

بسمه تعالی

دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی



فصل سوم - مارتنزیت و بینیت

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

در فصل دوم، دگرگونی پرلیتی که نیازمند نفوذ است و بنابراین در دماهایی به نسبت بالا انجام می شود، بررسی شد. در این فصل، دگرگونی مارتنزیتی^۱ که در دماهایی بسیار پایین تر از دمای تشکیل پرلیت انجام می شود و بنابراین، نفوذ در آن نقشی ندارد، مطالعه خواهد شد. با توجه به این نکته که دگرگونی مارتنزیتی بدون نفوذ یا جابه جایی انفرادی اتم هاست و بنابراین، نیاز به فعالیت حرارتی ندارد، گفته می شود که این دگرگونی از نوع برشی^۲ است و به کمک جابه جایی گروهی اتم ها انجام می شود. از جمله ویژگی های دیگر دگرگونی مارتنزیتی، ویژگی های شبکه بلوری و ریزساختار ریز و سوزنی شکل آن است. تشکیل مارتنزیت، نیازمند سریع سرد کردن و بنابراین، متوقف کردن دگرگونی نفوذی می باشد، البته شرایط دقیق سرد کردن که در یک فولاد مشخص منجر به تشکیل مارتنزیت می شود، بستگی به درصد کربن، عناصر آلیاژی و اندازه دانه های آستنیت دارد. در قسمت پایانی این فصل، بینیت^۳ که در بازه دمایی محدود بین پایین ترین دمای تشکیل پرلیت و بالاترین دمای تشکیل مارتنزیت به وجود می آید، بررسی خواهد شد. بینیت، محصول دگرگونی خاصی است که در آن، هر دو سازوکار نفوذی و برشی نقش دارند.

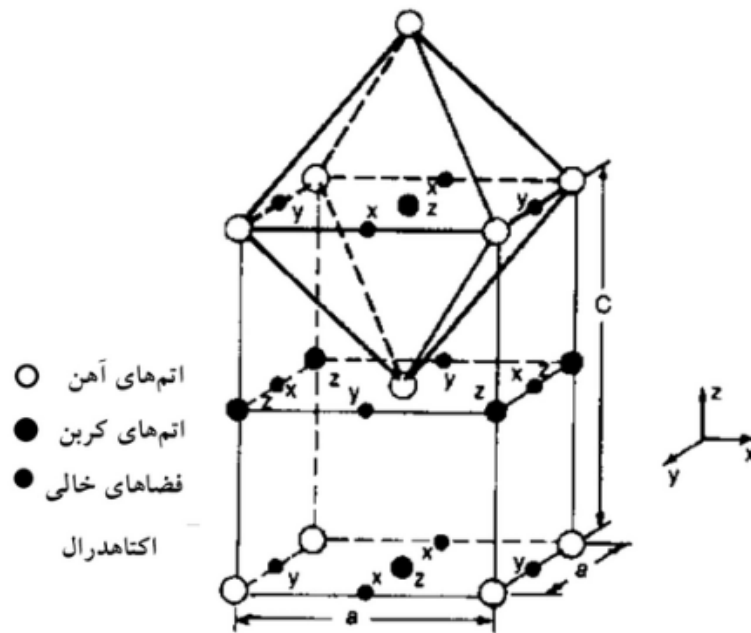
مارتنزیت و دگرگونی مارتنزیتی

□ در دگرگونی مارتنزیتی تاکید بر ماهیت دگرگونی است: جابجایی گروهی. Cu-Al , Au-Cd و اکسیدها مثل ZrO_2 و SiO_2

□ در آلیاژهای آهن-کربن و فولادها، مارتنزیت از سرد کردن سریع آستنیت بوجود می‌آید.

□ از آنجایی که دگرگونی آستنیت به مارتنزیت، بدون نفوذ انجام می‌شود، با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژ، تا دو درصد کربن، مارتنزیت می‌تواند بطور کامل همان ترکیب شیمیایی آستنیت اولیه را داشته باشد.

□ برخلاف تشکیل پرلیت، اتم‌های کربن در فضاهای هشت وجهی شبکه بلوری آهن محبوس می‌شوند و فاز جدید مارتنزیت را بوجود می‌آورند. با تشکیل مارتنزیت، کربن محلول در شبکه آهن به مقدار زیادی افزایش می‌یابد، و جاهای خالی بیشتری از شبکه توسط کربن اشغال می‌شود. در نتیجه شبکه بلوری از bcc به bct (body centered tetragonal) میل می‌کند، که در آن پارامتر c شبکه بزرگ‌تر از دو پارامتر دیگر a است.

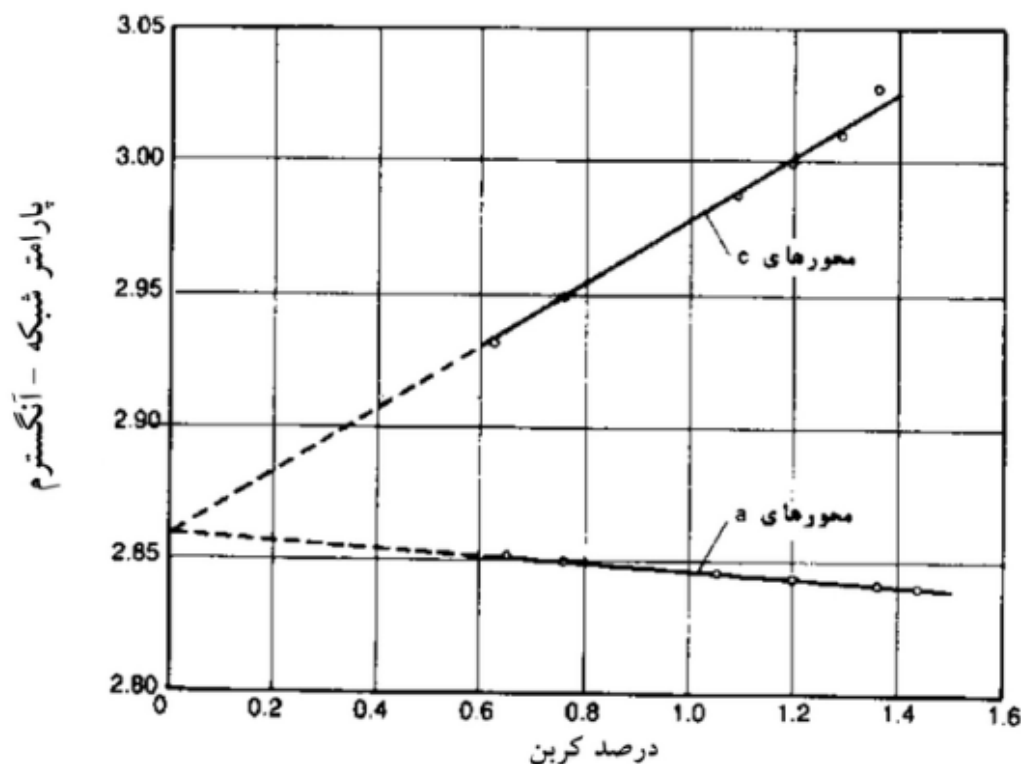


شکل ۱-۳ شبکه بلوری مکعب مستطیل (bct) مارتنزیت در آلیاژهای آهن - کربن. اتم‌های کربن در یک سری از فضاهای هشت وجهی روی محور z محبوس شده، در حالی که فضاهای هشت وجهی محورهای x و y اشغال نشده‌اند [۱].

□ با افزایش درصد کربن آلیاژ، نسبت $\frac{c}{a}$ که به تتراگونالیت (tetragonality) شبکه موسوم می‌باشد، افزایش می‌یابد.

□ از آنجایی که نفوذ در تشکیل مارتنزیت نقشی ندارد، **مارتنزیت فازی ناپایدار** است. اگر مارتنزیت تا دمایی حرارت داده شود که اتم‌های کربن قدرت تحرک کافی برای نفوذ را پیدا کنند، از فضاهای خالی هشت وجهی خارج می‌شوند و سمنتیت تشکیل می‌دهند.

□ شبکه بلوری از حالت مکعب مستطیل خارج شده و فازهای تعادلی یعنی فریت و سمانتیت ایجاد می‌شود. این تجزیه مارتنزیت، **بازگشت** (بازپخت، تمپر، **Tempering**) نامیده می‌شود.



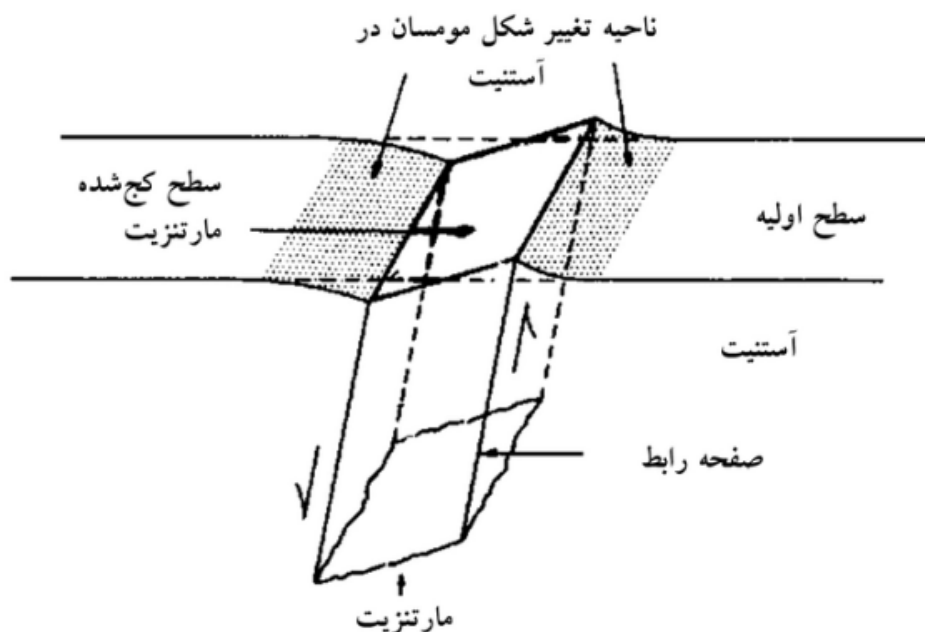
شکل ۲-۳ اثر درصد کربن در فولاد ساده کربنی روی اندازه پارامترهای a و c مارتنزیت [۱].

□ مارتنزیت توسط یک **سازوکار برشی** بوجود می‌آید. بلور مارتنزیت تشکیل شده در اثر برش، از یک طرف به سمت بالا و از طرف دیگر به سمت پایین ناحیه آستنیت اولیه بطور مورب جابجا می‌شود. بنابراین سطح افقی آستنیت مادر توسط دگرگونی برشی چرخیده و در موقعیت جدید بلوری قرار گرفته است. **کج شدن سطوح**، یک دیگر از ویژگی‌های مهم دگرگونی مارتنزیتی یا برشی است.

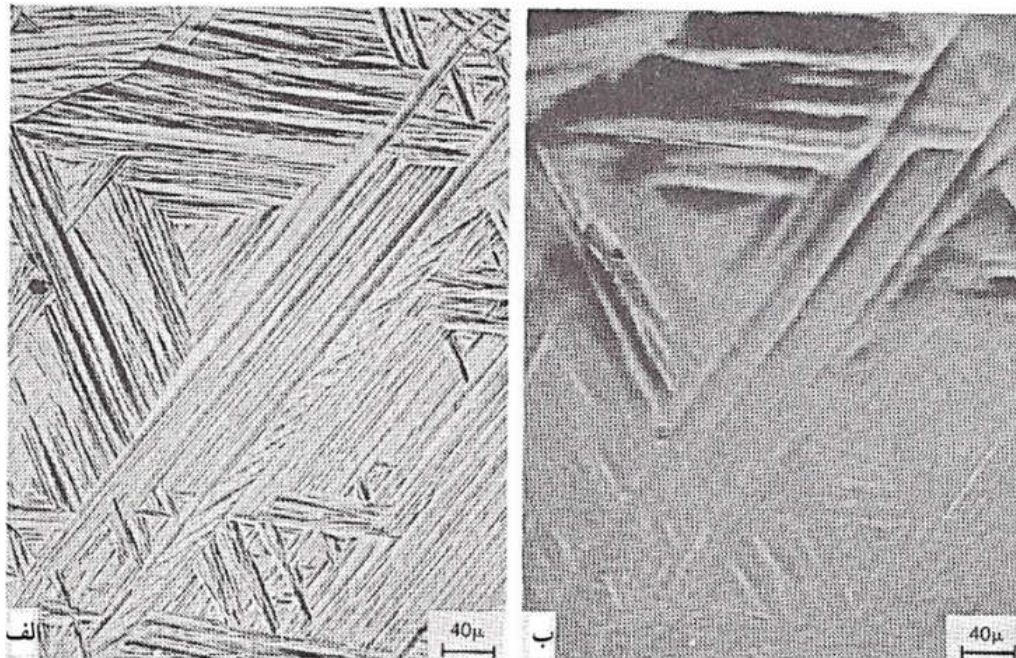
□ تشکیل مارتنزیت، همواره همراه با مقدار چشمگیری **تغییر شکل مومسان در فاز آستنیت مادر** است. نیروی عکس‌العمل حاصل از تغییر شکل مومسان آستنیت روی بلور مارتنزیت، رشد بلور مارتنزیتی را محدود می‌کند و ادامه دگرگونی فقط با جوانه‌زنی بلورهای جدید مارتنزیتی امکان‌پذیر است. اگر فاز آستنیت نتواند تغییر شکل‌های مومسان را تحمل کند، در فصل مشترک‌های مارتنزیت-آستنیت مادر، **جدایش یا ترک‌خوردگی** ایجاد می‌شود.

□ در فولادها فاز آستنیت از انعطاف‌پذیری کافی برای تحمل تغییر شکل مومسان ناشی از تشکیل مارتنزیت برخوردار است. اما در سرامیک‌ها خیر و باید از این دگرگونی اجتناب کرد.

□ صفحه‌هایی از شبکه بلوری آستنیت که بلورهای مارتنزیت روی آنها تشکیل می‌شوند به **صفحه‌های رابط (Habit plane)** موسوم‌اند. با تغییر ترکیب شیمیایی فولاد، صفحه‌های رابط نیز تغییر می‌کنند.



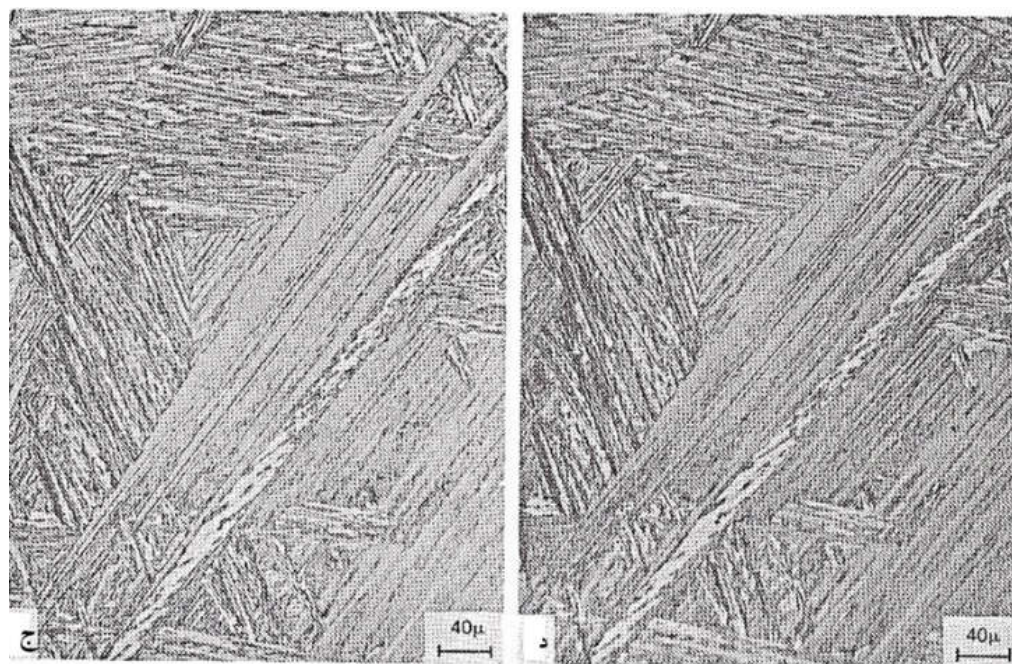
نمونه‌ای از برجستگی سطح و ارتباط آن با ریزساختار مارتنزیت در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. ریزساختارهای نوری نشان داده شده در شکل ۳-۴، مربوط به نمونه‌ای از فولاد Fe-0.2\%C است که پس از پولیش، در اتمسفر گاز آرگون، آستینیت و سپس سریع سرد شده است. شکل ۳-۴-الف، برجستگی سطح ناشی از تشکیل صدها بلور مارتنزیت را نشان می‌دهد. اثرهای تیره‌رنگ موجود در بعضی از نواحی سطح نمونه که ناشی از منحرف شدن آن نواحی از مسیر شعاع‌های نوری هستند، شاهده‌ی برج شدن یا چرخش سطوح می‌باشند. در شکل ۳-۴-ب، برجستگی‌های سطحی به طور جزئی پولیش شده‌اند. در شکل ۳-۴-ج، سطح نشان داده شده در قسمت ب پس از حکاکی نشان داده شده است. سرانجام شکل ۳-۴-د، ریزساختار نمونه را پس از این که برجستگی‌های سطح توسط پولیش به طور کامل حذف شده‌اند و نمونه، دوباره حکاکی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴ کج شدن سطح و اثر آن روی ریزساختار مارتنزیت در فولاد Fe-0.2\%C .
 (الف) کج شدن سطح بعد از سریع سرد شدن، (ب) ناحیه نشان داده شده در تصویر الف که به طور جزئی پولیش شده است، (ج) ناحیه نشان داده شده در تصویر ب پس از حکاکی و (د) همان ناحیه پس از پولیش کامل برای برطرف کردن برجستگی‌ها و حکاکی دوباره. محلول حکاکی نایتال [۱].

مقایسه شکل‌های ۳-۴-ج و ۳-۴-د با شکل ۳-۴-الف، ارتباط و تطابق بین برجستگی‌های سطح را با واحدهای مارتنزیتی در ریزساختارهای نمونه‌های پولیش و حکاکی شده نشان می‌دهد. در مقاطع پولیش و حکاکی شده، تک‌بلورهای مارتنزیتی طویل و نازک پدیدار می‌گردند و بیشتر به صورت سوزنی شکل دیده می‌شوند، اما در شرایط سه‌بعدی، بلورهای مارتنزیت به شکل لایه‌ای^۱ یا بشقابی^۲ با فصل مشترک صاف و مسطح وجود دارند (شکل ۳-۳). بنابراین، شکل سوزنی بلورهای مارتنزیت که روی نمونه‌های پولیش و حکاکی شده پدیدار می‌شود، در واقع، سطح مقطعی از یک لایه یا بشقاب مارتنزیتی است.

- 1 Lath
- 2 Plate



شکل ۳-۴ کج شدن سطح و اثر آن روی ریزساختار مارتنزیت در فولاد Fe-0.8\%C (الف) کج شدن سطح بعد از سریع سرد شدن، (ب) ناحیه نشان داده شده در تصویر الف که به طور جزئی پولیش شده است، (ج) ناحیه نشان داده شده در تصویر ب پس از حکاکی و (د) همان ناحیه پس از پولیش کامل برای برطرف کردن برجستگی‌ها و حکاکی دوباره. محلول حکاکی نایتال [۱].

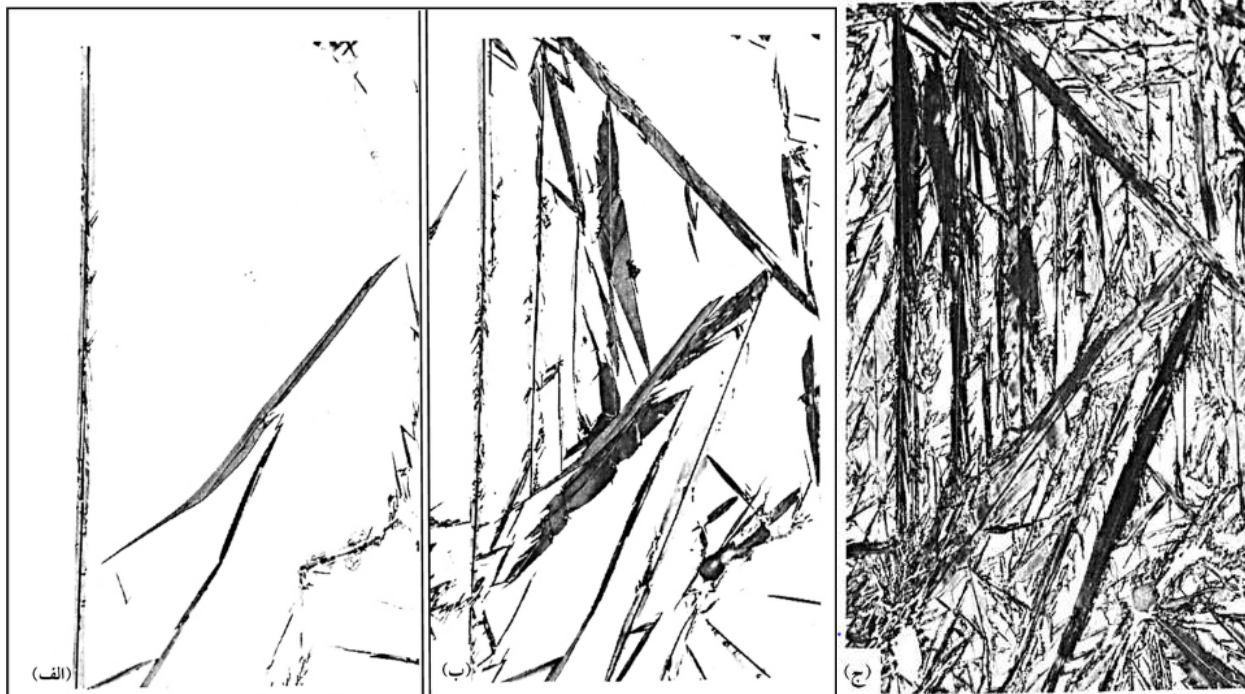
سینتیک تشکیل مارتنزیت

□ در بیشتر فولادها، تشکیل مارتنزیت از آستنیت در ضمن کاهش دما بطور پیوسته انجام می‌شود. این نوع دگرگونی‌ها که نیاز به فعالیت حرارتی و جابجایی انفرادی اتم‌ها ندارد، به دگرگونی‌های اترمال (Athermal) موسوم‌اند.

□ درصد مارتنزیت تشکیل شده **تابعی از مقدار تحت تبرید** آستنیت نسبت به خط A1 است. اگر آستنیت خیلی سریع تا دمایی تا زیر دمای تشکیل مارتنزیت سرد شود، مارتنزیت **بلافاصله** تشکیل می‌شود.

□ در صورتیکه در مورد تشکیل پرلیت، دردمایی ثابت زیر A1، پرلیت بصورت پیوسته و **تابعی از زمان** تشکیل می‌شود.

□ اگر قبل از اینکه تمامی آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود، سرد کردن متوقف گردد، تشکیل مارتنزیت نیز متوقف می‌شود و ادامه آن منوط به کاهش دما است.



شکل ۳-۵ پیشرفت یک دگرگونی اترمال را نشان می‌دهد. از آنجایی که آستنیت در فولاد پرکربن یادشده، به نسبت پایدار است، تشکیل مارتنزیت در دمایی حدود دمای اتاق شروع می‌شود.

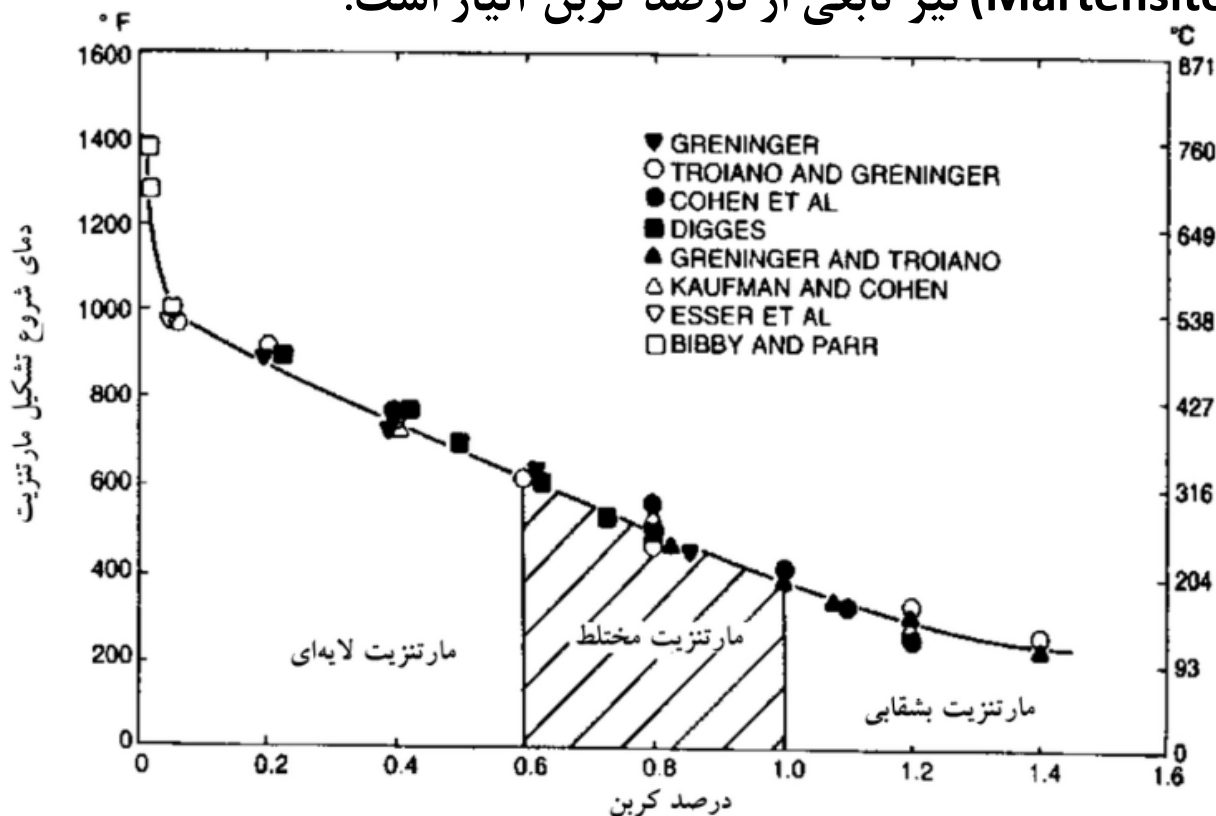
شکل ۳-۵ پیشرفت دگرگونی اترمال مارتنزیتی در آلیاژ Fe-0.1%C پس از سرد شدن تا دمای: (الف) ۲۴، (ب) ۶۰ و (ج) ۱۰۰- درجه سانتی‌گراد. محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی $\times 500$ [۱].

□ دمایی که در یک آلیاژ، دگرگونی آستنیت به مارتنزیت شروع می‌شود را **دمای شروع تشکیل مارتنزیت** می‌نامند و آن را با M_s نشان می‌دهند، که بیان کننده مقدار نیروی محرکه ترمودینامیکی لازم برای شروع دگرگونی برشی آستنیت به مارتنزیت است.

□ شکل ۳-۶ نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن، دمای M_s به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. کربن موجود بصورت محلول جامد، استحکام یا مقاومت برشی آستنیت را افزایش داده و بنابراین نیروی محرکه بیشتری جهت شروع لغزش برای تشکیل مارتنزیت لازم است.

□ این نیروی محرکه توسط تحت تبرید بیشتر (M_s کمتر) تامین می‌شود.

□ دمای پایان تشکیل مارتنزیت (M_f Martensite finish) نیز تابعی از درصد کربن آلیاژ است.

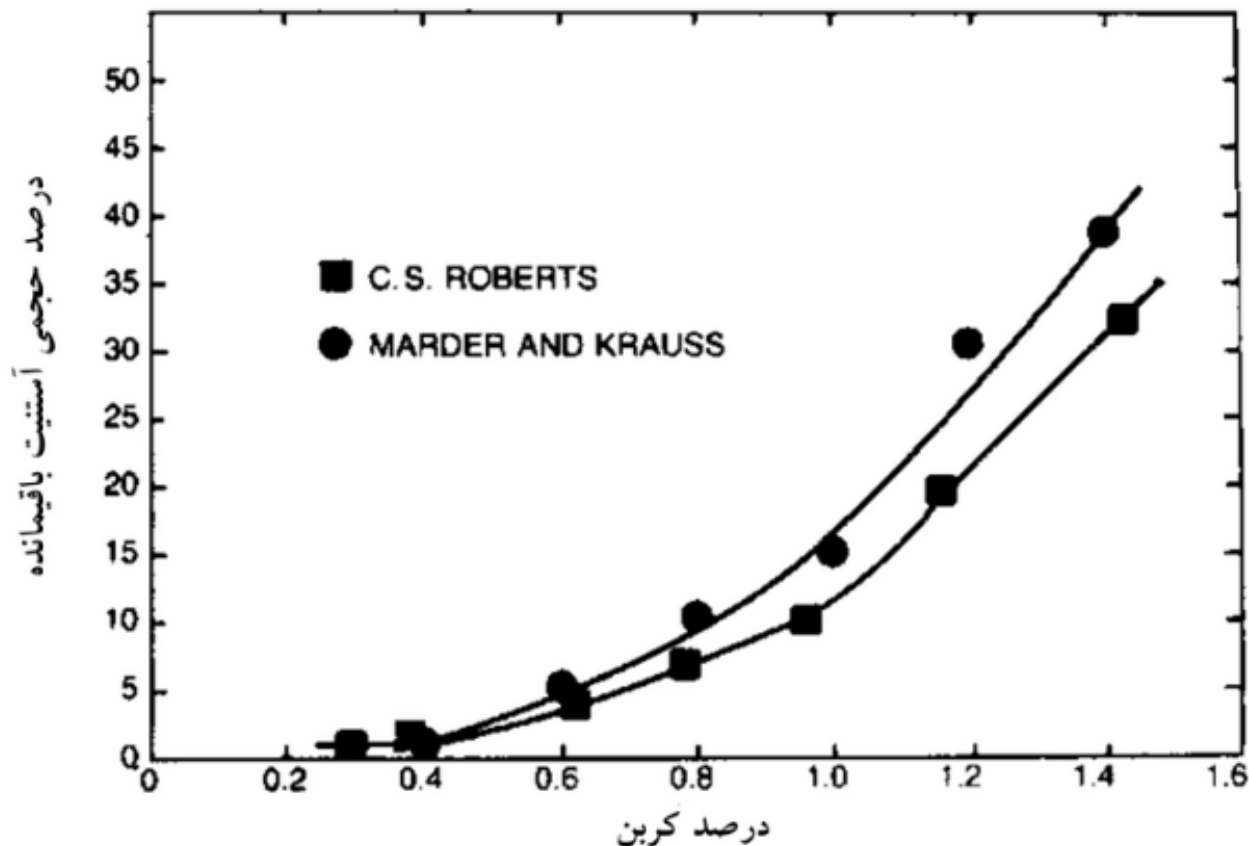


□ دمای M_f آلیاژهایی که بیشتر از ۰/۳ درصد کربن دارند، زیر دمای اتاق است.

شکل ۳-۶ دمای شروع تشکیل مارتنزیت (M_s) بر حسب درصد کربن فولاد. گستره درصد

کربن برای مارتنزیت‌های لایه‌ای و بشقابی در آلیاژهای آهن - کربن نیز مشخص شده است [۱].

در دمای اتاق و به‌ویژه در فولادهای پرکربن، همواره مقدار چشمگیری آستنیت باقی‌مانده همراه مارتنزیت وجود دارد (در فولاد $1.2-1.4\%C$ حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد است). برای هر درصد کربن و دمای داده شده، عناصر آلیاژی که باعث پایداری آستنیت می‌شوند، مقدار آستنیت باقی‌مانده را افزایش می‌دهند.



شکل ۷-۳ آستنیت باقیمانده بر حسب درصد کربن فولاد در آلیاژهای آهن - کربن [۱].

در جدول ۱-۳ ارتباط بین M_s و عناصر آلیاژی فولادها نشان داده شده است. بطور کلی تمامی عناصر آلیاژی به جز کبالت، دمای M_s را کاهش می‌دهند.

جدول ۱-۳ لیست فرمول‌هایی که می‌توان با استفاده از آنها دمای M_s یک فولاد را با توجه به ترکیب شیمیایی آن مشخص کرد [۱].

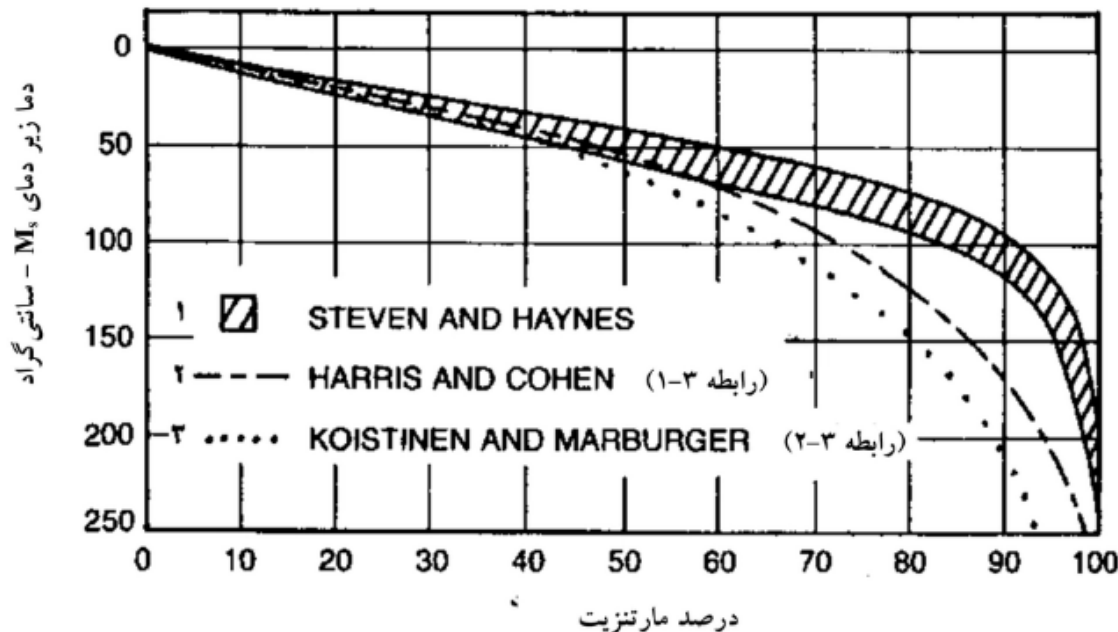
شماره	تاریخ	رابطه
۱	۱۹۴۴	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 570\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$
۲	۱۹۴۴	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 925 \times (1 - 0.00620\text{C})(1 - 0.0033\text{Si})(1 - 0.0045\text{Ni})$ $(1 - 0.0070\text{Cr})(1 - 0.0029\text{Mo})(1 - 0.0018\text{W})(1 + 0.0120\text{Co})$
۳	۱۹۴۶	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 600\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$
۴	۱۹۴۶	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 1000 - 650\text{C} - 70\text{Mn} - 70\text{Cr} - 35\text{Ni} - 50\text{Mo}$
۵	۱۹۴۶	$M_s (^{\circ}\text{F}) = 930 - 540\text{C} - 60\text{Mn} - 40\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo}$
۶	۱۹۵۶	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 561 - 474\text{C} - 33\text{Mn} - 17\text{Cr} - 17\text{Ni} - 21\text{Mo}$
۷	۱۹۶۵	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 539 - 423\text{C} - 30.4\text{Mn} - 12.1\text{Cr} - 17.7\text{Ni} - 7.5\text{Mo}$
۸	۱۹۶۵	$M_s (^{\circ}\text{C}) = 512 - 453\text{C} - 16.9\text{Ni} + 15\text{Cr} - 9.5\text{Mo}$ $+ 217(\text{C})^2 - 71.5(\text{C})(\text{Mn}) - 67.6(\text{C})(\text{Cr})$

با داشتن M_s یک فولاد، مقدار مارتنزیت تشکیل شده در یک دگرگونی اترمال که فقط تابعی از مقدار تحت تبرید در زیر دمای M_s است را می‌توان مشخص کرد.

$$f = 1 - 6.96 \times 10^{-15} (455 - \Delta T)^{5/32}$$

$$f = 1 - \exp \left[- (1.10 \times 10^{-2} \Delta T) \right]$$

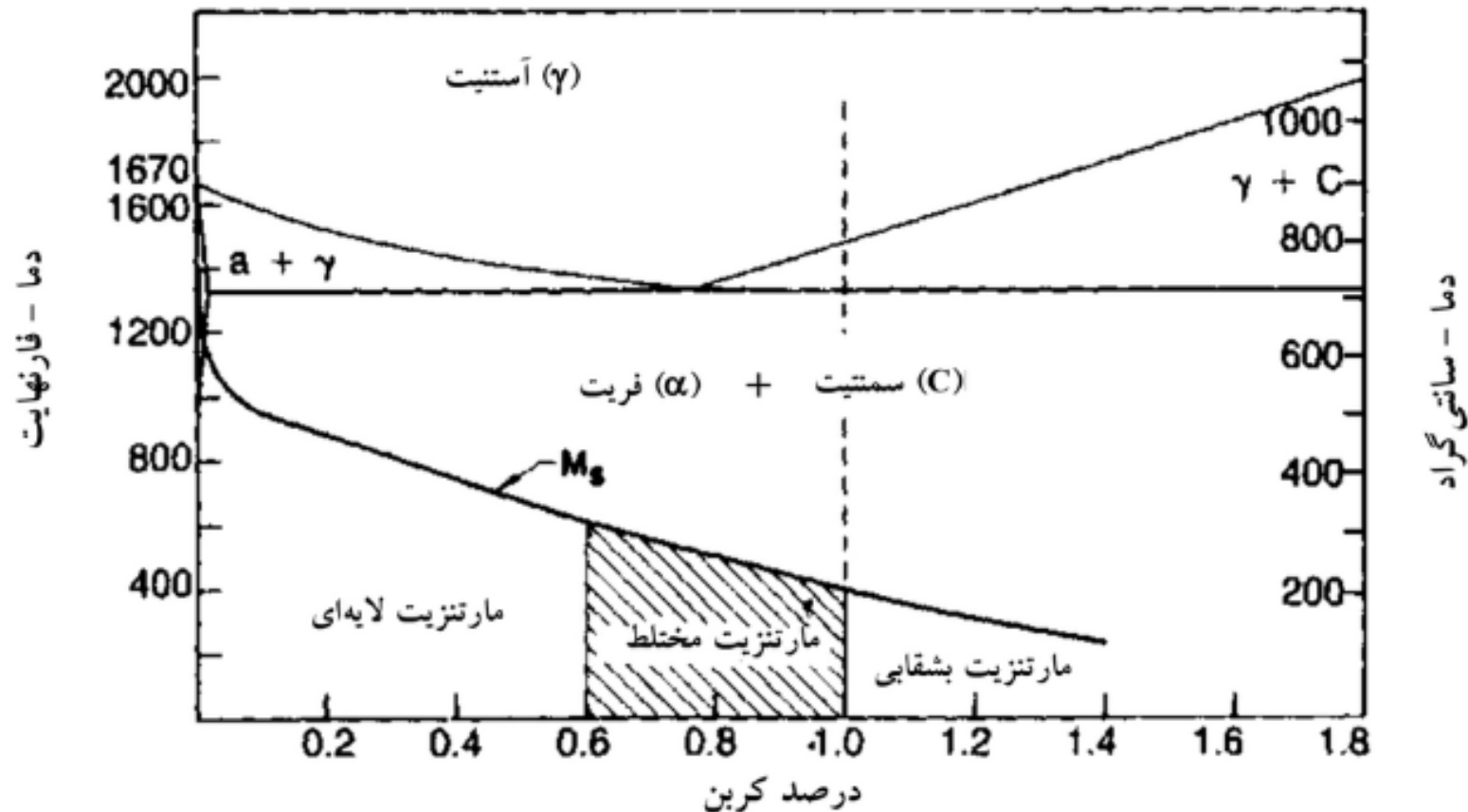
که در اینجا، f ، تابع حجمی مارتنزیت و ΔT ، مقدار تحت تبرید در زیر دمای M_s است. رابطه اول، برای فولادهای ساده کربنی با ۱/۱ درصد کربن و رابطه دوم، برای آلیاژهای آهن - کربن شامل ۰/۳۷ تا ۱/۱ درصد کربن ارایه شده است.



شکل ۸-۳ پیشرفت دگرگونی مارتنزیتی بر حسب مقدار تحت تبرید نسبت به دمای شروع تشکیل مارتنزیت [۱].

شکل‌های مختلف مارتنزیت در فولادها

□ در فولادهای کربنی عملیات حرارتی پذیر، مارتنزیت به دو شکل **لایه‌ای و بشقابی** دیده می‌شود. (Plate Lath, □ مرز بین نواحی مختلف، براساس نتایج بدست آمده از آلیاژهای آهن-کربن با درجه خلوص بالاست و می‌تواند در فولادهای آلیاژی تغییر کند. واژه‌های لایه و بشقاب، به شکل سه بعدی بلورهای منفرد مارتنزیت مربوط می‌شود.



شکل ۳-۹ بازه درصد کربن برای تشکیل مارتنزیت لایه‌ای و بشقابی در آلیاژهای آهن - کربن [۱].

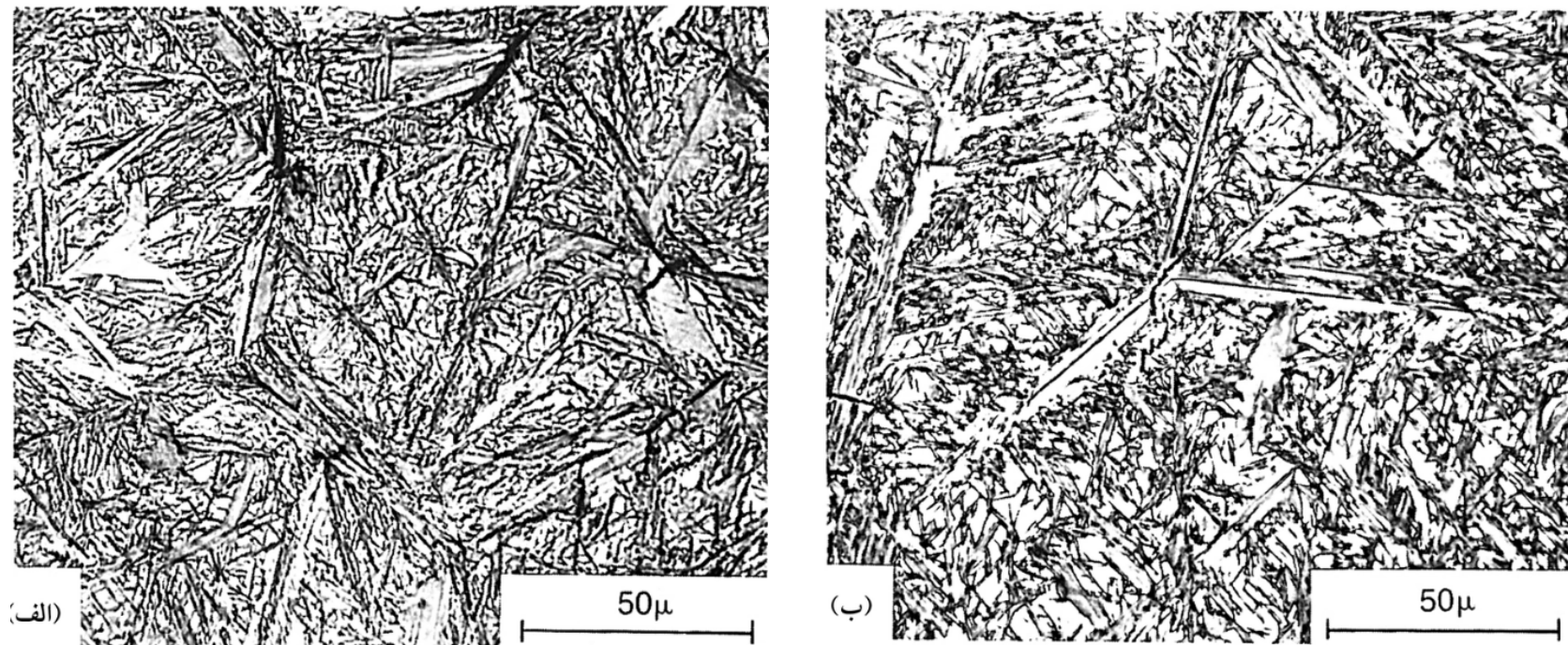
در زیر میکروسکوپ، ساختار مارتنزیت، سوزنی شکل است. در حقیقت، سوزن‌های یادشده، مقاطع لایه‌ها و بشقاب‌های مارتنزیتی با صفحه پولیش‌اند که پس از پولیش و حکاکی پدیدار می‌شوند. گاهی بر اساس ویژگی‌های دیگر مارتنزیت، واژه‌های دیگری به جز لایه‌ای و بشقابی برای توصیف و تشخیص مارتنزیت به کار می‌روند.

واحدهای تشکیل‌دهنده مارتنزیت بشقابی شکل، از نظر اندازه و ابعاد، به طور کامل در بازه تشخیص میکروسکوپ نوری قرار دارند. در حقیقت، آستنیت باقیمانده که در آلیاژهای پرکربن همراه با مارتنزیت وجود دارد، در بهتر نمایان شدن بشقاب‌های مارتنزیتی در زیر میکروسکوپ نوری اثر دارد. از طرف دیگر، هم‌چنان که نشان داده خواهد شد، بسیاری از واحدهای تشکیل‌دهنده مارتنزیت لایه‌ای شکل، از نظر اندازه و ابعاد، در بازه تشخیص میکروسکوپ نوری نیستند. از طرفی، مقدار و توزیع آستنیت باقیمانده موجود نیز در این حالت طوری است که توسط میکروسکوپ نوری به راحتی قابل تشخیص نیست. از این رو، تا پیش از اختراع میکروسکوپ‌های الکترونی، مارتنزیت بشقابی که به آسانی توسط میکروسکوپ‌های نوری قابل تشخیص بود، بیشترین اهمیت را در زمینه عملیات حرارتی داشت. گرچه مارتنزیت بشقابی در بعضی از کاربردهای عملیات حرارتی مانند ساختار لایه کربن‌داده‌شده^۱ در فولادهای سمانتاسیون اهمیت زیادی دارد، ولی بیشتر فولادهایی که قابلیت سختی‌پذیری دارند، دارای درصد کربن کم یا متوسط هستند و بنابراین، ریزساختار آنها شامل مارتنزیت لایه‌ای است. در نتیجه می‌توان ادعا کرد که مارتنزیت لایه‌ای اهمیت صنعتی زیادتری دارد.

* مارتنزیت بشقابی

مارتنزیت بشقابی در فولادهای پرکربن و همچنین آلیاژهای آهنی دیگر بوجود می‌آید. این ریزساختار از تیغه‌های درشت و سوزنی‌شکل مارتنزیت که بیش‌تر وقت‌ها توسط مقدار زیادی آستنیت باقی‌مانده احاطه شده‌اند، تشکیل شده است.

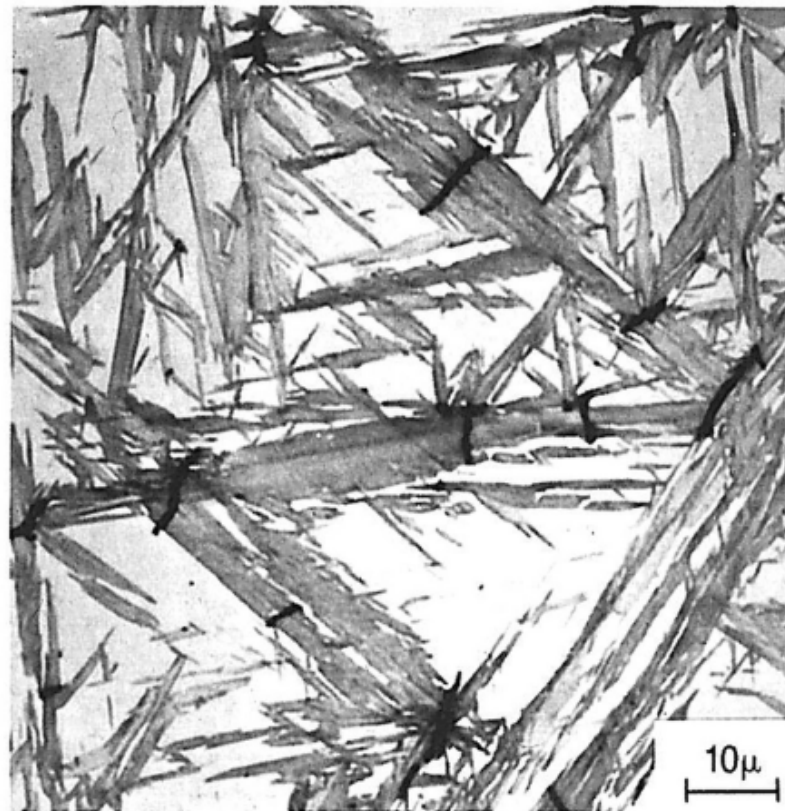
تیغه‌های مارتنزیتی در فولادهای پرکربن، نخست مستقل از یکدیگر روی صفحه‌های رابط مشخص بوجود می‌آیند و در ادامه انجام دگرگونی، تیغه‌های جدید مارتنزیت از تیغه‌های قبلی مارتنزیت، شروع و یا به آن‌های ختم می‌شوند.



شکل ۳-۱۰ مارتنزیت بشقابی (سوزن‌های تیره‌رنگ) و آستنیت باقیمانده (نواحی سفیدرنگ)

در: (الف) آلیاژ $\text{Fe}-1/2\text{C}$ و (ب) آلیاژ $\text{Fe}-1/4\text{C}$. ریزساختار نوری [۱].

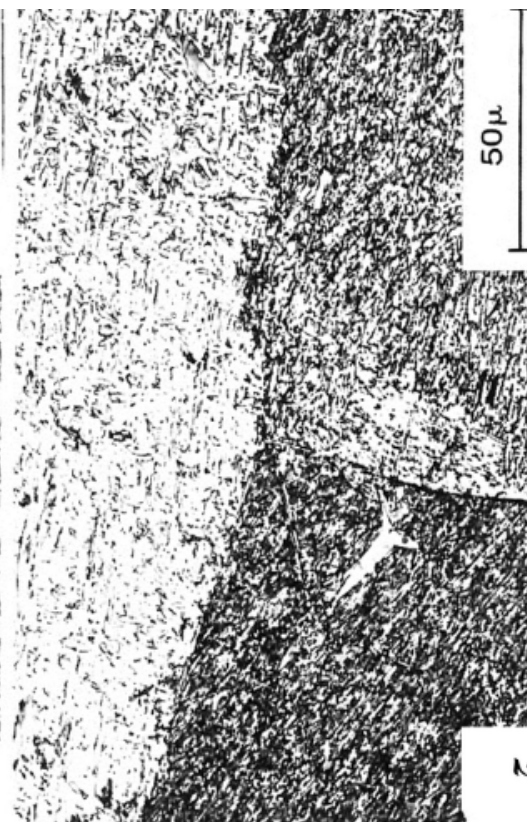
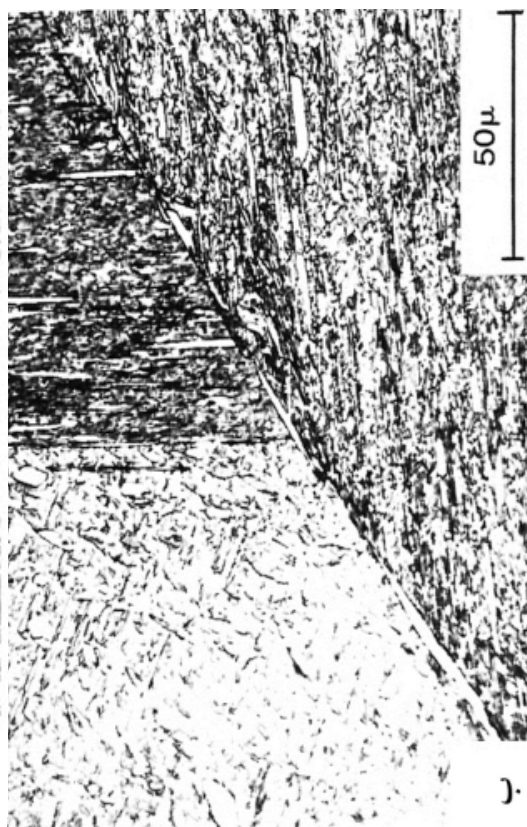
در اثر برخورد تیغه‌های متقاطع مارتنزیتی در آلیاژهای آهن-کربن، **ترک‌های مویی** ایجاد می‌شود. ترک‌های مویی تمایل دارند که **در بزرگ‌ترین تیغه‌های مارتنزیت** تشکیل شوند. در فولادهای ریزدانه، از آنجایی که تیغه‌های مارتنزیت **ظریف‌تر** هستند، امکان تشکیل ترک‌های مویی **کاهش** می‌یابد. همچنین از آنجایی که در فولادهای کم‌کربن اندازه واحدهای منفرد مارتنزیت کاهش پیدا می‌کند، امکان برخورد آن‌ها با یکدیگر و در نتیجه ایجاد ترک‌های مویی حذف می‌شود. **مارتنزیت بشقابی در فولادهای پرکربن، نسبتاً شکننده و حساس به ترک‌های مویی است.**



شکل ۱۱-۳ ترک‌های مویی در مارتنزیت بشقابی مربوط به فولاد $\text{Fe}-\frac{1}{4}\text{C}$ [۱].

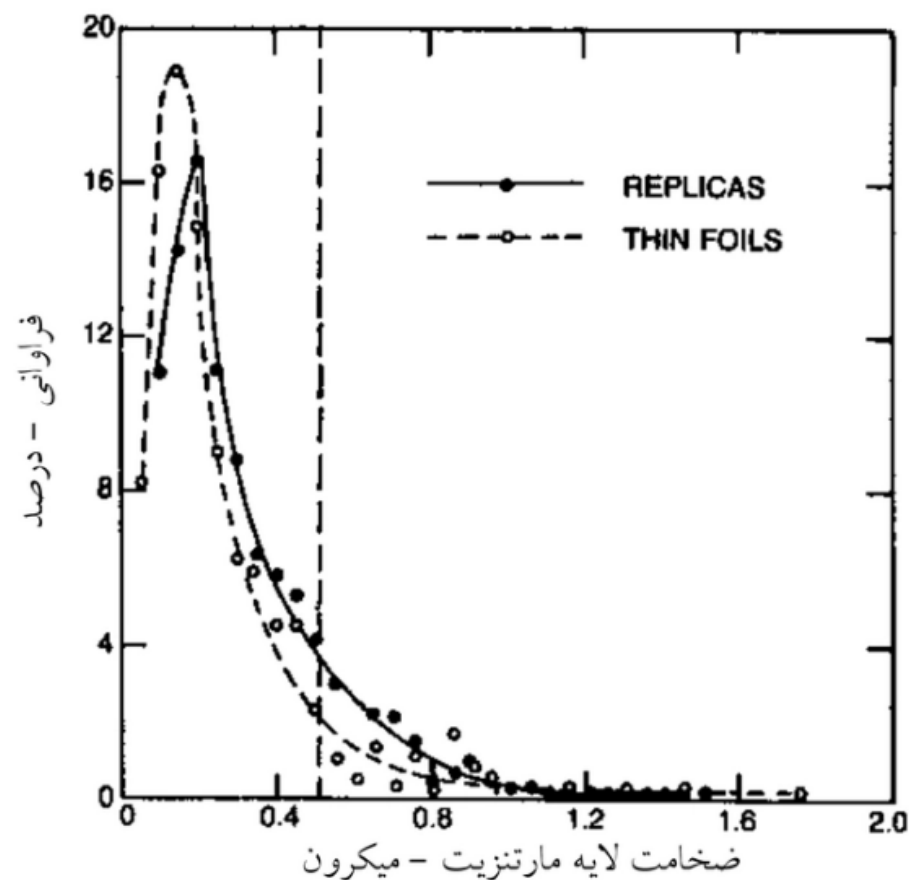
* مارتنزیت لایه‌ای شکل

یکی از ویژگی‌های مهم ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای شکل، **موازی قرار گرفتن تعداد زیادی لایه‌های** مارتنزیتی در نواحی گسترده‌ای از دانه‌های آستنیت اولیه است. هرکدام از این نواحی از یک سری صفحه‌هایی با لایه‌های موازی تشکیل شده است، که به **بسته مارتنزیت (Martensite packet)** موسوم است. با کاهش درصد کربن تمایل به تشکیل این بسته‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲-۳ ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای در فولادهای: (الف) $\text{Fe}-0.2\% \text{C}$ ، (ب) $\text{Fe}-0.4\% \text{C}$ و (ج) $\text{Fe}-0.6\% \text{C}$. تصویر میکروسکوپی نوری [۱].

با کاهش درصد کربن، ابعاد لایه‌های مارتنزیت کاهش می‌یابد. بنابراین با کاهش کربن فولاد، درصد مارتنزیت قابل تشخیص توسط میکروسکوپ نوری کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۱۳ توزیع ضخامت لایه‌های مارتنزیت در فولاد $\text{Fe}-\text{C}$ ۰.۲٪
خط عمودی، مشخص‌کننده حد تشخیص میکروسکوپ نوری است [۱].

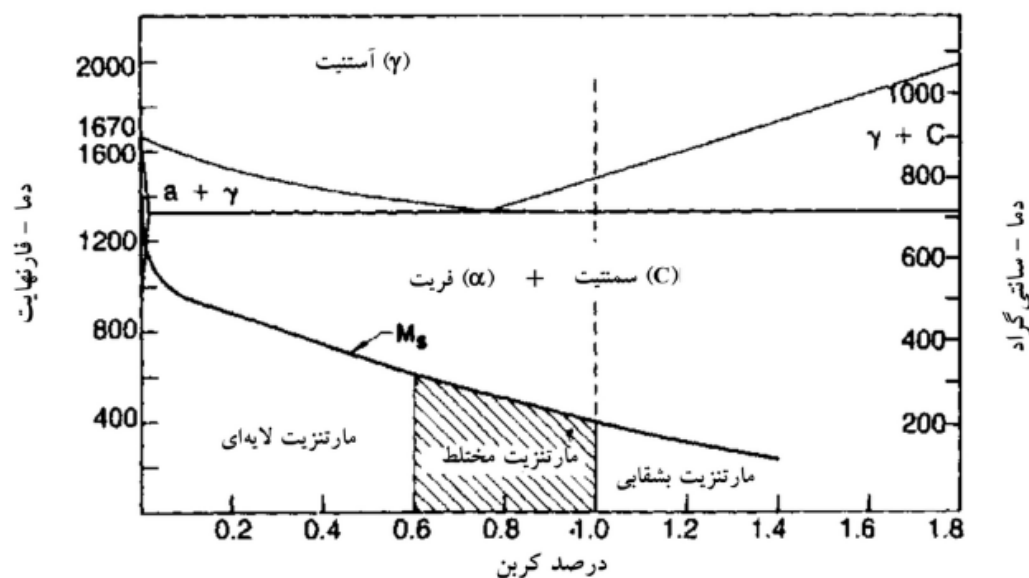
* مارتنزیت مختلط

□ در آلیاژهای آهن-کربن با ۰/۶ تا ۱ درصد کربن، هر دو نوع مارتنزیت لایه‌ای و بشقابی در کنار یکدیگر به وجود می‌آیند. در این بازه با افزایش درصد کربن احتمال تشکیل مارتنزیت بشقابی افزایش می‌آید و واحدهای منفرد مارتنزیتی تشکیل شده نیز درشت‌تر می‌شوند.

□ عامل تعیین کننده نوع مارتنزیت، دمای تشکیل آن است. به این صورت که اگر دمای M_s زیر یک دمای بحرانی باشد، مارتنزیت بدست آمده، بیش‌تر از نوع بشقابی است.

□ از آن جایی که دمای M_s یک فولاد توسط درصد کربن آن کنترل می‌شود، می‌توان گفت که نوع مارتنزیت نیز توسط درصد کربن آن مشخص خواهد شد.

□ از اینرو بر اساس درصد کربن فولاد در این محدوده (۰.۶-۱٪)، یک محدوده دمایی برای تشکیل مارتنزیت وجود دارد. برای فولاد ساده کربنی، بازه دمایی ۲۰۰ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد، بازه دمایی برای تشکیل مخلوط مارتنزیت لایه‌ای و بشقابی است.



بینیت و دگرگونی بینیتی

□ بینیت در فولادها، در بازه دمایی پایین‌ترین دمای تشکیل پرلیت (P_f) و بالاترین دمای تشکیل مارتنزیت (M_s) تشکیل می‌شود.

□ دگرگونی بینیتی از بعضی جنبه‌ها شبیه به دگرگونی پرلیتی و از برخی جنبه‌ها مشابه دگرگونی مارتنزیتی است.

□ بینیت مخلوطی از دو فاز فریت و سمنتیت است. بنابراین دگرگونی بینیتی نیاز به تغییر ترکیب شیمیایی دارد و برای انجام آن نفوذ کربن لازم است.

□ تغییر ترکیب شیمیایی ضمن دگرگونی بینیتی، شامل عناصر آلیاژی جانشینی که ممکن است در فولاد وجود داشته باشد، نمی‌شود. به عبارتی توزیع عناصر مذکور در ضمن تشکیل بینیت تغییر نمی‌کند. بنابراین درصد عناصر آلیاژی در فازهای فریت و سمنتیت، ثابت و برابر همان ترکیب شیمیایی اولیه آستنیت است.

□ همچنین تشکیل بینیت نیاز به زمان دارد و در یک دمای ثابت، چگونگی تغییرات درصد بینیت حاصل از آستنیت برحسب زمان تا حدودی مشابه تشکیل پرلیت است.

□ برخلاف پرلیت، محصول حاصل از دگرگونی بینیتی شامل لایه‌های متناوب فریت و سمنتیت نیست.

- پرلایت در تمام جهات با نرخ یکسان رشد کرده و سرانجام کروی می شود در صورتیکه بینیت بصورت **صفحه‌ای** رشد می کند و زیر میکروسکوپ نوری سوزنی دیده می شود (مشابه مارتنزیت).
- تشکیل صفحه‌های بینیت همراه با اعواج سطحی است و احتمال می رود شامل برش شبکه ای باشد.

□ اختلاف مهم بین تشکیل واحدهای منفرد مارتنزیت و بینیت، **نرخ تشکیل** است. بطور معمول صفحه‌های **مارتنزیتی** تحت اثر نیرو و محرکه زیاد تشکیل می شوند، بنابراین **در کسر کوچکی از ثانیه** تا اندازه نهایی خود رشد می کنند، در حالی که صفحه‌های **بینیتی بطور آهسته و پیوسته** رشد می کنند، که این بدلیل زمان نسبتاً زیاد لازم برای نفوذ است.

□ علت اینکه **فرض می شود**، شروع تشکیل بینیت با بوجود آمدن فریت همراه می باشد این است که با کاهش درصد کربن، دمای M_s افزایش می یابد. بنابراین در بازه دمایی مربوط به تشکیل بینیت، مارتنزیت کم کربن (یا به عبارتی فریت) بطور مستقیم از آستنیت بوجود می آید.

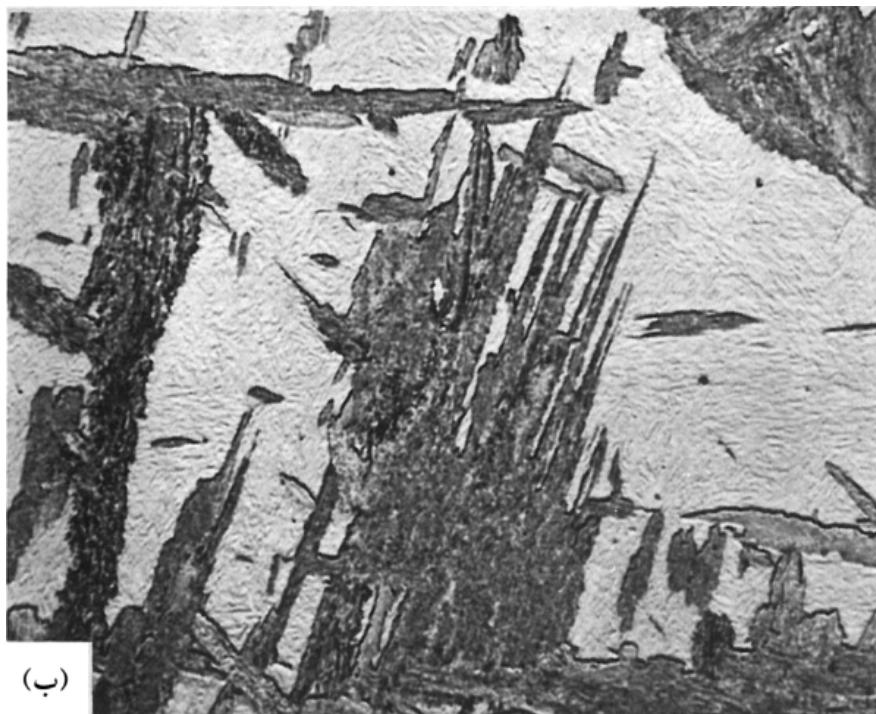
□ در اینجا فرض می شود که رشد تیغه‌های بینیتی که جوانه زده، مشابه رشد تیغه‌های مارتنزیتی است، با این تفاوت که در اینجا **ادامه رشد، نیازمند خارج شدن کربن از فصل مشترک** فریت بینیتی و آستنیت خواهد بود.

بر اساس ریزساختارها، دو شکل عمده بینیت وجود دارد:

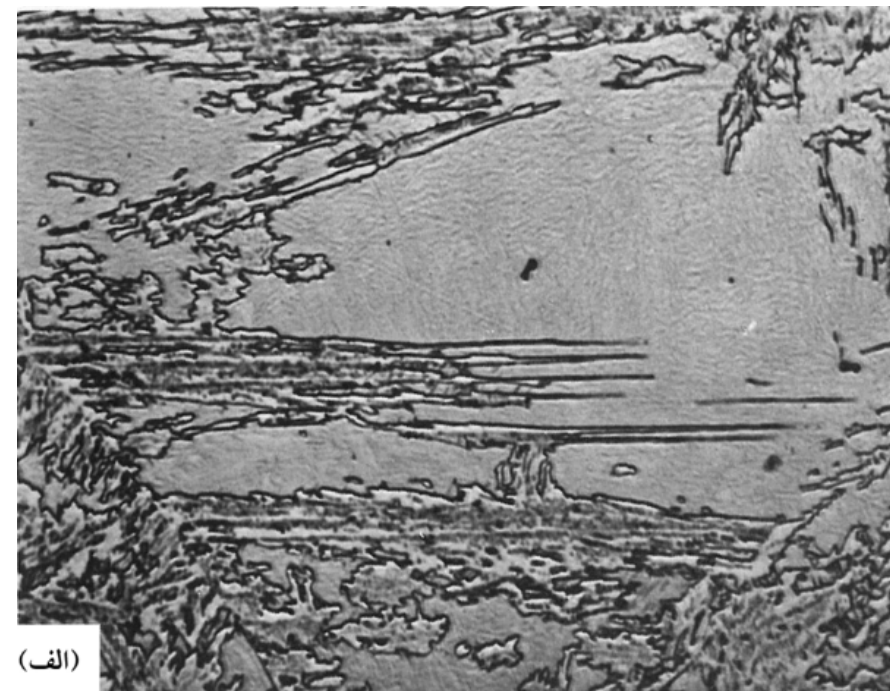
۱- بینیت بالایی^۱ یا بینیت پرشکل^۲ که در بازه دمایی درست زیر دمای تشکیل پرلایت به وجود می آید.

۲- بینیت پایینی^۳ یا بینیت سوزنی شکل^۴ که در دماهایی نزدیک M_s تشکیل می شود.

ریزساختار بینیت بالایی در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. در این شکل، نواحی تیره‌رنگ، بینیت و زمینه سفیدرنگ، آستنیت باقیمانده در دمای تشکیل بینیت است که در اثر سریع سرد شدن به مارتنزیت تبدیل شده است. علت تیره ظاهر شدن بینیت در زیر میکروسکوپ، ناهمواری‌های حاصل از حکاکی فریت در اطراف ذره‌های ریز سمتیت است. سمتیت در این ساختار به اندازه‌ای ریز می‌باشد که با میکروسکوپ نوری قابل تشخیص نیست. در این شکل، ظاهر پرشکل بینیت که از جمله ویژگی‌های خاص و مهم بینیت بالایی است، به خوبی مشخص می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۴ ریزساختار نوری بینیت بالایی در فولاد ۴۳۶۰ در دمای تشکیل: (الف) ۴۹۵ درجه

سانتی‌گراد و (ب) ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد. محلول حکاکی پیکرال، بزرگ‌نمایی $75\times$ [۱].

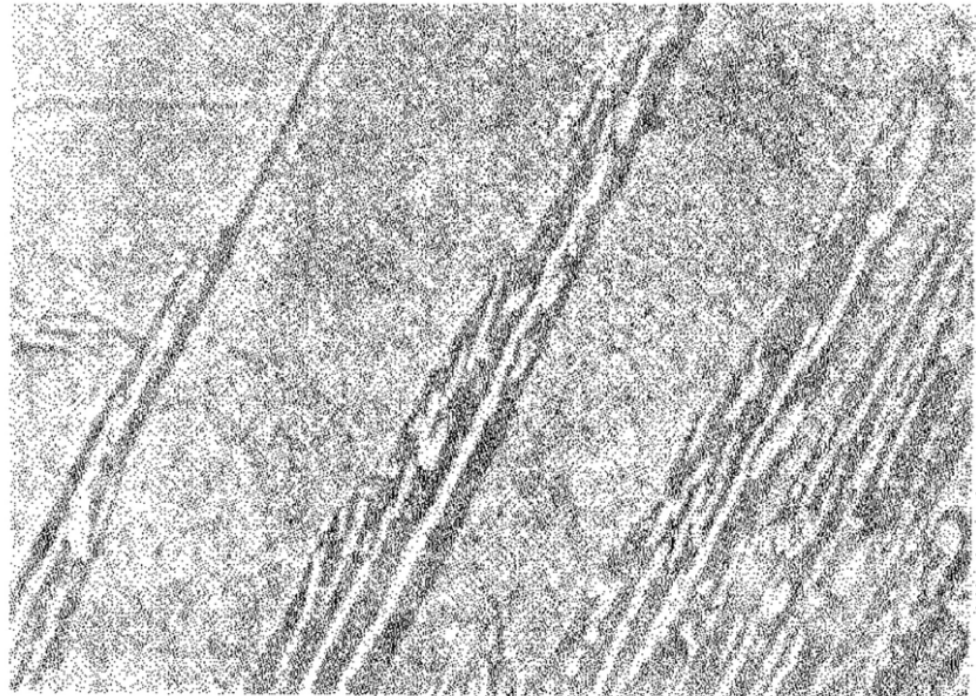
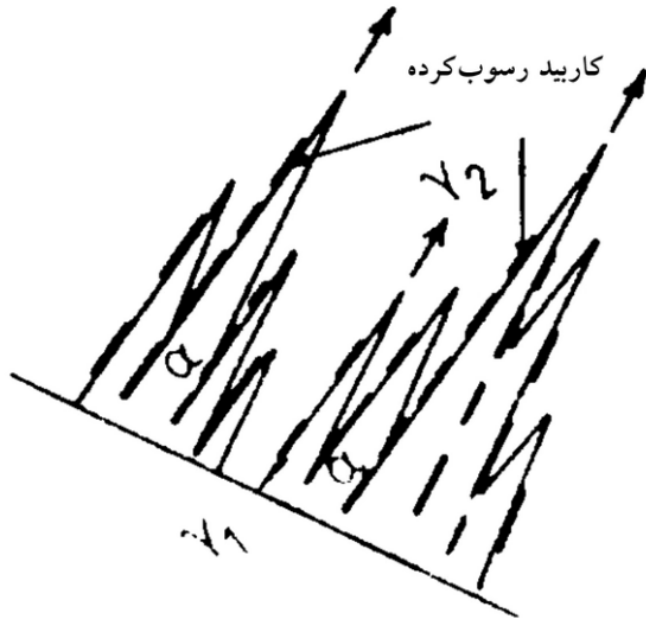
❑ نخستین مرحله دگرگونی تشکیل بینیت بالایی، تشکیل صفحه‌هایی از فریت است که در مقیاس کوچک‌تر بطور کامل شبیه به صفحه‌های فریت ویدمن اشتاتن هستند.

❑ فریت در مرزدانه‌های آستنیت اولیه و یا داخل دانه‌ها به وجود می‌آید. آستنیت در نواحی مجاور از کربن اشباع شده و سمنتیت در فصل مشترک فریت - آستنیت جوانه می‌زند.

❑ پس از پایان دگرگونی هم‌دما، ریزساختار شامل زمینه فریتی است که ذره‌های ریز سمنتیت در مرزهای فرعی و در جهت طولی صفحه‌های فریت رسوب کرده‌اند.

❑ هرچه دمای دگرگونی تشکیل بینیت کم‌تر باشد (البته در محدوده تشکیل بینیت بالایی)، و یا اینکه درصد کربن بیش‌تر باشد، صفحه‌های فریت ظریف‌ترند.

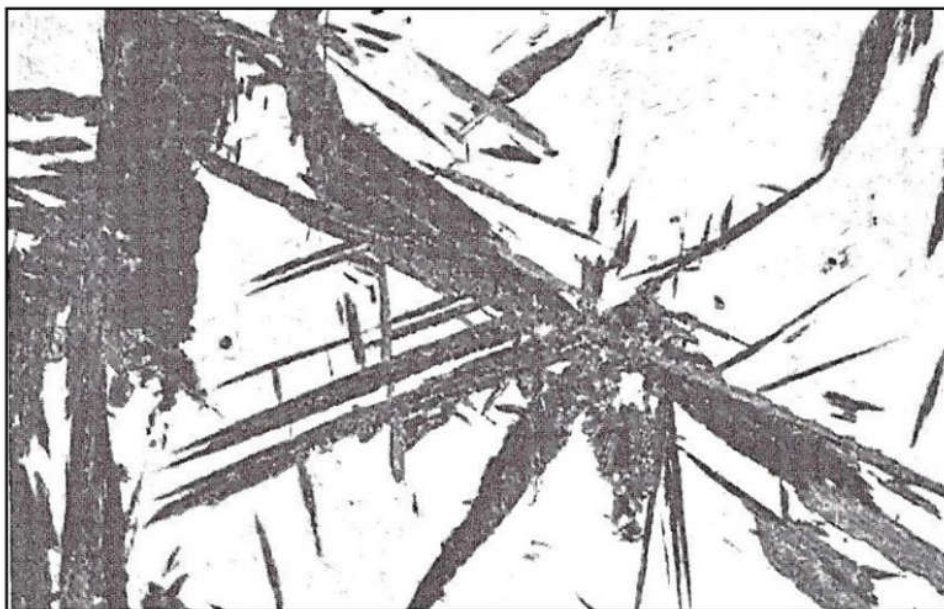
❑ همچنین با افزایش درصد کربن، پیوستگی رشته‌های باریک سمنتیت در مرزهای فرعی بیش‌تر خواهد بود.



شکل ۳-۱۵ شمایی از رشد بینیت بالایی. با رشد فریت، مقدار کربن در فصل مشترک آن با آستنیت افزایش می‌یابد تا این که شرایط برای تشکیل سمنتیت مناسب شود. در این لحظه، سمنتیت در فصل مشترک فریت - آستنیت تشکیل می‌شود [۱۴].

شکل ۳-۱۶ بینیت بالایی در فولاد ساده کربنی با کربن متوسط. ریزساختار الکترونی [۱۴].

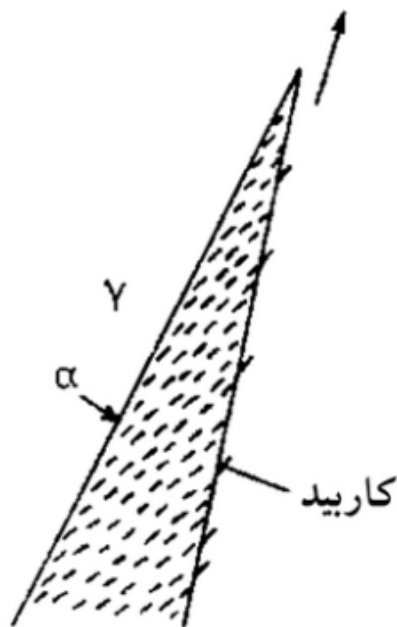
- بینیت پایینی (Lower bainite) یا بینیت سوزنی شکل (Acicular bainite) در دماهایی نزدیک M_s تشکیل می شود.
- از جمله ویژگی های خاص بینیت پایینی ظاهر سوزنی شکل آن است. این سوزنها عبارتند از مقاطع صفحات بزرگ بینیتی با صفحه پولیش که شبیه صفحات مارتنزیتی در فولادهای پر کربن هستند.
- مشابه بینیت بالایی، در اینجا نیز نواحی تیره رنگ، بینیت و زمینه سفید رنگ آستنیت باقی مانده در دمای دگرگونی تشکیل بینیت است.
- در اینجا نیز نخستین مرحله، بوجود آمدن صفحه های فریت از آستنیت است. بدلیل اینکه نفوذ کربن در بازه دمایی تشکیل بینیت پایینی بسیار کم است، صفحه های فریت بسیار نازک اند.



شکل ۳-۱۷ بینیت پایینی در فولاد ۴۳۶۰ که در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد تشکیل شده است. ریز ساختار نوری، محلول حکاکی پیکرال، بزرگ نمایی $750\times$ [۱].

در اینجا برخلاف بینیت بالایی، سمنتیت بجای تشکیل در بین صفحه‌های فریت، داخل خود صفحه‌ها و تحت زاویه ۵۵ درجه با محور طولی صفحه‌های فریت تشکیل خواهد شد. سمنتیت در بینیت پایینی بسیار ریزتر است.

در بعضی از بینیت‌های پایینی به جای سمنتیت، کاربید انتقالی (Transition carbide) یا کاربید اپسیلن (Epsilon carbide) وجود دارد. این نوع کاربید به‌ویژه در فولادهایی که دارای عناصری مانند سیلیسیم و آلومینیم هستند، پایدار است.



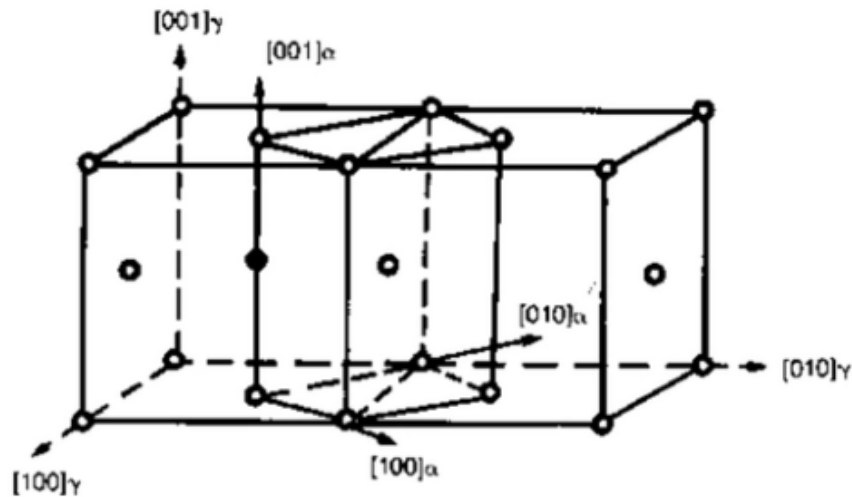
شکل ۳-۱۸ شمایی از رشد بینیت پایینی و ارتباط محور طولی صفحه‌های فریت با رسوب‌های کاربید [۱۴].

شکل ۳-۱۹ بینیت پایینی در فولاد ساده کربنی با ۰/۶۹ درصد کربن. ریزساختار الکترونی [۱۴].

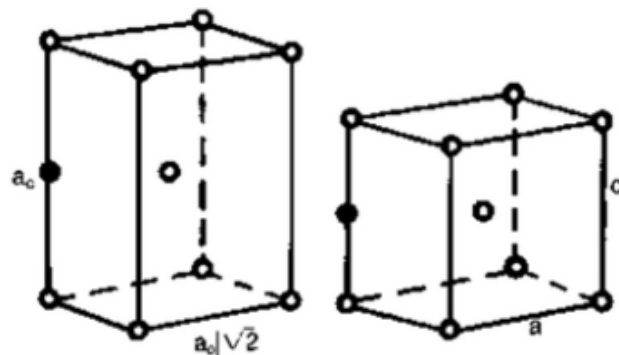
بلورشناسی دگرگونی مارتنزیت

در شکل ۳-۲۰ (الف) دو واحد شبکه‌ای fcc کنار هم مربوط به آستنیت که در آن‌ها یک واحد شبکه bct مشخص شده است را نشان می‌دهد. این تطبیق که یک مجموعه اتم در فاز مادر را به یک مجموعه اتم در فاز محصول تبدیل می‌کند، در اصطلاح به تطبیق شبکه‌ای موسوم است.

برای تشکیل مارتنزیت از آستنیت، یک تغییر شکل شبکه‌ای نیاز است. این تطبیق شبکه‌ای در فولادها به **کرنش بین (Bain)** موسوم است. **کرنش بین شامل یک انقباض در جهت محور a و یک انبساط در امتداد محور c است.**



الف



ب

شکل ۳-۲۰ (الف) یک شبکه مکعب مستطیل مرکزدار در آستنیت، (ب) شبکه fcc قبل (سمت چپ) و بعد (سمت راست) از تغییر شکل (کرنش بین) از آستنیت به مارتنزیت [۱].

Martensitic Transformation

- **Martensite**: austenite quenched to room T
- **Austenite → martensite** does not involve diffusion → no activation: athermal transformation
- Each atom displaces small (sub-atomic) distance to **transform FCC γ -Fe (austenite) to martensite, a Body Centered Tetragonal (BCT)** unit cell (like BCC, but one unit cell axis longer than other two).
- **Martensite is metastable** - persists indefinitely at room T: transforms to equilibrium phases on at elevated temperature
- Since martensite is a metastable phase, it does not appear in phase Fe-C phase diagram.
- The amount of martensite formed is a function of the temperature to which the sample is quenched and not of time.
- The shear changes the shape of the transforming region:
 - results in considerable amount of shear energy
 - plate-like shape of Martensite

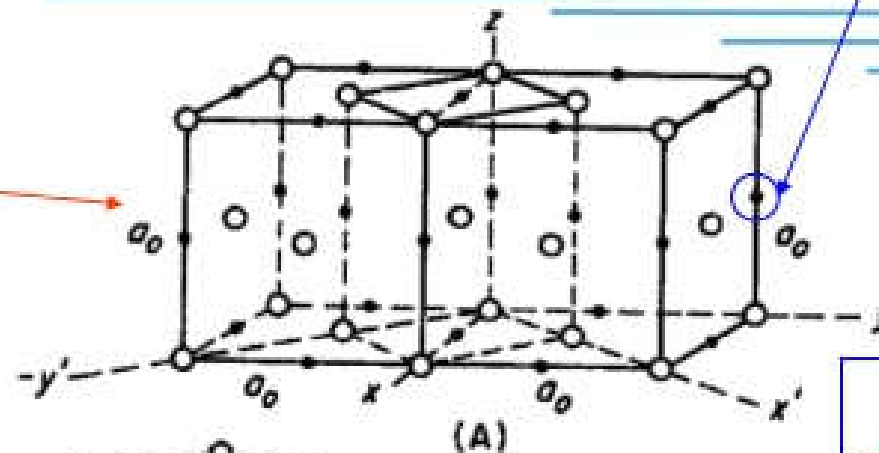
Martensite



Possible positions of Carbon atoms

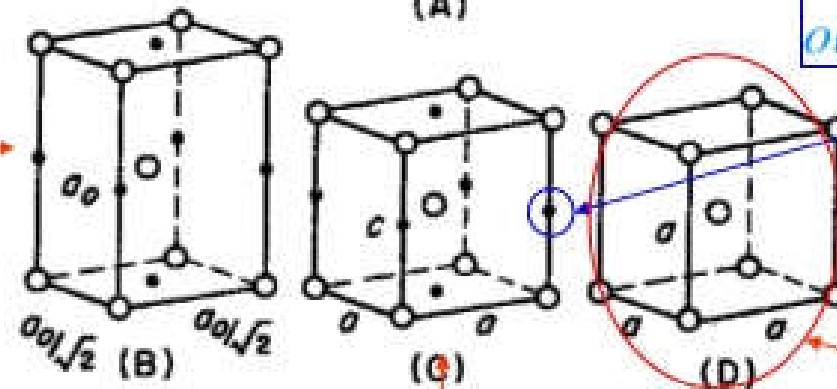
Only a fraction of the sites occupied

FCC Austenite



C along the c-axis obstructs the contraction

FCC Austenite
Alternate choice of Cell



20% contraction of *c*-axis
12% expansion of *a*-axis

Tetragonal Martensite

In Pure Fe after the Martensitic transformation

$$c = a$$