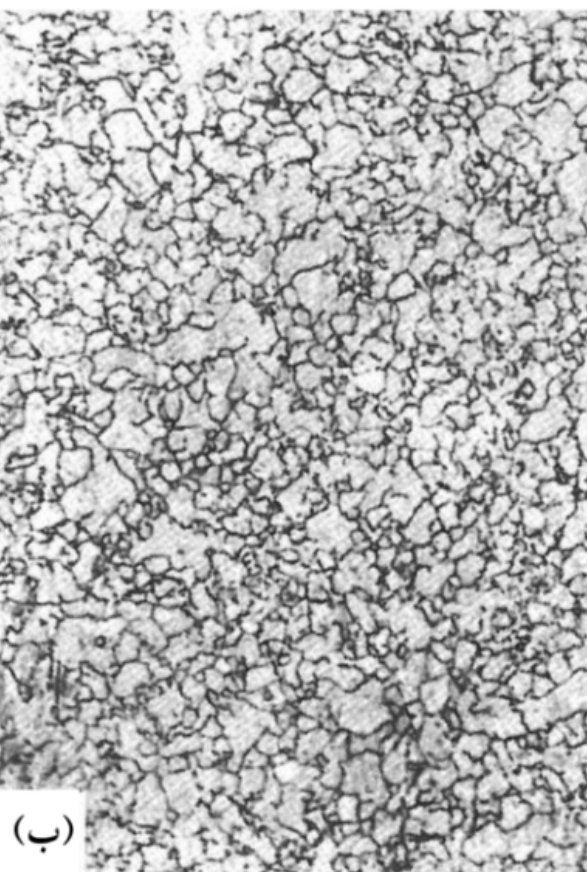
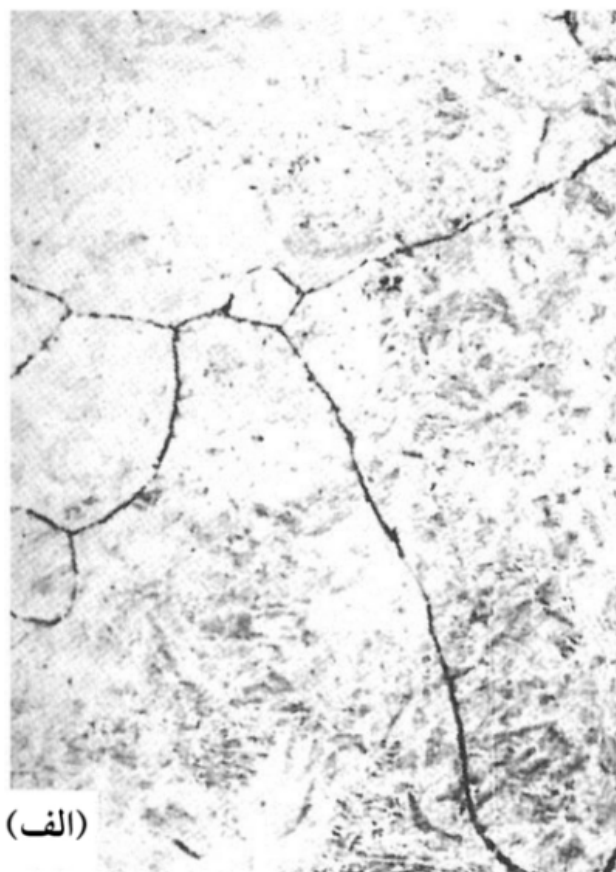


سینتیک رشد منقطع دانه‌ها بسیار شبیه تبلور مجدد است و از سه مرحله تشکیل شده است:

۱. مرحله جوانه زنی که بسیار آهسته است.
۲. مرحله دوم که به نسبت سریع است.
۳. مرحله سوم که دوباره آهسته می‌شود.

شکل ۷-۱۴ مقایسه اندازه دانه آستنیت بر حسب دمای آستنیت کردن برای فولاد درشت دانه و فولاد ریزدانه [۱]

در بسیاری از فرایندهای عملیات حرارتی پایانی که روی فولادها انجام می‌شوند، دمای آستنیت‌شدن، به‌ندرت از  $980^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد ( $1800^{\circ}\text{F}$  درجه فارنهایت) تجاوز می‌کند. بنابراین، فولادهای ریزدانه هم‌چنان دانه‌های ریز خود را حفظ خواهند کرد، در حالی که دانه‌های آستنیت در فولاد درشت‌دانه ممکن است، به طور چشمگیری درشت‌تر شوند. این موضوع، به‌ویژه در رابطه با عملیات حرارتی کربن‌دهی که قطعه‌های فولادی برای ساعت‌ها در دماهایی بین  $930^{\circ}\text{C}$  تا  $960^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند، قابل توجه است. شکل ۷-۱۵، اندازه نهایی دانه‌های آستنیت را پس از کربن‌دهی در دو نوع فولاد با رفتار متفاوت (یعنی فولاد ریزدانه و فولاد درشت‌دانه) نشان می‌دهد.

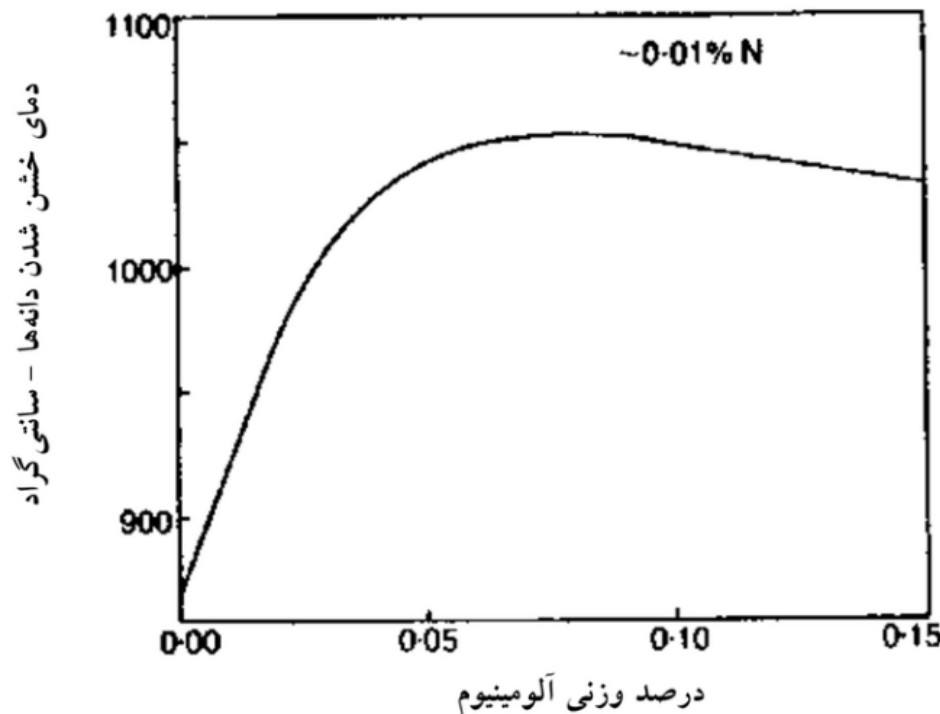


شکل ۷-۱۵ مقایسه اندازه دانه آستنیت در:  
(الف) فولاد درشت‌دانه SAE ۱۰۱۵ و  
(ب) فولاد ریزدانه SAE ۴۶۱۵ بعد از کربن‌دهی

سازوکار کنترل اندازه دانه‌ها در ضمن تهیه فولاد بر این اساس استوار است که آلومینیوم اضافی که در حین اکسیژن‌زدایی با اکسیژن ترکیب نمی‌شود، با نیتروژن موجود در مذاب ترکیب می‌شود و ذره‌های بسیار ریز و پراکنده نیتريد آلومینیوم را تشکیل می‌دهد. این ذره‌ها تحرک مرز دانه‌های آستنیت را کاهش می‌دهند و حتی می‌توانند آنها را متوقف کنند و به این ترتیب، از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌شود. اما با افزایش دما، ذره‌های نیتريد آلومینیوم درشت می‌گردند و یا در آستنیت حل می‌شوند. در این حالت، رشد سریع دانه‌ها اتفاق می‌افتد.

گفته می‌شود که علت کاهش دمای درشت شدن دانه‌ها در مقادیر آلومینیوم بیش‌تر از ۰/۰۸ درصد در شکل ۷-۱۶، ناشی از تشکیل ذره‌های درشت نیتريد آلومینیوم در ضمن انجماد و یا به هنگام کار گرم است.

واکنش تشکیل نیتريد آلومینیوم، یک واکنش برگشت‌پذیر است ( $Al+N=AlN$ ) و در دمای بالا مقداری از  $AlN$  در آستنیت حل می‌شود، بنابراین منجر به رشد دانه‌ها خواهد شد.



شکل ۷-۱۶ اثر آلومینیوم روی دمای درشت شدن (خشن شدن) دانه‌های آستنیت [۱].



اندازه دانه‌های آستنیت را به کمک عناصری به جز آلومینیوم نیز می‌توان کنترل کرد. در این رابطه، فلزهای انتقالی مانند تیتانیم، وانادیم و نیوبیم که نیتريد و کاربیدسازهای بسیار قوی هستند، از نظر تشکیل ذره‌های بسیار ریز و پراکنده در ساختار، شبیه به آلومینیوم عمل می‌کنند. درصد بسیار کمی از این عناصر (بیشتر وقت‌ها کمتر از ۰/۰۵ درصد) در تهیه فولادهای کم‌آلیاژ با استحکام بالا (HSLA)<sup>۱</sup> استفاده می‌شوند. به علت درصد بسیار کم کربن، ساختار این فولادها به طور کلی فریتی است، اما به علت داشتن دانه‌های بسیار ریز فریت، استحکام فولادهای یادشده (۵۰-۸۰ ksi)، بسیار بالاتر از استحکام فولادهای ساده کربنی با ساختار فریتی - پرلیتی (۳۰ ksi) می‌باشد

۱-High Strength Low Alloy (HSLA)