بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
گروه مواد و متالورژی

پژوهشکده مواد و انرژی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد و متالورژی گرایش شناسایی و انتخاب مواد

تولید فولادهای نانوساختار بینیتی و بررسی تاثیر اندازه‌ی ذرات ساینده بر نرخ سایش خراشان این فولادها

استاد راهنما :

دکتر شهریار شرفی

مؤلف:

محمد اسکندری

خرداد ماه ۸۹

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

گروه مواد و متالورژی

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : محمد اسکندری

استاد راهنما : دکتر شهریار شرفی

داور ۱ : دکتر محمد رضا ایزدپناه

داور۲ : دکتر مرتضی زندرحیمی

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر فرشته بختیاری

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر غلامرضا پورابراهیم

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان و مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی است.

تقدیم به:

خانواده عزیزم که همواره در تمامی عرصه‌های زندگی پشتیبان و حامی من بوده‌اند

پدر دلسوز و مادر مهربانم

که هرگز نخواهم توانست محبت‌های بی‌دریغ ایشان را جبران نمایم

هرآنکه کلامی هرچند اندک به من آموخت

و . . . . .

تشکر و قدردانی:

به عمل کار برآید به سخن‌رانی نیست

حال که با لطف و عنایت ایزد منان موفق به اتمام پایان نامه‌ای شدم که در برخی از برهه‌ها پایان ناپذیر می‌نمود، بر خود ملزم می‌دانم که از زحمات و راهنمایی‌های استاد عزیزم جناب آقای **دکتر شهریار شرفی** که همواره راهنما و مشوق من بود کمال تشکر را داشته باشم.

به رسم ادب از صمیم قلب سپاس‌گذار تک تک اعضای خانواده‌ام هستم، به خصوص **پدر و مادرم** که همواره مشوق و حامی من بوده و دعای خیرشان همراه و پشتیبان من است.

مولای متقیان فرمود "من علمنی حرفاً فقد صیرنی عبداً"، لذا اینجانب خود را مدیون تمامی **اساتید محترم بخش مواد و متالورژی** دانشگاه شهید باهنر کرمان می‌دانم که افتخار شاگردیشان را داشته‌ام. خصوصاً از جناب **دکتر مرتضی زند رحیمی** و جناب **دکتر محمدرضا ایزدپناه** که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده گرفته اند صمیمانه تشکر می نمایم.

از مسئولین محترم آزمایشگاه‌های بخش مهندسی مواد دانشگاه شهید باهنر کرمان سرکار خانم **مهندس بقایی** و سرکار خانم **مهندس دادگری‌نژاد** کمال تشکر را دارم.

مسئولین محترم پژوهشکده‌ی مواد **مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی** در تمام مدت انجام این پایان نامه از هیچ کوششی جهت پیشبرد کار بنده فروگذار نکردند لذا از تمامی این عزیران تشکر و قدردانی می‌نمایم، به ویژه جناب آقای **دکتر مصطفی علیزاده** که پیوسته مورد لطف و محبت ایشان بودم.

در نهایت سپاس‌گذار دوستان بی‌نظیری هستم که افتخار مصاحبت با ایشان را داشتم و برادرانه در تمامی سختی‌ها و مشکلات همراه و پشتیبان من بودند؛ آقایان *مجید آریافر*، *سید محسن موسوی*، *محمد رضا کمالی*، *سعید کرمی*، *مهدی دهقان*، *غفار محمدی*، *امیر فرزانه*، *آرش ارده خانی*، *جمال صفری*، *علی لطفی*، *سعید کمیزی*، *بهنام برادرانی*، *محمد حسین شفیعی*، *بهاءالدین نیک‌روز* و دیگر برادران عزیزی که در طول دوره‌ی کارشناسی ارشد همواره مورد لطف و محبت ایشان بودم.

محمد اسکندری

خرداد ۸۹

چکیده

فولادهای نانوساختار بینیتی با خواص منحصر به فردی که همانند استحکام کششی بیش از ۲۰۰۰MPa، استحکام فشاری بیش از ۳۰۰۰MPa، داکتیلیته در دامنه‌ی ۳۰٪–۵٪، و مقادیر K_{IC} تا حدود MPa $45m^{1/2}$ اخیراً توسعه یافته‌اند. بر خلاف سایر مواد نانوساختار، تولید این فولادها نیازمند عملیات فرآوری پیچیده و پرهزینه‌ای نیست و به سهولت با استفاده از یک چرخه‌ی عملیات حرارتی ساده قابل تولید هستند. برای تولید این فولادها پس از نورد شمش ریختگی، عملیات همگن‌سازی به مدت دو روز تحت اتمسفر خلاء انجام شد. آستنیته کردن تحت اتمسفر محافظ آرگون انجام شد و سپس استحاله‌ی نهایی به صورت همدما در حمام نمک ۳۰۰، ۲۵۰ و ۲۲۰°C صورت پذیرفت. ساختار حاصل به وسیله‌ی پراش پرتو X، میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی و آزمون سختی مشخصه‌یابی شد.

سایش خراشان به عنوان اصلی‌ترین دلیل انهدام مواد مهندسی شناخته شده است و بیش از ۵۰٪ مسائل سایشی بر اساس این نوع سایش اتفاق می‌افتند. در صنعت برای مقابله با سایش خراشان آلیاژهای آهنی بیشترین استفاده را دارند. در این تحقیق تاثیر اندازه‌ی ذرات ساینده بر نرخ سایش فولادهای نانوساختار بینیتی بررسی شده است. برای انجام آزمون‌های سایش از آزمون سایش Pin-on-Disk طبق استاندارد ASTM G132 استفاده شد. نتایج نشان داد که روند سایشی این فولادها با فولادهای متداول تفاوت دارد. در فولادهای متداول با افزایش اندازه دانه‌های ساینده شاهد سه مرحله‌ی مجزای تغییر نرخ سایش هستیم، ولی در فولادهای نانوبینیتی با افزایش اندازه‌ی ذرات ساینده در ابتدا نرخ سایش به آهستگی افزایش می‌یابد که این رفتار مشخصه‌ی فولادهای مارتنزیتی با چقرمگی تقریباً صفر است؛ پس از رسیدن به یک اندازه دانه‌ی ساینده‌ی مشخص نرخ سایش افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. نتایج نشان داد که دو پارامتر را می‌توان علت این رفتار قلمداد نمود: تغییر مکانیزم سایش و کاهش نرخ کارسختی سطح نمونه. از بین این دو مورد نیز تغییر نرخ کارسختی را می‌توان علت اصلی این رفتار دانست.

کلمات کلیدی: فولاد، نانوساختار، بینیت، سایش خراشان، اثر اندازه دانه، میکروپلافینگ، کارسختی.

فهرست مطالب

فصل اول) مقدمه..... ۱

فصل دوم) مروری بر منابع..... ۵

۲-۱) مقایسه‌ای بین مواد استحکام بالا و بررسی محدودیت‌های هر کدام..... ٦

۲-۱-۱) ویسکرها..... ٦

۲-۱-۲) نانوتیوب‌های کربنی..... ۷

۲-۱-۳) سایفر..... ۹

۲-۱-۴) فولاد پلی کریستالی ریز بدون تغییر فرم..... ۱۰

۲-۱-۵) فولادهای مارتنزیتی..... ۱۲

۲-۱-۶) فولادهای نانوبینیتی..... ۱۲

۲-۲) بینیت..... ۱۳

۲-۲-۱) تاریخچه‌ی بینیت..... ۱۳

۲-۲-۱-۱) اکتشاف بینیت..... ۱۵

۲-۲-۲) سینیتیک استحاله‌ی بینیتی..... ۲۰

۲-۲-۳) تاثیر Si، Al و P بر استحاله‌ی بینیتی..... ۲۲

۲-۲-۴) استحاله‌ی همدما به بینیت..... ۲٤

۲-۲-۵) تاثیر اندازه دانه‌ی آستنیت بر پایداری آن..... ۲۵

۲-۲-۶) فولادهای کاملاً بینیتی..... ۲۷

۲-۲-۷) نانوبینیت..... ۲۹

۲-۳) سایش..... ۳۱

۲-۳-۱) مکانیزم‌های عملیاتی..... ۳۲

۲-۳-۲) مکانیزم‌های فیزیکی..... ۳۲

۲-۳-۳) سایش اکسیدانی..... ۳۳

۲-۳-۴) فرتینگ..... ۳۳

۲-۳-۵) خستگی ۳٤
۲-۳-۶) فرسایش..... ۳٤
۲-۳-۷) سایش چسبان..... ۳۵
۲-۳-۸) سایش خراشان..... ۳٦
۲-۳-۸-۱) مکانیزم‌های سایش خراشان..... ۳۹
۲-۳-۹) تاثیر پارامترهای مختلف بر نرخ سایش خراشان..... ٤۱
۲-۳-۹-۱) مدول الاستیک و حد کرنش الاستیک..... ٤۱
۲-۳-۹-۲) سختی..... ٤۲
۲-۳-۹-۳) سختی سطحی..... ٤۳
۲-۳-۹-۴) سایش خراشان و ارتباط آن با ساختار متالورژیکی..... ٤۵
۲-۳-۹-۵) حرارت‌دهی اصطکاکی..... ٤٦
۲-۳-۹-۶) رطوبت..... ٤۷
۲-۳-۹-۷) پارامترهای فیزیکی..... ٤۷
۲-۳-۹-۸) نوع ساینده و سختی نسبی آن..... ٤۷
۲-۳-۹-۹) شکل دانه‌های ساینده..... ٤۸
۲-۳-۹-۱۰) اندازه‌ی دانه‌های ساینده..... ٤۸
فصل سوم) مواد و روش کار..... ٦۱
۳-۱) ماده‌ی اولیه..... ٦۲
۳-۲) عملیات حرارتی..... ٦۳
۳-۳) بررسی ریزساختار..... ٦٤
۳-۳-۱) سختی..... ٦٤
۳-۳-۲) ریزساختار نوری..... ٦۵
۳-۳-۳) بررسی ساختار نانو..... ٦٦
۳-۳-۳-۱) اندازه‌ی دانه و میکروکرنش..... ٦٦
۳-۳-۳-۲) درصد کربن فازها..... ٦۹
۳-۴) سایش خراشان..... ۷۰

فصل چهارم) نتایج ۷٤
۴-۱) نانوبینیت ۷۵
۴-۲) سایش ۸۰
فصل پنجم) بحث ۹۸
۵-۱) نانوبینیت ۹۹
۵-۲) سایش ۱۰۲
۵-۲-۱) پلافینگ ۱۱۱
۵-۲-۲) نرخ کرنش ۱۱۳
۵-۲-۳) تغییر شکل زیرلایه‌های سطحی ۱۱۳
فصل ششم) نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۹
۶-۱) نتیجه‌گیری ۱۲۰
۶-۲) پیشنهادات ۱۲۲
مراجع ۱۲۳

فهرست شکل ها و جداول

شکل ۲-۱. (الف) استحکام ویسکرهای آهن، (ب) الاستیسیته‌ی غیرخطی در تنش‌های بالا..... ۷

شکل ۲-۲. (الف) یک ورقه‌ی گرافن، (ب) شماتیک نحوه‌ی تشکیل شدن نانوتیوب‌ها از گرافن..... ۸

جدول ۲-۱. استحکام اندازه‌گیری شده‌ی نانوتیوب‌های کربنی به عنوان تابعی از طول..... ۹

جدول ۲-۲. انرژی ذخیره شده و سرعت انفجار یا صوت..... ۹

شکل ۲-۳. (الف) تصویر میکروسکوپی یونی میدانی که ساختار سلولی بسیار ریز نابجایی سایفر را نشان میدهد، (ب) مقایسه حساسیت به اندازه‌ی سایفر و ویسکرهای آهن..... ۱۰

شکل ۲-۴. منحنی لگاریتم اندازه دانه‌ی فریت در برابر تغییر انرژی آزاد..... ۱۱

شکل ۲-۵. (الف) تصویر الکترونی عبوری، (ب) تصویر میکروسکوپ نوری ساختار نانوبینیت... ۱۳

شکل ۲-۶. ریزساختارهای یک فولاد یوتکتوئید (الف) تشکیل شده در ۷۲۰°C، (ب) بینیت به دست آمده به وسیله‌ی استحاله‌ی همدما در در ۲۹۰°C، (ج) بینیت به دست آمده به وسیله‌ی استحاله‌ی همدما در در ۱۸۰°C، (د) مارتنزیت..... ۱۶

شکل ۲-۷. تفاوت اصلی بینیت بالایی و پایینی (نحوه‌ی جای‌گیری و رسوب کربن)..... ۱۷

شکل ۲-۸. ویژگی‌های ریزساختاری در توصیف سینتیکی یک ریزساختار بینیتی. در این شکل طویل شدن زیرواحدها (ورقه‌های منفرد) و بافته‌ها (خوشه‌هایی از ورقه‌ها) را شاهد هستیم. طویل شدن بافته‌ها به وسیله‌ی جوانه‌زنی مکرر زیرواحدها، رسوب کاربیدها و تغییر کسر حجمی بینیت به عنوان تابعی از زمان و دما صورت می‌پذیرد..... ۲۱

جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فولادهای بررسی شده توسط جاکوبز..... ۲۳

شکل ۲-۹. (الف) کسر حجمی آستنیت باقیمانده به عنوان تابعی از زمان نگهداری در دمای ۳۷۵°C، (ب) میزان کربن آستنیت باقیمانده به عنوان تابعی از زمان نگهداری در دمای ۳۷۵°C... ۲۳

شکل ۲-۱۰. تغییر کسر آستنیت باقیمانده با زمان نگهداری در ۴۰۰°C..... ۲۴

شکل ۲-۱۱. کسر حجمی بینیت به عنوان تابعی از دمای استحاله (الف) Fe-0.29C-1.4Mn-1.5Si، (ب) Fe-0.16C-1.3Mn-0.38Si (wt%)..... ۲۵
شکل ۲-۱۲. پارامتر پایداری آستنیت به عنوان تابعی از غلظت کربن آستنیت بر حسب درصد وزنی..... ۲۶
شکل ۲-۱۳. اثر اصلاح اندازه دانه‌ی آستنیت بر دمای انتقال ضربه‌ای..... ۲۸
شکل ۲-۱۴. تاثیر کسر حجمی آستنیت و دمای استحاله بر (الف) استحکام تسلیم، (ب) استحکام کششی..... ۲۹
شکل ۲-۱۵. کسر حجمی آستنیت باقیمانده در برابر ازدیاد طول تحت کشش..... ۳۰
شکل ۲-۱۶. منحنی‌های تنش-کرنش فولادی با کسر حجمی (الف) کم، (ب) بهینه و (ج) بالا از آستنیت..... ۳۱
شکل ۲-۱۷. تاثیر زاویه‌ی برخورد ذرات سیلیکا بر میزان فرسایش چند ماده‌ی مختلف..... ۳۵
شکل ۲-۱۸. تشکیل یک براده‌ی سایش به وسیله‌ی سایش چسبان..... ۳۶
شکل ۲-۱۹. مقادیر ضریب سایش k به عنوان تابعی از حالت و مکانیزم سایش بدون وجود روانساز..... ۳۸
شکل ۲-۲۰. مدلی برای سایش خراشان..... ۴۰
شکل ۲-۲۱. وابستگی مقاومت به سایش خراشان برخی از فلزات خالص به مدول الاستیسیته‌ی آنها..... ۴۲
شکل ۲-۲۲. وابستگی مقاومت به سایش خراشان برخی از فلزات خالص و فولادها به سختی اولیه..... ۴۳
شکل ۲-۲۳. ارتباط بین مقاومت به سایش خراشان و سختی سطح پس از سایش..... ۴۴
شکل ۲-۲۴. بر هم کنش بین فازهای تقویت کننده و ذرات ساینده‌ی نرم و سخت (الف)، (ب) و (ج) بیرون کشیدن، برش دادن یا ترک خوردن ذرات تقویت کننده در برخورد با ذرات ساینده‌ی سخت، در تقابل با ذرات ساینده‌ی نرم (د) بیرون کشیده شدن ذرات ریز تقویت کننده، (ه) کنده شدن ذرات تقویت کننده‌ی بزرگی که اتصال ضعیفی به زمینه دارند، (و) جدا شدن ذرات ساینده از پشت‌بند خود در برخورد با ذرات تقویت کننده‌ای که اتصال قوی با زمینه

دارند..... ٤٦
شکل ۲-۲۵. منحنی شماتیک وابستگی نرخ سایش به اندازه‌ی ذرات ساینده..... ٤٩
شکل ۲-۲٦. تغییر انرژی ویژه با اندازه‌ی دانه‌ی ساینده..... ٥٠
شکل ۲-۲۷. تصویر شماتیک دستگاه آزمون سایش شتابدار جهت برآورد عمر هد مغناطیسی ویدئوی نواری..... ٥٢
شکل ۲-۲۸. مورفولوژی براده‌های سایش خراشان پین آلومینیومی تحت بار ۲۴N، بر روی کاغذ سنباده‌ی (الف) P180، (ب) P1200، و (ج) P4000. پیکان‌ها جهت سایش را نشان می‌دهد..... ٥٤
شکل ۲-۲۹. حالات تشکیل براده و برهم‌کنش با دانه‌ی ساینده. حالت برش خالص اولین شکل تشکیل براده است. اگر چسبندگی و چگالی براده‌ها بالا باشد حالت به‌هم‌پیوستگی اتفاق می‌افتد که مانع از تماس ساینده با سطح نمونه می‌شود..... ٥٤
شکل ۲-۳۰. انباشته شدن براده‌های تشکیل شده از یک پین آلومینیومی در تماس با کاغذ سنباده‌ی **P1200**. (الف) **۴N**، (ب) **۱۶N** و (ج) **۲۴N**. پیکان‌ها جهت سایش را نشان می‌دهد..... ٥٤
جدول ۳-۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ بر حسب درصد وزنی..... ٦٣
جدول ۳-۲. دما و زمان آستنیته کردن..... ٦٣
جدول ۳-۳. سیکل‌های عملیات حرارتی استحاله‌های همدما به بینیت..... ٦٤
جدول ۳-۴. ترکیب حمام نمک استفاده شده برای استحاله‌های همدما..... ٦٤
شکل ۳-۱. جابجایی و پهن شدن پیک به دلیل کرنش کریستال..... ٦٧
شکل ۳-۲. شکل پیک‌های گاوسی و لرنتزی..... ٦٨
شکل ۳-۳. نرخ سایش چندین فولاد مختلف به عنوان تابعی از سختی ماده‌ی ساینده در سایش خراشان دوجزیی..... ٧١
شکل ۳-۴. شماتیک دستگاه آزمون سایش..... ٧٣
جدول ۳-۵. اندازه‌ی دانه‌های ساینده‌ی موجود در سنباده‌های استفاده شده..... ٧٣
شکل ۴-۱. تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار استحاله یافته در ۳۰۰°C..... ٧٥

شکل ۴-۲. تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار استحاله یافته در ۲۵۰°C ۷۵
شکل ۴-۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختار استحاله یافته در ۳۰۰°C ۷۶
شکل ۴-۴. الگوی پراش نمونه‌ی استحاله یافته در ۳۰۰°C ۷۷
شکل ۴-۵. الگوی پراش نمونه‌ی استحاله یافته در ۲۲۰°C ۷۷
شکل ۴-۶. نمودار ویلیامسون-هال نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C ۷۸
شکل ۴-۷. تاثیر دمای استحاله‌ی همدما بر ضخامت ورقه‌های فریت بینیتی ۷۸
شکل ۴-۸. تاثیر دمای استحاله‌ی همدما بر درصد کربن به دام افتاده در ورقه‌های فریت بینیتی ۷۸
شکل ۴-۹. تاثیر دمای استحاله‌ی همدما بر سختی ۷۹
شکل ۴-۱۰. تاثیر دمای استحاله‌ی همدما بر چگالی نایجایی‌ها در فریت بینیتی ۷۹
شکل ۴-۱۱ تاثیر دمای استحاله‌ی همدما بر درصد کربن آستنیت باقیمانده ۷۹
شکل ۴-۱۲. منحنی‌های کاهش جرم نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C بر حسب اندازه‌ی دانه‌های ساینده ۸۱
شکل ۴-۱۳. منحنی‌های کاهش جرم نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C بر حسب اندازه‌ی دانه‌های ساینده ۸۱
شکل ۴-۱۴. منحنی‌های کاهش جرم نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C بر حسب اندازه‌ی دانه‌های ساینده ۸۲
شکل ۴-۱۵. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P1200 ..... ۸۳
شکل ۴-۱۶. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P600 ..... ۸۴
شکل ۴-۱۷. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P180 ..... ۸۴
شکل ۴-۱۸. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P120 ..... ۸۵

شکل ۴-۱۹. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P80 ..... ۸۵
شکل ۴-۲۰. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P1200 ..... ۸۶
شکل ۴-۲۱. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P180 ..... ۸۶
شکل ۴-۲۲. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P120 ..... ۸۷
شکل ۴-۲۳. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P80 ..... ۸۷
شکل ۴-۲۴. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P1200 ..... ۸۸
شکل ۴-۲۵. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P600 ..... ۸۸
شکل ۴-۲۶. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P120 ..... ۸۹
شکل ۴-۲۷. سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P80 ..... ۸۹
شکل ۴-۲۸. منحنی تغییرات سختی سطح نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C در برابر اندازه-ی ذرات ساینده ۹۰
شکل ۴-۲۹. منحنی تغییرات سختی سطح نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۵۰°C در برابر اندازه-ی ذرات ساینده ۹۱
شکل ۴-۳۰. منحنی تغییرات سختی سطح نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C در برابر اندازه-ی ذرات ساینده ۹۱
شکل ۴-۳۱. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P600 و پولیش به وسیله‌ی خمیر الماس ۶ میکرونی و در ادامه

اعمال آزمون سختی HV_1 ..... ۹۲
شکل ۴-۳۲. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط کاغذ سنباده‌ی P120 و پولیش به وسیله‌ی خمیر الماس ۶ میکرونی و در ادامه اعمال آزمون سختی HV_1 ..... ۹۲
شکل ۴-۳۳. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P80 ..... ۱۰۲
شکل ۴-۳۴. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P120 ..... ۹۳
شکل ۴-۳۵. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P180 ..... ۹٤
شکل ۴-۳۶. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P600 ..... ۹٤
شکل ۴-۳۷. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P1200 ..... ۹٤
شکل ۴-۳۸. تغییرات سختی سطح نمونه‌ی استحاله یافته در ۲۲۰°C پس از سایش توسط سنباده-های مختلف ۹۵
شکل ۴-۳۹. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P80 ..... ۹۵
شکل ۴-۴۰. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P120 ..... ۹۵
شکل ۴-۴۱. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P180 ..... ۹٦
شکل ۴-۴۲. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P600 ..... ۹٦
شکل ۴-۴۳. منحنی تغییرات سختی از سطح سایش نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده‌ی P1200 ..... ۹۶

شکل ۴-۴۴. تغییرات سختی سطح نمونه‌ی استحاله یافته در ۳۰۰°C پس از سایش توسط سنباده-های مختلف..... ۹۷
شکل ۴-۴۵. تصویر میکروسکوپ نوری از محل اثر فرورونده‌ی آزمون سختی $HV_{0.2}$، نمونه‌ی استحاله یافته در دمای ۳۰۰°C پس ار سایش توسط سنباده‌ی P1200..... ۹۷
شکل ۵-۱. پیک صفحه‌ی (۱۱۳) آستنیت در نمونه‌ی استحاله یافته در ۳۰۰°C..... ۱۰۰
شکل ۵-۲. پیک صفحه‌ی (۱۱۳) آستنیت در نمونه‌ی استحاله یافته در ۲۲۰°C..... ۱۰۰
شکل ۵-۳. نرخ سایش به عنوان تابعی از اندازه‌ی ذرات سیلیکون کارباید تحت سایش خراشان دوجزئی. دایره‌های نیمه‌پر: ۵ kgf، دایره‌های توپر ۱۰ kgf، و دایره‌های توخالی ۲۰ kgf..... ۱۰۴
شکل ۵-۴. نرخ سایش به عنوان تابعی از اندازه دانه‌ی ساینده (الف) آلومینیوم (ب) مس..... ۱۰۵
شکل ۵-۵. نرخ سایش به عنوان تابعی از اندازه‌ی ذرات ساینده در سایش خراشان دوجزئی و سه‌جزئی و فراسایش..... ۱۰۶
شکل ۵-۶. تصویر SEM نمونه‌های فولاد AISI 1020 ساییده شده توسط کاغذ سنباده‌ی سیلیکون کارباید (الف) P400 و (ب) P60..... ۱۰۷
شکل ۵-۷. نرخ فرسایش آلومینیوم به عنوان تابعی از زاویه‌ی برخورد ذرات سیلیکون کارباید با اندازه‌ی ۹ و ۱۲۷ میکرون و با سرعت برخورد ۱۵۲ متر بر ثانیه..... ۱۰۸
شکل ۵-۸. تصویر SEM سطح سنباده‌ی سیلیکون کارباید (الف) P600 و (ب) P60..... ۱۰۹
شکل ۵-۹. تصویر ذرات ساینده‌ی سیلیکون کارباید با اندازه‌ی مش (الف) ۱۰۰۰ و (ب) ۶۰..... ۱۰۹
شکل ۵-۱۰. نرخ فرسایش به عنوان تابعی از اندازه دانه‌ی سیلیکون کارباید با زاویه‌ی برخورد ۲۰ درجه و سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه..... ۱۱۰
شکل۵-۱۱. تصویر شماتیک چهار مکانیزم زدوده شدن ماده در فرآیند سایش خراشان..... ۱۱۱
شکل ۵-۱۲. نمودار شماتیک مصرف انرژی در سایش خراشان..... ۱۱۲

فهرست علائم اختصاری

آستنیت	γ
فریت	α
تغییر انرژی آزاد در استحاله‌ی آستنیت به فریت	$\Delta G_V^{\gamma\alpha}$
فریت غیر مغناطیسی	β
ساختار کریستالی مکعبی مرکزدار	BCC
ساختار کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار	FCC
ساختار کریستالی تتراگونال مرکزدار	BCT
دمای آغاز استحاله مارتنزیت	M_S
دمای آغاز استحاله بینیت	B_S
پلاستیسیته‌ی ناشی از استحاله	TRIP
کسر حجمی فیلم‌های آستنیت	$V_{\gamma f}$
کسر حجمی آستنیت کلوخه‌ای	$V_{\gamma B}$
کسر حجمی بینیت	$V_{\alpha b}$
نرخ سایش	ω
ضریب بدون بعد سایش	k
بار اعمالی در حین سایش	P
سختی	H
چقرمگی شکست	K_{IC}
زاویه‌ی لبه‌ی تماس ذره‌ی ساینده	ψ
میکروسکوپ الکترونی عبوری	TEM
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
پراش پرتو X	XRD
زاویه‌ی پراش	θ

کرنش	η
پهن شدن پیک بر اثر وجود کرنش	β_{strain}
پهن شدن پیک بر اثر ریز بودن اندازه‌ی دانه	$\beta_{crystallite}$
پهن شدن پیک به دلیل خطای دستگاه	$\beta_{Instrument}$
طول موج	λ
بردار برگرز	b
پارامتر شبکه‌ی آستنیت	a_γ
پارامتر شبکه‌ی فریت	a_α
ضخامت ورقه‌های فزیت بینیتی	t
چگالی نابجایی‌ها	ρ
تغییر استحکام کششی	$\Delta\sigma$
حد سیلان	σ_s
تنش اصطکاکی داخلی	σ_0
اندازه‌ی سلول‌های نابجایی‌ها	d_C
نرخ تغییر فرم پلاستیک	$\dot{\varepsilon}_d$
نرخ فرآیندهای آ رامش	$\dot{\varepsilon}_r$
سرعت حرکت نابجایی‌ها	V
سرعت به وجود آمدن یک نابجایی	$\dot{\rho}$
تنش اعمالی خارجی	σ_e
تنش اعمالی داخلی	σ_i

فصل اول

مقدمه

ماده‌ی نانوساختاری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است به جای آنکه دارای کسری از اجزاء نانومتری (همانند رسوب) باشد، دارای چگالی بالایی از فصل مشترک‌هایی با استحکام بالا است. بدین معنا که اندازه‌ی دانه‌های خود ماده‌ی زمینه دارای ابعاد نانومتری است. این ماده دارای خواص مکانیکی استثنایی است که در سرویس‌دهی نیز حفظ می‌شوند. تولید ماده‌ای با این خواص بسیار مشکل است زیرا در طراحی چنین ماده‌ای باید سه مسئله‌ی اساسی را مد نظر قرار داد:

- ماده‌ی مورد نظر باید در ابعاد بزرگ نیز قابل تولید باشد نه فقط به شکل سیم یا ورقه‌های نازک بتوان آن را تولید نمود.
- از لحاظ تجاری فولادهایی تولید شده است که فاصله‌ی بین فصل مشترک‌ها در آنها در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر است. برای اینکه ساختار جدید تولید شده یک نمونه‌ی جدید محسوب شود مقیاس ریزساختاری آن باید کوچک‌تر باشد.
- اگر هدف از تولید ماده‌ی مورد نظر کاربردی عمومی برای آن باشد، هزینه‌ی تولید آن نباید بالا باشد.

موارد فوق چالش‌های قابل ملاحظه‌ای را پیش رو قرار می‌دهند. فرآیند طراحی را می‌توان با چگونگی بدست آوردن استحکام بالا آغاز نمود. عیوبی که برخی از آنها موجب بالا رفتن انتروپی اختلاط و در نتیجه پایدارتر شدن ماده از لحاظ ترمودینامیکی می‌شوند، تکرارپذیری بلند دامنه‌ای که باید در کل کریستال وجود داشته باشد را محدود می‌سازند. این نوع انتروپی با افزایش تعداد ذرات تشکیل دهنده‌ی (اتم‌ها) کریستال افزایش می‌یابد و لذا عاری بودن ریزساختار از عیوب تنها در مقیاس‌های کوچک امکان‌پذیر است. استحکام این کریستال‌های بدون عیب بسیار بالا خواهد بود زیرا در غیاب عیوب، تغییر شکل پلاستیک باید با جابجایی کل صفحات اتمی بر روی یکدیگر صورت پذیرد نه بر روی گسستگی‌هایی همانند نابجایی‌ها. کریستال‌های میکرومتری آهن خالص (ویسکرها) استحکامی بالاتر از ۱۰GPa را بدست آورده و قابلیت افزایش نیز دارند. با بزرگ‌تر شدن کریستال‌ها، به دلیل پایدار شدن ترمودینامیکی عیوب و نیز اختلالات به وجود آمده در فرآیند رشد، استحکام کریستال‌ها کاهش می‌یابد. این مسئله علت اصلی کاهش استحکام نانوتیوب‌های کربنی با افزایش طول آنهاست.

روش دیگر ساخت مواد استحکام بالا در ابعاد بزرگ، اعمال کسر قابل ملاحظه‌ای از عیوب به شکل فصل مشترک یا نابجایی‌ها است که با مکانیزم‌های دوقلویی و لغزش تداخل پیدا می‌کنند. این عیوب را می‌توان به وسیله‌ی تغییر شکل ایجاد نمود. تکنیک‌هایی که از تغییر فرم پلاستیک شدید برای تولیئ