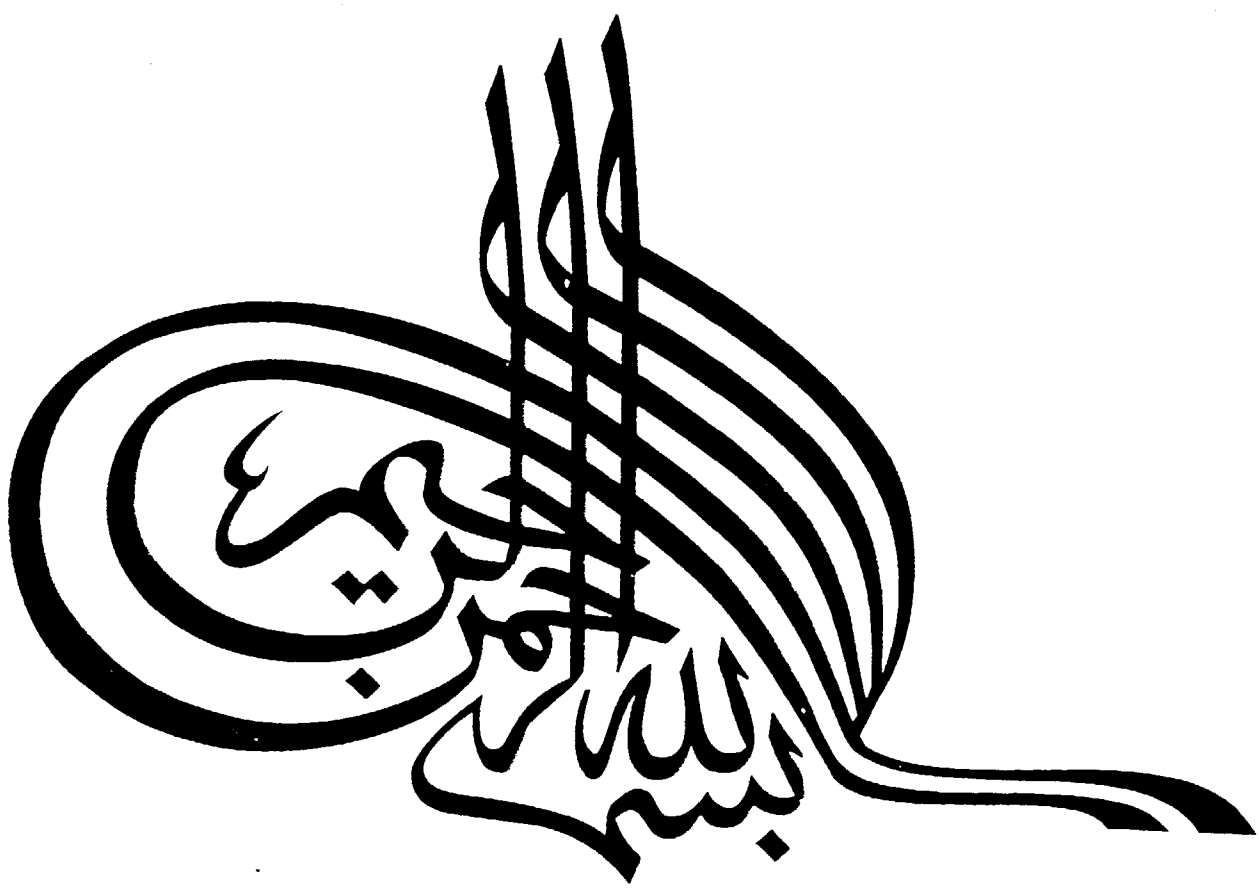



٤٨٥٩٨

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

# بررسی رفتار سایشی خراشان سه جسمی فولاد یوتکتوئیدی کم آلیاژ

پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد

۱۳۸۲ /۷/ ۲۰

**جواد احمدی شیخ احمد**

اساتید راهنما

**دکتر سید محمود منیرواقفی ، دکتر مهدی صالحی**

۱۳۸۱

۴۸۵۹۸

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی‌ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای جواد احمدی

تحت عنوان:

# بررسی رفتار سایشی خراشان سه جسمی فولاد یوتکتوئیدی کم آلیاژ

در تاریخ ۸۲/۱/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب قرار گرفت.

۱ ـ اساتید راهنمای پایان‌نامه : دکتر سیدمحمود منیرواقفی، دکتر مهدی صالحی

۲ ـ استاد مشاور پایان‌نامه: دکتر بهزاد نیرومند

۳ ـ استاد داور ۱: دکتر امین اوحدی

۴ ـ استاد داور ۲: دکتر مرتضی شمعانیان

۵ ـ مسئول تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر احمد ساعتچی

**تشکر و قدردانی**

بدینوسیله از زحمات اساتید محترم پروژه، آقایان دکتر سید محمود منیر واقفی،دکتر مهدی صالحی،دکتر بهزاد نیرومند، به دلیل راهنمایی های ارزنده در خلال انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی میگردد.همچنین از اساتید محترم ممتحن، آقایان دکتر امین اوحدی و دکتر مرتضی شمعانیان که زحمت مطالعه پایان نامه را بر عهده داشتند،تشکر می شود.از کادر آموزشی و آزمایشگاهی دانشکده مواد به خصوص مسئولین آزمایشگاههای متالوگرافی،سایش،XRD،SEM،آقایان عربیان،مهندس صائبی،مهندس صفریان،سرکار خانم صرامی، به خاطر همکاریهای بیدریغشان تشکر می گردد.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به خانواده ام

بخصوص مادرم

# فهرست مطالب

عنوان | صفحه


فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ..... ۱

**فصل اول : مقدمه** ..... ۲

**فصل دوم : مطالعات مروری**
۲-۱ خصوصیات ساختارهای پرلیت، بینیت و مارتنزیت ..... ۴
۲-۱-۱ پرلیت و خصوصیات استحاله‌ای، ساختاری و مکانیکی ..... ۴
۲-۱-۲ بینیت و خصوصیات استحاله‌ای، ساختاری و مکانیکی ..... ۹
۲-۱-۳ مارتنزیت و خصوصیات استحاله‌ای، ساختاری و مکانیکی ..... ۹
۲-۲ سایش ..... ۱۰
۲-۲-۱ سایش خراشان ..... ۱۱
۲-۲-۲ مدل ساده سایش خراشان ..... ۱۲
۲-۲-۳ بررسی مدل ساده سایش خراشان ..... ۱۳
۲-۲-۴ مکانیزمهای سایش خراشان ..... ۱۵
۲-۲-۵ مکانیزمهای جدایش مواد در سایش خراشان ..... ۲۱
۲-۲-۶ تأثیر خصوصیات ذرات ساینده بر سایش خراشان ..... ۲۱
۲-۲-۷ حرکت ذرات ساینده در سایش خراشان سه جسمی ..... ۲۴
۲-۲-۸ برخی فاکتورهای متالورژیکی سایش خراشان ..... ۲۶
۲-۲-۹ انواع روشهای متداول مطالعه سایش خراشان ..... ۳۰
۲-۲-۱۰ سایش خستگی سطحی ..... ۳۰

**فصل سوم : روش انجام تحقیق**
۳-۱ مدلسازی، ذوب و ریخته‌گری ..... ۳۳
۳-۲ عملیات حرارتی همگن کردن ..... ۳۴
۳-۳ آماده‌سازی نمونه‌های بلوکی شکل به منظور انجام تستهای سایش ..... ۳۴
۳-۴ اجرای فرایند عملیات حرارتی و سختی‌سنجی ..... ۳۵
۳-۵ متالوگرافی و بررسی ریز ساختار ..... ۳۷
۳-۶ انجام تستهای سایش سه جسمی و اندازه‌گیری کاهش وزن ..... ۳۷
۳-۷ توپوگرافی سطوح و ذرات سایش ..... ۳۸
۳-۸ بررسی نواحی زیر سطح سایش ..... ۳۸

**فصل چهارم : یافته‌های تحقیق**


۴-۱ ویژگی نمونه ریخته گی ..... ۴۰
۴-۲ آزمایش سختی سنجی ..... ۴۰
۴-۳ متالوگرافی ..... ۴۱
۴-۴ آزمایشهای سایش ..... ۴۳
۴-۴-۱ منحنی‌های مشخصه سایش ..... ۴۴
۴-۴-۲ بررسی سطوح سایش یافته ..... ۴۵
۴-۴-۳ مشاهده ذرات سایشی ..... ۵۰
۴-۴-۴ مشاهده نواحی زیر سطح سایش ..... ۵۴
۴-۴-۵ تغییرات سختی و کرنشهای القا شده نواحی زیر سطح سایش یافته ..... ۵۸


**فصل پنجم : بحث و بررسی یافته‌های تحقیق**


۵-۱ عملیات حرارتی ..... ۶۱
۵-۲ بررسی رفتار سایشی ساختارهای حاصل از عملیات حرارتی ..... ۶۲
۵-۲-۱ ساختار ماتنزیت تمپر شده ..... ۶۲
۵-۲-۲ ساختار بینیت ..... ۶۶
۵-۲-۳ ساختار پرلیت درشت ..... ۶۹
۵-۲-۴ ساختار بینیت و پرلیت ..... ۷۲
۵-۲-۵ ساختار پرلیت ریز ..... ۷۴

نتیجه گیری و جمع بندی ..... ۷۸
پیشنهادها ..... ۷۹
مراجع ..... ۸۰

## چکیده

در پژوهش حاضر رفتار سایشی فولاد یوتکتوئیدی کم آلیاژ تحت شرایط سایش خراشان سه جسمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های فولادی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت آستنیته شده، سپس با سرعتهای متفاوت تا دمای محیط سرد شدند. بررسی ساختارهای حاصل از عملیات حرارتی با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که مارتنزیت تمپر شده، بینیت و پرلیت، پرلیت ریز و پرلیت درشت تحت سرعت‌های متفاوت در زمینه بدست آمده‌اند.

رفتار سایش اینگونه ساختارها تحت شرایط سایش سه جسمی و با استفاده از ماده ساینده ماسه سیلیسی مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور بررسی سطوح سایش و ذرات سایشی از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. بررسی نواحی زیر سطح سایش با استفاده از ایجاد مقطع عرضی عمود بر جهت حرکت ذرات انجام گردید و تغییرات سختی و کرنشهای القا شده اندازه‌گیری شد.

یافته‌های آزمایش و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد رفتار سایش کاملاً بستگی به خصوصیات ساختاری دارد و ساختارهای با سختی بالا لزوماً مقاومت به سایش بالایی ندارند. در واقع رفتار سایشی بیشتر تحت تأثیر افزایش سختی سطح ناشی از تغییر فرم و ایجاد پدیده کار سختی روی سطح می‌باشد و عاملی که کنترل کننده سرعت سایش می‌باشد پدیده شکست در ساختار می‌باشد. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که با کاهش سختی مکانیزم سایش غالب از برش به خیش تغییر می‌یابد.

# فصل اول
## مقدمه

مطالعات گسترده در ارتباط با سایش خراشان نشان می‌دهد که مقاومت سایشی فولادها وابسته به ترکیب شیمیایی و ریز ساختار است و ریز ساختار مهمترین فاکتور متغییر در فولادهای با درصد کربن متفاوت می‌باشد.

در فولادهای با درصد کربن پایین‌تر از کربن یوتکتوئید، ساختارهای پرلیت ـ فریت و بینیت مقاومت سایشی خراشان کمتری از خود نشان می‌دهند و علت آن حضور فریت در ساختار می‌باشد، همچنین حضور مقادیر اندک پرلیت به عنوان یک فاز مقاوم در مقابل خراش عامل دیگری بر کاهش مقاومت به سایش در فولادهای هیپویوتکتوئیدی می‌باشد. با افزایش میزان کربن درصد فاز پرلیت افزایش یافته و مقاومت در مقابل خراش بهبود می‌یابد. با افزایش درصد کربن بیشتر از کربن یوتکتوئید روند افزایش تا حدودی کند می‌شود و علت آن رسوب سمنتیت به صورت شبکه پیوسته در امتداد مرز دانه‌ها می‌باشد. حضور سمنتیت در مرز دانه‌ها باعث می‌شود که در حین سایش، ترکهای ایجاد شده در امتداد مرز دانه‌ها بهم پیوسته و حجم گسترده‌ای از مواد در اثر شکست از سطح جدا می‌شود. در پژوهش حاضر به بررسی این مطلب می‌پردازیم که در ساختار یوتکتوئیدی که میزان فاز فریت و یا سمنتیت به صورت یک فاز مجزا در کنار پرلیت در حدود صفر درصد است مقاومت سایشی بیشتر متأثر از چه پارامترهایی می‌باشد.

مقاومت سایشی فولادهای مارتنزیتی و مارتنزیت تمپر شده نیز به میزان کربن بستگی دارد و در یک سختی ثابت با افزایش میزان کربن مقاومت سایشی افزایش می‌یابد. برای یک ترکیب شیمیایی ثابت مقاومت سایش خراشان به عملیات حرارتی بستگی دارد. برای فولادهای کوئنچ شده و کوئنچ تمپر شده مقاومت سایشی

متناسب با سختی است. تحقیقات بر روی رفتار سایشی فولادهای کوئنچ و تمپر شده نشان می‌دهد که عملیات حرارتی تأثیر بسیار زیادی بر رفتار سایشی این نوع فولادها دارد. در فولادهایی که در دماهای پایین تمپر شده است مقاومت سایشی بیشتر از فولادهایی است که در دماهای بالا تمپر شده‌اند و علت آن مربوط به تبدیل رسوبات به رسوبات غیرکوهرنت سمنتیت می‌باشد.

علاوه بر نوع ساختار، خصوصیات مکانیکی نظیر تافنس و انعطاف‌پذیری و کار سختی‌پذیری مهمترین فاکتورهای مؤثر در رفتار سایشی فولادها می‌باشند. هنگامی که ذرات ساینده روی سطح حرکت می‌کنند باعث ایجاد شیار و سیلان پلاستیکی و تغییر فرم روی سطح می‌شوند. در این حالت خصوصیات ساختاری باید به گونه‌ای باشد که توانایی مقاومت در مقابل تخریبهای سطحی را داشته باشد.

همانطور که اشاره شد فولادهای هیپویوتکتوئید و هایپریوتکتوئید در شرایط کوئنچ شده و کوئنچ و تمپر شده دارای مقاومت سایشی بالاتری نسبت به ساختارهای نرماله و آنیل شده می‌باشند. اما در شرایطی که امکان کوئنچ کردن وجود نداشته باشد، بایستی مواد به گونه‌ای انتخاب شود که توانایی مقاومت در مقابل خراش را داشته باشد.

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایش خراشان فولاد یوتکتوئیدی با ساختارهای متفاوت می‌پردازیم . تاکنون مطالعات رفتار سایشی بر روی ساختارهای متفاوت عمدتاً براساس نوع مکانیزم غالب سایش انجام می‌شد و مطالعات محدودی در رابطه با خواص مکانیکی و ارتباط آن با رفتار سایشی فلزات ارائه شده است. در این تحقیق علاوه بر بررسی نوع مکانیزم غالب سایش ، فاکتورهای متالورژیکی که می‌تواند بر مکانیزمهای غالب بر رفتار سایشی تأثیر بگذارد، مورد مطالعه و بحث و بررسی قرار گرفته است.

# فصل دوم
# مطالعات مروری

بدلیل اینکه سایش مواد در مکانیزم سایش خراشان توسط تغییر فرم کنترل می‌شود، لذا آشنایی با خصوصیات مکانیکی، استحاله‌ای و ساختاری مربوط به فولادها، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

اولین مراحل تحقیقات در زمینه سایش خراشان نشان داد که در رفتار سایش خراشان سختی فلزات مهمترین پارامتر می‌باشد و سختی اولین انتخاب به منظور بهبود مقاومت به سایش بود. اما تحقیقات بعدی نشان داد که حین سایش خراشان سطح تحت تغییر فرم و کرنش سختی قرار می‌گیرد و سختی سطح پارامتر مهمتری در بررسی‌های رفتار سایش خراشان می‌باشد. امروزه تحقیقات نشان می‌دهد که سایش فلزات وابسته به شرایط تریبوسیستم است و در یک تریبوسیستم خصوصیات ساختاری و مکانیکی از جمله تافنس و سختی و کار سختی پذیری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند. لذا در این بخش ابتدا به بررسی خصوصیات مکانیکی ساختارهای حاصل از فرآیندهای عملیات حرارتی می‌پردازیم و سپس به بررسی رفتار سایشی خراشان خواهیم پرداخت.

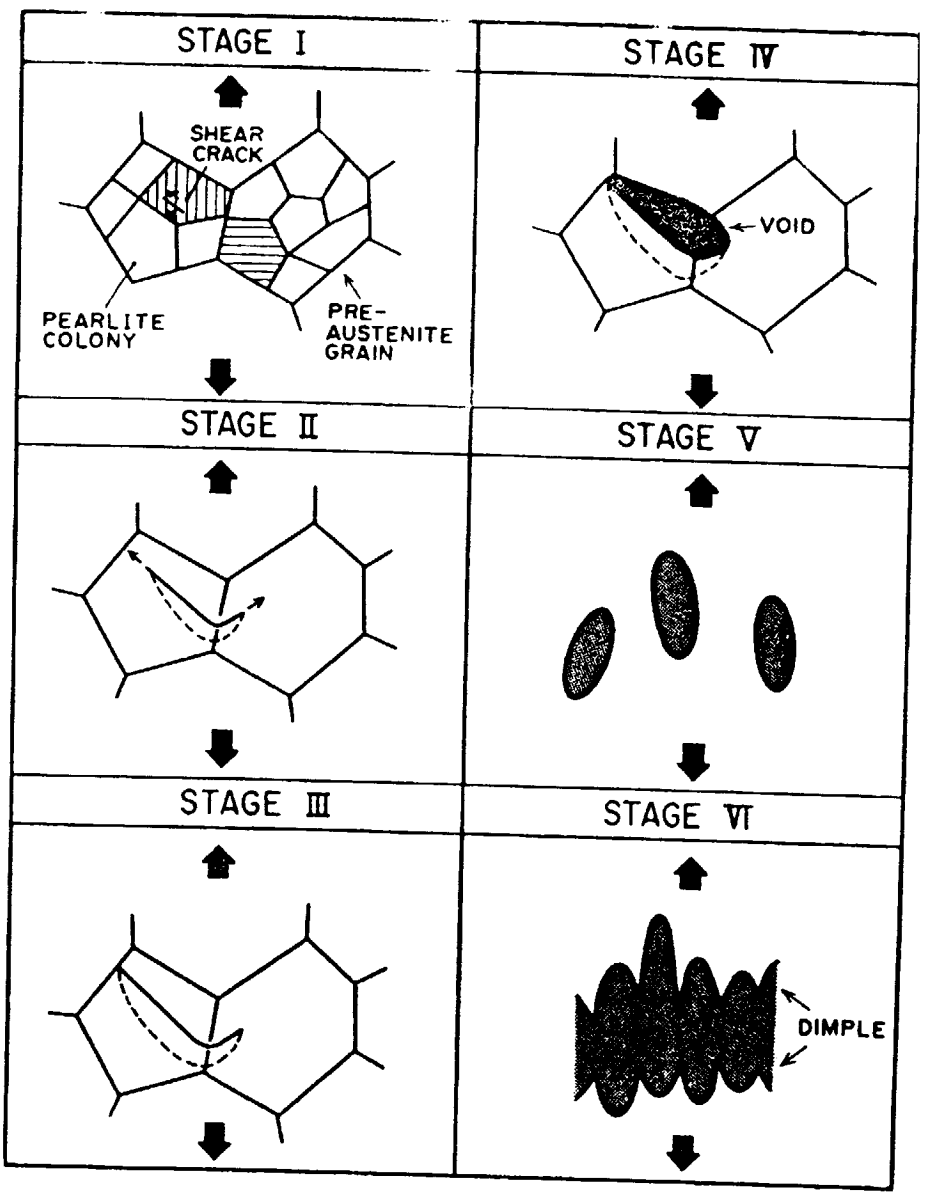
## ۲-۱ خصوصیات ساختارهای پرلیت، بینیت و مارتنزیت

### ۲-۱-۱- پرلیت و خصوصیات استحاله‌ای، ساختاری و مکانیکی

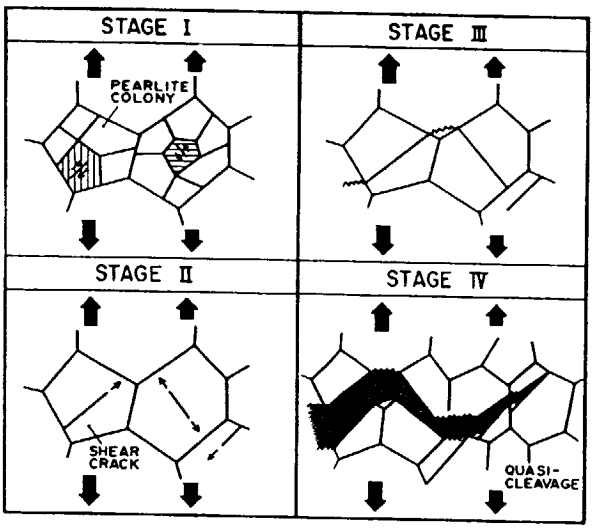
محصول دگرگونی یوتکتوئیدی در فولادها، ساختمان میکروسکوپی موسوم به پرلیت می‌باشد. تشکیل پرلیت از آستنیت بوسیله جوانه زنی و رشد انجام می‌گیرد. سرعت تشکیل پرلیت تحت تأثیر چندین فاکتور تغییر می‌کنند، شاید مهمترین آنها عبارت باشد از آرایش مجدد یا جابه‌جایی مقدار زیادی کربن جهت انجام دگرگونی آستنیت به فریت کم کربن و سمنتیت پرکربن، در واقع استحاله‌ای است که توسط نفوذ کنترل می‌شود.

محققین تحقیقات خود را برروی استحکام و تافنس فولادهای کاملاً پرلیتی انجام دادند. آنها نشان دادند که تنش تسلیم توسط فواصل بین لایه‌های پرلیت در رفتار تغییر فرم، توسط عملکرد لغزش نابجایی‌ها در فصل مشترک فریت سمنتیت کنترل می‌شود و استحکام فولادهای کاملاً پرلیتی به فواصل بین لایه‌های پرلیت بستگی دارد و با کاهش فواصل لایه‌های پرلیت استحکام افزایش می‌یابد [ ۱ ].

تحقیقات نشان داد که کاهش فواصل بین لایه‌های پرلیت بیشترین اثر را بر روی استحکام و انعطاف‌پذیری دارد، همچنین صفحات کاربید و در وضعیت مشابه مرز دانه‌ها در پرلیت بیشترین تأثیر را در مقابل حرکت و عملکرد نابجایی‌ها در شکست ترد و نرم دارند ( شکل ۲-۱ و ۲-۲ ) [ ۲ ]. دیگر محققین بیان کردند که نرخ کار سختی با کاهش فواصل بین لایه‌های پرلیت افزایش می‌یابد [ ۳ ].

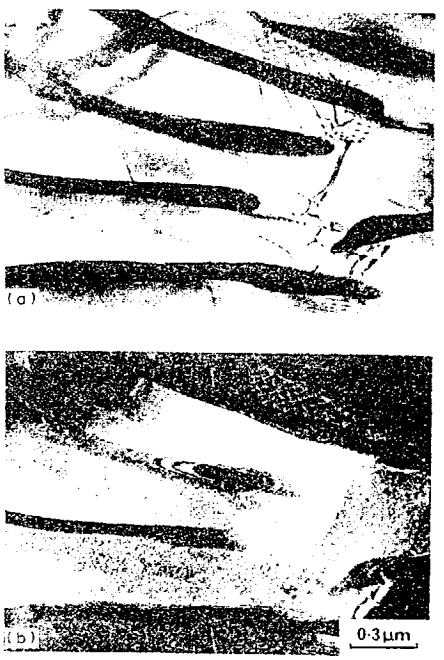



شکل ۲-۱ مراحل فرایند شکست نرم [ ۲ ]



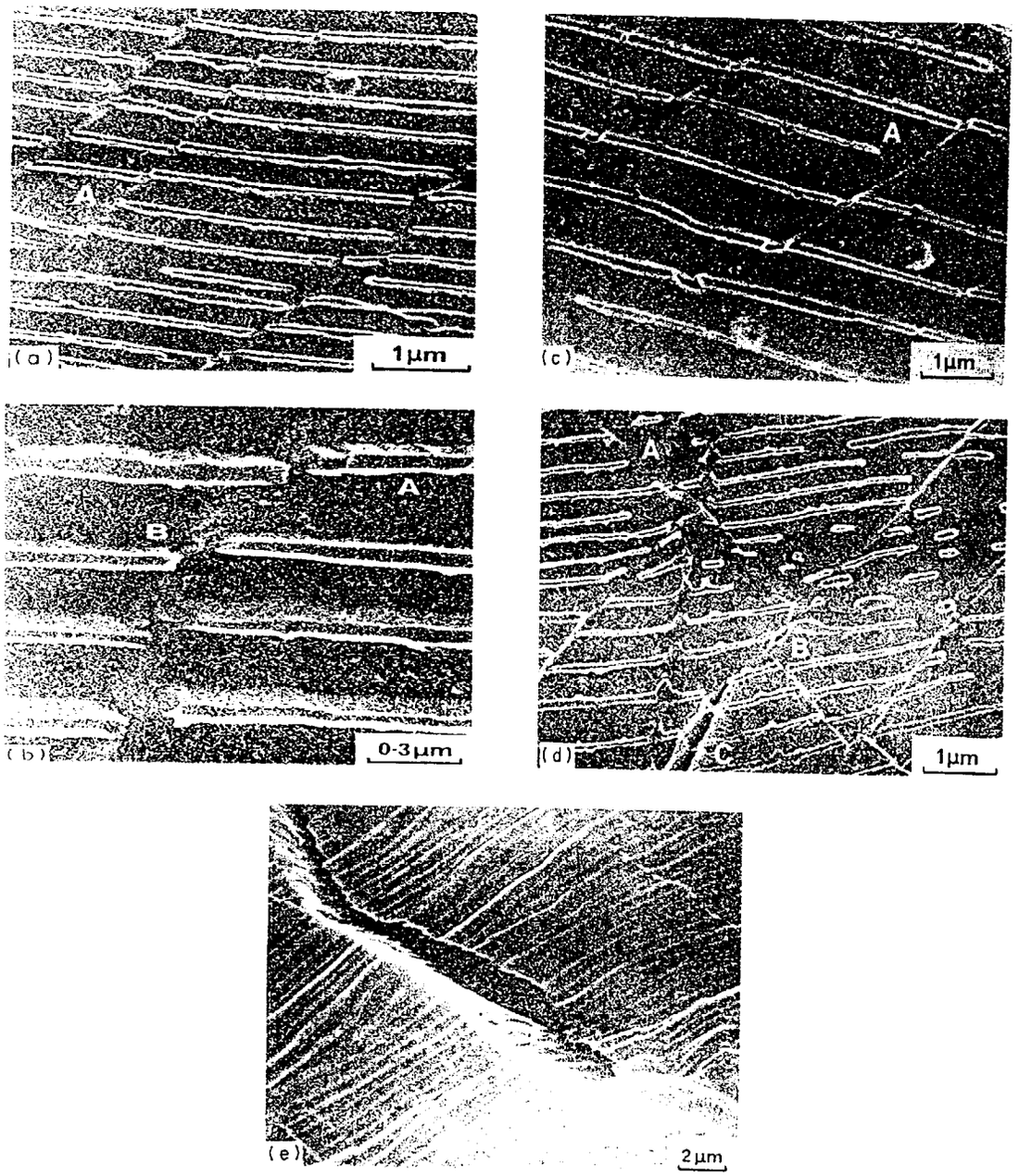

شکل ۲-۲ مراحل فرایند شکست‌ترد [ ۲ ]

تحقیقات بر روی تأثیر تغییر فرم به سیلان و شکست فولادهای پرلیتی نشان داد که تسلیم و کار سختی پرلیت به میزان قابل ملاحظه‌ای توسط فریت کنترل می‌شود، در حالی که صفحات سمنتیت در تنشهای کم اساساً نقش محدود کننده لغزش در فریت را دارند. هنگامی که پرلیت تحت تغییر فرم قرار می‌گیرد ( حتی در تنشهای اندک ) منابع نابجایی در فصل مشترک فریت و سمنتیت فعال می‌شوند ( شکل ۲-۳). این منابع نابجایی احتمالاً بخاطر عدم هماهنگی و تنشهای الاستیک ناشی از تفاوت ساختاری در فصل مشترک فریت و سمنتیت وجود دارند و در اثر اعمال کرنش سریعاً فعال می‌شود [ ۴ ].




شکل ۲-۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پرلیت با مقادیر تغییر فرم اندک [ ۵ ]

با افزایش کرنش تجمع نابجایی در فاز فریت و در پشت لایه‌های سمنتیت افزایش یافته و باندهای برشی فعال می‌شوند و در نهایت منجر به شکست لایه‌های سمنتیت می‌شود ( شکل ۲-۴).




شکل ۲-۴ تغییر فرم و شکست لایه‌های سمنتیت [ ۵ ]

محققین دیگری نشان دادند که افزایش تغییر فرم در فولادهای کاملاً پرلیتی منجر به فعال شدن منابع نابجایی و تشکیل نابجایی‌ها در فصل مشترک فریت ـ سمنتیت می گردد و در اثر تجمع نابجایی‌ها، لایه‌های پرلیت در امتداد جهت تغییر فرم، تغییر جهت می‌دهند. آنها مدل ساده‌ای را به منظور نشان دادن تغییر فرم در پرلیت و