



تاثیر ویژگی‌های ریزساختار بر رفتار فولاد با سمانتیت کروی شده با استفاده از روش پلاستیسیته کریستالی

مونا عین القضاة، احمد عاصم پور*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۲۵

کلمات کلیدی:

فولاد دوفاز
سمانتیت کروی
پلاستیسیته کریستالی
مدل سازی سه بعدی
نوار ذرات سمانتیت

خلاصه: روش پلاستیسیته کریستالی به عنوان یک ابزار قدرتمند، بطور گسترده‌ای در شبیه‌سازی رفتار و ریزساختار ورق‌های فولادی تک فاز فریتی و یا ورق‌های فولادی دوفاز فریتی-مارتنزیتی و فریتی-پرلیتی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این پژوهش برای اولین بار به مدل سازی ۳ بعدی رفتار ورق‌های فولادی با سمانتیت کروی شده با قابلیت شکل‌پذیری بالا و بررسی تاثیر ویژگی‌های ریزساختار در رفتار آن با استفاده از روش اجزای محدود کریستالی پرداخته شده‌است. برای این منظور یک نرم‌افزار پیش‌پردازش با قابلیت شبیه‌سازی ویژگی‌های ریزساختار این نوع فولاد طراحی شد. خواص ذرات سمانتیت به صورت ترد و شکننده منظور شد. برای توصیف رفتار دانه‌های نرم فریت نیز بعد از اعمال بافت تصادفی به آنها، از روش پلاستیسیته کریستالی و زیربرنامه هوانگ و نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. بعد از کالیبراسیون و استخراج متغیرهای سخت‌شوندگی، به بررسی تاثیر برخی از ویژگی‌های ریزساختار پرداخته شد. محاسبات نشان داد که با افزایش درصد فاز سمانتیت تنش‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر وجود بافت غالب در راستای نورد باعث کاهش تنش‌ها شد. نوار ذرات سمانتیت در راستای جانبی عمود بر راستای نورد نیز به علت تجمع نابجایی‌ها و افزایش تمرکز تنش در این منطقه باعث بالارفتن تنش‌های ماده می‌شود.

۱- مقدمه

ویژگی‌های ساختار میکرومکانیکی فولاد کروی شده از جمله درصد فازها و چگونگی پراکندگی و توزیع ذرات سمانتیت و مقدار پرلیت باقیمانده، خواص مکانیکی و شکل‌پذیری فولاد را تحت تاثیر قرار می‌دهند. امروزه روش المان محدود با استفاده از پلاستیسیته کریستالی^۱ یک ابزار توانمند و رایج برای مطالعه ویژگی‌های ریزساختار و تاثیر آن در رفتار ماکروسکوپیک ماده است. با استفاده از این ابزار می‌توان با در نظر گرفتن رفتار تغییر شکل سیستم‌های لغزش اتمی و تغییر متغیرهای میکروسکوپیک ماده به استخراج خواص ماکروسکوپیک ماده از جمله خاصیت کشش آن پرداخت. مدل سازی میکرومکانیکی در چارچوب پلاستیسیته کریستالی بطور گسترده‌ای در شبیه‌سازی پاسخ مکانیکی ماده بکار برده شده‌است [۲]. بدین ترتیب رفتار ماکروسکوپیک ماده می‌تواند به صورت عددی و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ساختار دانه‌بندی ماده قابل پیش‌بینی و محاسبه باشد. این روش بطور وسیعی در مطالعه رفتار مواد تک فاز مورد استفاده قرار گرفته‌است [۳]. ویژگی‌های مهم ماده از جمله شکل و اندازه دانه‌های تک فاز، مدل سازی

ورق‌های فولادی با ساختار فریت-سمانتیت^۱ بطور گسترده‌ای در فرایندهای شکل‌دهی سرد از جمله کشش عمیق و خمکاری استفاده می‌شوند. ورق‌های فولادی که بطور معمول با نورد گرم تهیه می‌شوند، دارای فازهای فریت و پرلیت لایه‌ای هستند. در این ورق‌ها استحکام بسیار بالاست و لایه‌های سخت پرلیت باعث ایجاد ترک و یا پارگی در طی انجام کار سرد بر روی ورق می‌شود [۱]. بنابراین، معمولاً این ورق‌های نورد گرم شده، تحت عملیات کروی‌سازی آنیل می‌شوند و ساختار آنها تبدیل به دوفاز فریت و سمانتیت کروی می‌شود. بطور معمول با کاهش استحکام ورق‌های فولادی، میزان داکتیلیتی بهتر می‌شود و در نتیجه شکل‌پذیری ورق فولادی به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد. اگرچه به علت تفاوتی که در ساختار اولیه فولادها و شرایط نورد و سپس آنیل کردن ورق‌ها وجود دارد، ورق‌ها ساختار میکرومکانیکی و خواص متفاوتی خواهند داشت. بدین ترتیب

1 Cementite

2 CPFEM

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: assem@sharif.edu

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



سازه‌ای ماشین‌آلات، یک تعادل بین سختی و شکل‌پذیری مورد نیاز است که شامل وجود خاصیت شکل‌پذیری عالی (ایجاد پیش‌فرم، نرمی و قابلیت پرسکاری)، سختی‌پذیری خوب، دقت بالا، خواص سطحی و غیره می‌باشد. لذا سازندگان زیادی به تولید ورق‌های فولادی با خواص مورد نیاز پرداختند. برای تولید یک ورق فولادی پرکربن با خواص شکل‌پذیری عالی لازم است که ضمن استفاده از فرایند کروی‌سازی، کنترل مناسبی بر روی ریزساختار (اجزا و درصد آن‌ها، شکل و اندازه دانه‌ها و نحوه توزیع) فولاد داشته باشیم. وجود یک زمینه فریتی با دانه‌بندی منظم و هم‌محور که دانه‌های کروی و ریز سمانتیت به طور یکنواخت در دانه‌ها پراکنده شده‌اند، یک ساختار ایده‌آل از نظر پرسکاری محسوب می‌شود. از آنجایی که روش‌های تجربی و روش‌های محاسباتی که به صورت آزمون و خطا به این موضوع می‌پردازند، بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند، مدل‌سازی این فولاد با در نظر گرفتن ویژگی‌های ریزساختار آن نقش موثری در کاهش هزینه‌ها خواهد داشت. در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از روش پلاستیسیته کریستالی به مطالعه رفتار ورق‌های فولادی کروی‌شده و تاثیر ویژگی‌های ریزساختار آن پرداخته شد. برای این منظور یک نرم‌افزار پیش پردازش در محیط متلب^۲ تهیه شد که قابلیت مدل‌سازی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی، مدل‌سازی ویژگی‌های ریزساختار این فولاد از جمله اندازه و شکل دانه‌های فریت، اندازه و شکل دانه‌های سمانتیت، درصد فاز سمانتیت، چگونگی توزیع این ذرات در فولاد، اعمال بافت دلخواه به زمینه فریتی و سایر ویژگی‌های ریزساختار و همچنین اعمال بارگذاری و شرایط مرزی دلخواه، انتخاب و تغییر پارامترها و مقادیر مورد نیاز برای زیربرنامه هوانگ^۳ و غیره را داراست. خروجی این نرم افزار، فایل ورودی نرم‌افزار آباکوس است که با استفاده از زیربرنامه هوانگ به شبیه‌سازی رفتار این فولاد و تاثیر متغیرهای مختلف در آن می‌پردازد. به این ترتیب می‌توان با استفاده از روش و مسیر ارائه‌شده در این پژوهش به پیش‌بینی تاثیر متغیرهای مختلف در رفتار فولادهای کروی‌شده مختلف پرداخت و در نتیجه به طراحی فولادی با خواص استحکامی و شکل‌پذیری دلخواه پرداخت.

۲- روش مدل‌سازی

علی‌رغم سودمندی فراوان روش پلاستیسیته کریستالی، به دلیل حجم محاسبات بالا و زمانگیر بودن آن، نمی‌توان شبیه‌سازی را برای اجسام در مقیاس واقعی انجام داد. هنگامی که ابعاد نمونه‌های مورد بررسی، خیلی

ریزساختار و بررسی پدیده‌های مختلف انجام شده‌است. در سال‌های اخیر بررسی فولادهای دوفاز فریتی-مارتنزیتی مورد توجه قرار گرفته‌است [۴]. اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینه فولادهای کروی‌شده با استفاده از این روش انجام نشده‌است. با توجه به اهمیتی که فرایند کروی‌کردن فولاد در شکل‌پذیری آن دارد، در این پژوهش با استفاده از روش پلاستیسیته کریستالی به مطالعه رفتار ورق‌های فولادی با زمینه فریتی و توزیع ذرات سخت سمانتیت کروی شده به عنوان فاز دوم در آن پرداخته شد.

از آنجایی که مدل‌سازی کل ماده با در نظر گرفتن ساختار دانه‌بندی و سیستم‌های لغزش آن از نظر محاسباتی امکان‌پذیر نمی‌باشد، حجم محدودی از ماده که خواص آن قابلیت تکرارپذیری داشته و بیانگر خواص عمومی و میانگین ماده می‌باشد، به عنوان المان حجمی نماینده^۱ انتخاب شد تا خواص ماکروسکوپی ماده براساس آن استخراج شود.

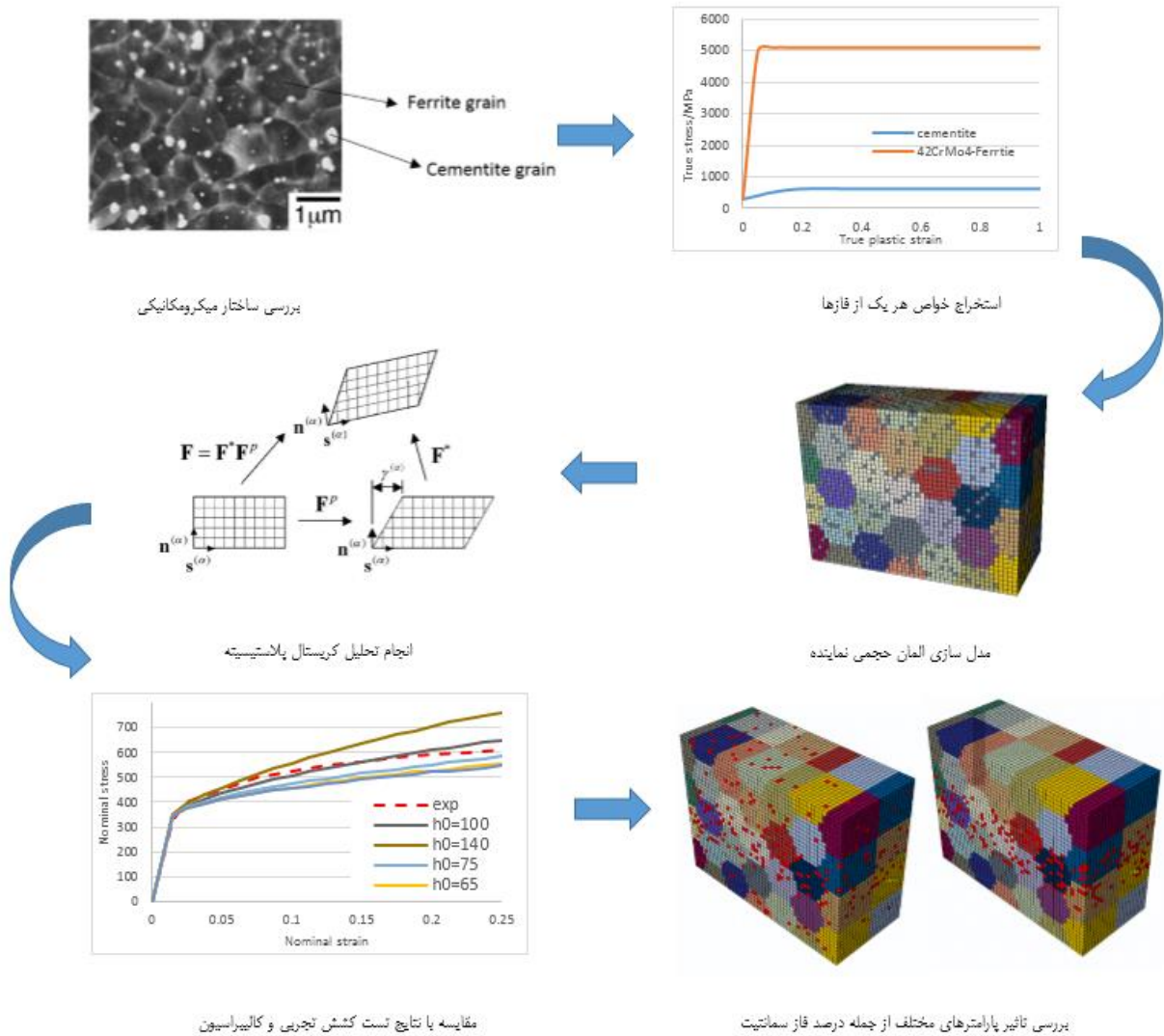
این المان حجمی باید هم به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند دربرگیرنده خواص و ناهمگنی ساختار کامپوزیتی ماده باشد و هم به اندازه کافی کوچک باشد تا به عنوان یک المان حجمی کانتینیومی در نظر گرفته شود [۵]. مطالعات و مدل‌سازی‌های میکرومکانیکی زیادی بر روی مواد مختلف از جمله فولادهای دوفاز، فولاد کربنی، آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت‌های فلزی انجام شده‌است. رضانی و همکارانش [۶] به پیش‌بینی رفتار فولاد دوفاز با استفاده از المان حجمی نماینده‌ای که براساس ریزساختار واقعی ساخته شده بود، پرداختند. لاسچت و همکارانش [۷] به بررسی رفتار سیلان لوله‌های فریتی-پرلیتی و فولادهای کم کربن آلیاژی پرداختند.

یکی از کاربردهای اصلی فولادهای پرکربن در تولید قطعات قوای محرکه خودرو است. از آنجایی که بسیاری از این قطعات شکل‌های بسیار پیچیده و ضخامت‌های متفاوتی دارند، فرایندهای زیادی از فرم‌دادن تا عملیات حرارتی در راستای تولید آن‌ها لازم است. از طرف دیگر تلاش‌های زیادی در راستای کوچک‌کردن و سبک‌کردن این قطعات و کاهش هزینه‌های تولید آن‌ها انجام گرفته‌است. در زمینه تولید قطعات قوای محرکه خودرو مطالعات فراوانی صورت گرفته است و تولید قطعات با استفاده از کار سرد بر روی ورق‌های فولادی جایگزین تولید قطعات با استفاده از فورج داغ بر روی شمش‌های فولادی شده‌است. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه تجهیزات و تکنولوژی انجام کار سرد بر روی ورق‌های فولادی ایجاد شده‌است و امکان ایجاد تغییر ضخامت به صورت موضعی با استفاده از فورج ورق‌های فولادی ایجاد شده‌است. برای ساخت قطعات

2 Matlab

3 Huang's UMAT

1 RVE



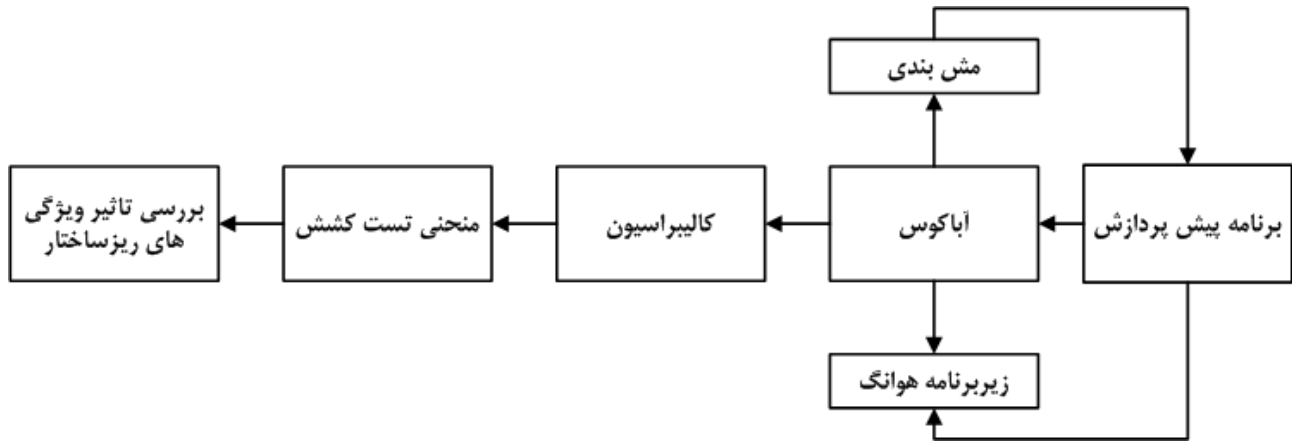
شکل ۱. دیاگرام کلی مسیر شبیه‌سازی چندمقیاسی فولاد کروئ.

Fig. 1. Flowchart of multiscale simulation process

سازی فولاد مورد نظر از جمله اندازه دانه‌های فریت و سماتیت و درصد فاز از مقالات موجود استخراج می‌شوند. سپس خواص هر یک از فازها نیز براساس منابع موجود استخراج می‌شود که البته در مرحله کالیبراسیون بر نتایج تجربی مورد نظر منطبق می‌شود. در مرحله بعد به مدل‌سازی سه‌بعدی ریزساختار پرداخته می‌شود و با شرط تکرارپذیری جواب‌ها اندازه المان حجمی مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌ها بدست می‌آید. سپس شبیه‌سازی با استفاده از روش پلاستیسیته کریستالی و کد هوانگ در بستر نرم‌افزار آباکوس انجام شده و متغیرهای سخت‌شوندگی برای فولاد کروئ کالیبره می‌شوند. با انجام کالیبراسیون و تطبیق نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی به

کوچک می‌شود، شرایط مرزی اثر قابل توجهی بر جواب‌های حاصله از تحلیل کریستال پلاستیسیته می‌گذارند. به همین جهت برای حذف این اثرات از روش‌های چندمقیاسی استفاده می‌گردد. برای این منظور یک نمونه کوچک به عنوان المان حجمی نماینده با شرایط مرزی مناسب شبیه‌سازی می‌شود و خواص ماده در مقیاس کریستالی به دست آمده و از این خواص در مقیاس‌های بالاتر استفاده می‌شود. دیاگرام مسیری که با استفاده از آن به بررسی خواص فولاد کروئ شده در این پژوهش پرداخته شده‌است، در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.

طبق دیاگرام مراحل کار، ابتدا ویژگی‌های ریزساختار مورد نیاز برای شبیه



شکل ۲. فلوجارت مسیر شبیه سازی فولاد کروی شده در این پژوهش.

Fig. 2. Flowchart of simulation process used in this study.

مشخص می شود. سپس هسته دانه های سماتیت به صورت تصادفی و یا طبق الگویی مشخص (وجود نوار، تعداد و پهنای نوارها، امکان تداخل دانه ها و یا وجود حداقل فاصله بین ذرات و ...) که در نرم افزار امکان انتخاب وجود دارد، در زمینه فریتی توزیع می شوند و المان های انتخاب شده به هسته یک ذره سماتیت نسبت داده می شود. سپس با توجه به اندازه دانه های سماتیت و اندازه مش بندی زمینه، دانه های سماتیت به صورت یک تک المان (کاری که در این پژوهش انجام شده است) و یا به شکل دلخواه با تعداد مشخصی المان به دور هسته خود در نظر گرفته می شوند. این نرم افزار امکان مدل سازی سازی به صورت دوبعدی و سه بعدی را نیز داراست و در این پژوهش مدل سازی به صورت سه بعدی انجام شده است. در مرحله بعد بافت دلخواه برای ذرات فریت تهیه شده و به هریک از دانه های فریت راستای تهیه شده نسبت داده می شود. در نهایت فایل ورودی جدیدی برای نرم افزار آباکوس آماده می شود که در آن به هریک از دانه های فریت و سماتیت خواص تجربی و متغیرهای روش کریستال پلاستیسیته نسبت داده می شود. بارگذاری و شرایط مرزی و کلیه متغیرهای مورد نیاز برای استفاده در آباکوس طبق الگوی منطبق با آن تهیه می شود. این فایل ورودی در نرم افزار آباکوس بارگذاری شده و با استفاده از زیربرنامه هوانگ به پردازش اطلاعات و حل مساله پرداخته می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی مورد بررسی و پردازش قرار می گیرند و با تکرار حل برای متغیرهای مختلف و مقایسه با نمودار تجربی، کالیبراسیون انجام می شود. بدین ترتیب بعد از تایید نتایج خروجی از این روش و انطباقش بر نتایج تجربی، می توان به بررسی تاثیر

بررسی تاثیر سایر ویژگی های ریزساختار در رفتار فولاد کروی شده پرداخته می شود تا قابلیت های این روش شبیه سازی نمایش داده شود. بطور کلی مسیر شبیه سازی با استفاده از این روش در فلوجارت شکل ۲ بطور خلاصه نمایش داده شده است. طبق فلوجارت شبیه سازی، ابتدا یک نرم افزار پیش پردازش طراحی شده است که قابلیت مدل سازی ویژگی های میکروسکوپی ماده شامل ساختار دانه بندی، اندازه دانه ها، سیستم های لغزش، درصد فازی، بافت^۱ و جهت گیری اولیه دانه ها، نوع بارگذاری، اندازه المان حجمی نماینده و خواص هریک از فازها شامل ثوابت پلاستیک و متغیرهای سخت شوندگی را دارد. سپس با استفاده از نرم افزار آباکوس یک المان حجمی با ابعاد تعیین شده مدل شده و مش زده می شود. فایل ورودی^۲ تهیه شده توسط آباکوس که شامل مش بندی مجموعه می باشد، به عنوان ورودی به برنامه پیش پردازش نوشته شده در محیط متلب، داده می شود. در نرم افزار تهیه شده، ابتدا مکان هسته دانه های فریت مشخص شده و سپس طبق مش بندی نمونه و با توجه به اندازه دانه های فریت، به هر یک از المان ها شماره یک دانه که نزدیکترین فاصله با هسته خود را داراست نسبت داده می شود. بدین ترتیب ساختار دانه بندی فریت تهیه می شود. در این بخش امکان تعیین اندازه دانه ها و شکل دانه ها وجود دارد که در این پژوهش برای سادگی دانه های فریت به صورت ۶ ضلعی منتظم و ستونی در نظر گرفته شده اند. در مرحله بعد ابتدا با توجه به درصد فاز سماتیت و قطر این ذرات، تعداد دانه های سماتیت

1 Texture
2 Input file

شد. در این مقاله از ورق فولادی 42CrMo4 با ضخامت ۶ میلی‌متر که نورد سرد بر روی آن انجام شده‌است و سپس تحت عملیات حرارتی کرووی سازی قرار گرفته‌است، استفاده شده‌است. میانگین قطر ذرات فریت ۷ میکرومتر و ذرات سمانتیت ۰/۶۵ میکرومتر می‌باشد. درصد فاز سمانتیت نیز به صورت $10 \pm 0.5\%$ محاسبه شده‌است. ابعاد المان حجمی مناسب برای شبیه‌سازی با توجه به تجربیات قبلی استخراج شد و مورد استفاده قرار گرفت. پیشتر عاصم‌پور و همکارانش [۱۴] نشان دادند که برای همگرایی جواب‌ها لازم است نسبت ضخامت مدل به قطر میانگین دانه‌ها، حداقل ۲ باشد. بنابراین با توجه به اندازه دانه‌های شبیه‌سازی شده فریت ۷ میکرومتر، ضخامت ۱۴ میکرون برای نمونه در نظر گرفته می‌شود. از طرفی برای از بین بردن تاثیر لبه‌ها طبق بررسی‌های انجام شده نسبت طول به عرض ۴ به ۳ نسبت مناسبی است. لذا با در نظر گرفتن این شرایط لازم که در مقاله فوق بطور کامل به آن پرداخته شده‌است، به مدل‌سازی المان حجمی مناسب پرداخته می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که حداقل ۲۴ عدد دانه برای همگرایی جواب‌ها لازم است. به این ترتیب المان حجمی با ابعاد $24 \times 32 \times 14$ میکرومتر مکعب برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد که دارای ۶۲ دانه فریتی می‌باشد. المان حجمی شبیه‌سازی شده در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. با توجه به وابستگی مدل ماده به نرخ کرنش، این مقدار 0.001 در نظر گرفته شده‌است که برابر با نرخ کرنش دستگاه تست استفاده شده در مقاله تجربی مبنا می‌باشد [۱۳].

۲-۲- نوع المان و اندازه مش مناسب

شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و به صورت ۳ بعدی و با استفاده از المان‌های آجری خطی^۱ انجام شده‌است. برای استخراج اندازه مش مناسب، عاصم‌پور و همکارانش [۱۴] نشان دادند که حداقل تعداد مش لازم در هر دانه ۴۰۰ عدد می‌باشد و با افزایش این میزان جواب‌ها همگرا می‌باشند. برای این منظور با توجه به اندازه دانه‌های فریت در فولاد 42CrMo4 که در مقاله فوق ذکر شده‌است، اندازه مش ۰/۸۵ میکرومتر محاسبه می‌شود. از طرفی با توجه به اندازه دانه‌های سمانتیت که ۰/۶۵ میکرومتر می‌باشد. برای ساده‌سازی مدل، اندازه مش‌ها برابر با اندازه ذرات سمانتیت یعنی ۰/۶۵ میکرومتر در نظر گرفته شده‌است. بنابراین در هنگام مدل‌سازی نمونه و ایجاد دانه‌های سمانتیت، المان‌هایی به عنوان ذرات سمانتیت در نظر گرفته شدند که به صورت تصادفی درون زمینه فریتی توزیع شده‌اند.

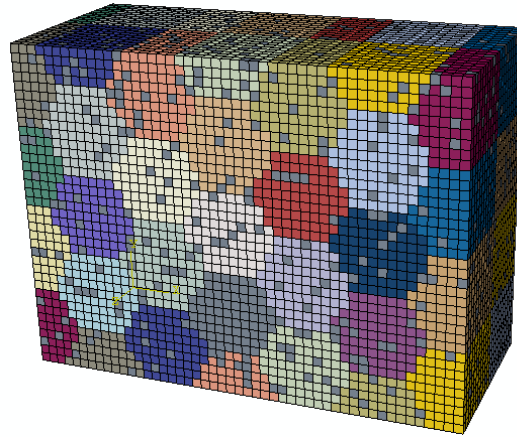
سایر ویژگی‌های ریزساختار در رفتار فولاد پرداخت و یا با توجه به خواص استحکامی و یا شکل‌پذیری به طراحی و تعیین ویژگی‌های ریزساختار فولاد کرووی شده پرداخت.

۲-۱- تعیین اندازه مناسب برای المان حجمی نماینده

بنابراین لازم است حداقل اندازه مناسب برای انجام شبیه‌سازی تعیین شود تا در عین تکرارپذیری جواب‌ها، زمان محاسبات نیز کاهش یابد. اندازه لازم برای نمونه شبیه‌سازی باید بگونه‌ای انتخاب شود که دربرگیرنده کلیه پدیده‌های غالب در داخل ماده مورد بررسی باشد. دراگان و ویلیس [۸] بیان کردند که حداقل اندازه مناسب برای المان حجمی نماینده کوچکترین المان حجمی از کامپوزیت است که از لحاظ آماری نماینده آن ماده باشد. آنها نشان دادند که حداقل اندازه این المان حجمی باید حداقل دو برابر قطر اجزای تقویت‌کننده آن باشد تا ماکزیمم خطا در محاسبه ثابت الاستیک حدود ۵ درصد باشد. گوسو [۹] به بررسی المان‌های حجمی پریودیک با تعداد متفاوت از کره‌های یکسان پرداخت تا بررسی پراکندگی که در محاسبه خواص الاستیک ایجاد می‌شود بپردازد ولی او تفاوت خیلی کمی مشاهده کرد. برای مدل کردن ماده لازم است یک آرایه تکرارشونده ماکروسکوپی و یک المان حجمی نماینده برای ماده تعریف شود و میانگین خواص مکانیکی ماکروسکوپی ماده کامپوزیتی باید با میانگین خواص مکانیکی المان حجمی یکسان باشد [۱۰].

ایجاد المان حجمی نماینده به صورت اتوماتیک در شبیه‌سازی کامپوزیت‌های فلزی تقویت‌شده با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری انجام شده‌است [۱۱، ۱۲]. در این پژوهش با توجه به نیاز مساله و عدم وجود نرم‌افزار تجاری مناسب جهت مدل‌سازی ویژگی‌های پیچیده و خاص فولاد کرووی شده، یک نرم‌افزار شبیه‌سازی طراحی شد. این نرم‌افزار دارای قابلیت شبیه‌سازی ساختار فولاد دوفاز با قابلیت کنترل بر چگونگی توزیع ذرات سمانتیت، اندازه ذرات، درصد ذرات، خواص فازها، اعمال بافت به زمینه فریتی، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری متنوع می‌باشد. به این ترتیب زمینه فریتی به صورت دانه‌های منظم شش ضلعی شبیه‌سازی شد و دانه‌های سمانتیت نیز به صورت ذراتی که به طور تصادفی بین آن‌ها پخش شده‌اند. این ذرات هم در درون دانه‌ها و هم در مرز دانه‌ها توزیع شدند.

برای مقایسه شبیه‌سازی انجام شده با نتایج تجربی و استخراج متغیرهای اولیه برای شبیه‌سازی از پژوهش انجام شده توسط ژوانگ [۱۳] استفاده



شکل ۳. المان حجمی مدل سازی شده به عنوان المان حجمی نماینده فولاد کرووی شده.

Fig. 3. Volume element modeled as the RVE of spheroidized steel

۳- مدل ساختاری و سخت شونده گی فازها

رفتار ماده به نرخ وابسته نخواهد بود.

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{a} \left(\frac{\tau^\alpha}{g^\alpha} \right) \left| \left(\frac{\tau^\alpha}{g^\alpha} \right) \right|^{n-1} \quad (1)$$

برای این منظور طبق رابطه سخت شونده گی که توسط پیرس [۱۸] پیشنهاد شده است و در زیر برنامه هوانگ مورد استفاده قرار گرفته است، سختی سیستم در لحظه جاری مطابق با رابطه (۲) می باشد:

$$\dot{g}^\alpha = \sum_{\beta=1}^N h_{\alpha\beta} \dot{\gamma}^{(\beta)} \quad (2)$$

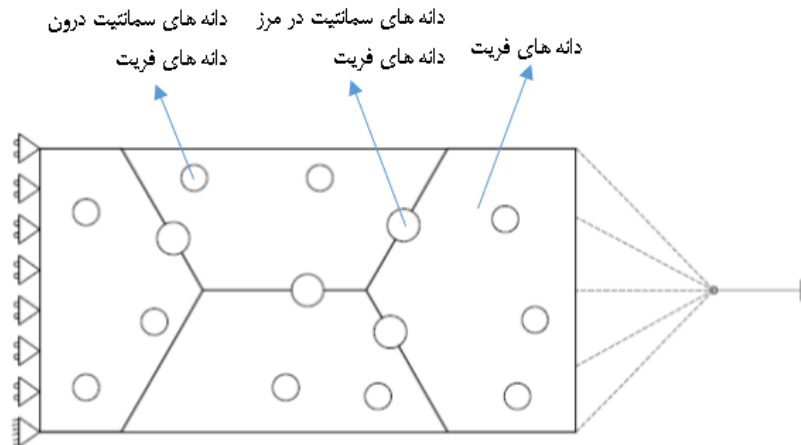
که در این رابطه $h_{\alpha\beta}$ مدول سخت شونده گی لغزش جانبی و $h_{\alpha\alpha}$ مدول خود سخت شونده گی است و طبق رابطه (۳) تعریف می شود:

$$h_{\alpha\beta} = \begin{cases} h(\gamma) = h_0 \operatorname{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{(\tau_s - \tau_0)} \right| & \alpha \neq \beta \\ qh(\gamma) & \alpha = \beta \end{cases} \quad (3)$$

متغیرهای h_0 مدول سخت شونده گی اولیه، τ_0 استحکام برشی اولیه و τ_s

با توجه به بررسی های انجام شده خواص الاستیک هر دو فاز فریت و سمانتیت تقریباً یکسان می باشد. هر دو فاز ضریب الاستیک برابر ۲۱۰ GPa و ضریب پواسان ۰/۳ دارند [۱۳]. همچنین براساس نتایج تجربی و شبیه سازی های انجام شده تنش تسلیم سمانتیت حدود ۳۰۰۰ MPa است. ذرات سمانتیت کرووی معمولاً در زمان تست کشش حتی در زمان شکست هیچ گونه تغییر شکل پلاستیکی از خود نشان نمی دهند و تنش ماده هیچگاه به حد تسلیم آنها نمی رسد و برای مدل سازی رفتار این فاز می توان تا قبل از تسلیم ماده از دیدگاه ماکروسکوپی رفتار الاستیک خطی برای ذرات سمانتیت در نظر گرفت [۱۵]. برای شبیه سازی خواص فریت زمینه، از روش پلاستیسته کریستالی استفاده شده است. روش المان محدود بر اساس تئوری کریستال پلاستیسته در واقع بهترین مدل برای شبیه سازی تغییر شکل پلاستیک مواد کریستالی است. این روش معادلات ساختاری کریستال پلاستیسته را به روش المان محدود ارتباط می دهد [۱۶].

یکی از مدل های سخت شونده گی رایج برای مدل سازی رفتار پلاستیک فلزات، مدل سخت شونده گی وابسته به نرخ است که توسط هاتچینسون [۱۷] مطرح شد و طبق رابطه (۱) در مدل سازی رفتار پلاستیک همگن این فولاد نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این رابطه تنش برشی حدی τ^α را به نرخ کرنش برشی $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ روی سیستم لغزش α مربوط می کند. در این رابطه g^α سختی سیستم در حالت جاری، \dot{a} نرخ کرنش مرجع و n پارامتر حساسیت به تنش می باشد. زمانی که در این رابطه n به بی نهایت میل کند،



شکل ۴. شرایط مرزی و بارگذاری مدل سازی شده به صورت شماتیک.

Fig. 4. Schematic view of loading and boundary conditions

نشان داده شده است که τ_s تاثیر خیلی کمی در پاسخ کلی جواب دارد. در حضور مکانیزم های نرم شوندگی در زمان شروع و پیشروی آسیب و با وجود τ_s بالا قبل از اینکه شیب سخت شوندگی تغییر کند، شکست رخ داده است. لذا مقدار ۳۹۲ مربوط به فریت خالص که قبلا توسط عاصم پور و همکارانش مورد استفاده قرار گرفته بود، برای این منظور در نظر گرفته شد. پارامتر h_0 در واقع بیانگر شیب نمودار در بخش تغییر شکل پلاستیک می باشد که ابتدا به کالیبره کردن آن پرداخته می شود. همانطور که در شکل زیر نمایش داده شده است، h_0 برابر با ۶۳ کمترین خطای شیب و بیشترین انطباق با نتایج تجربی را ایجاد می کند.

بعد از کالیبره کردن پارامتر h_0 ، پارامتر τ_0 کالیبره می شود که مربوط به عرض از مبدا نمودار می باشد. با تغییر این پارامتر نمودار شبیه سازی بر نمودار تجربی منطبق می شود.

همانطور که در نمودار شکل ۶ مشخص است مقدار τ_0 برابر با ۸۸ کمترین اختلاف با مقدار تجربی را دارد و به عنوان مقدار کالیبره شده برای آن منظور می شود. به این ترتیب کد فوق اکنون قابلیت پیش بینی رفتار فولاد کروی شده در بخش تغییر شکل پلاستیک همگن و قبل از شکست را داراست و می توان تاثیر تغییر ویژگی های مختلف ریزساختار را در خواص ماکروسکوپیک آن مشاهده نمود. به عنوان نمونه تاثیر تعدادی از این پارامترها و قابلیت این روش در مدل سازی این ویژگی ها و خواص در ادامه بررسی شده است.

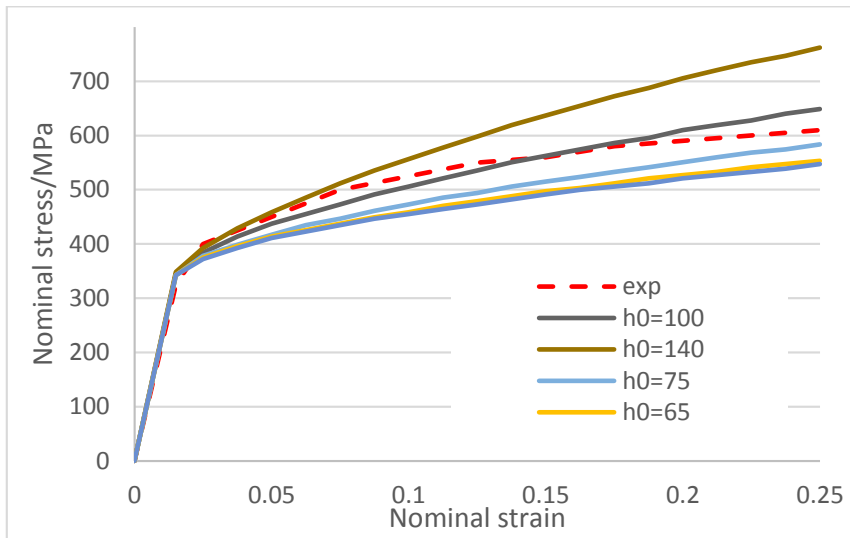
استحکام برشی نهایی می باشد که با استفاده از کالیبراسیون نتایج شبیه سازی تست کشش ساده با نتایج تجربی این تست، تعیین و نهایی می شوند. q ضریب سخت شوندگی است که معمولا بین ۱ تا ۱/۴ در نظر گرفته می شود. برای استفاده از این روش از نرم افزار آباکوس و کد هوانگ استفاده شد.

۴- نتایج مدل سازی

۴-۱- کالیبراسیون

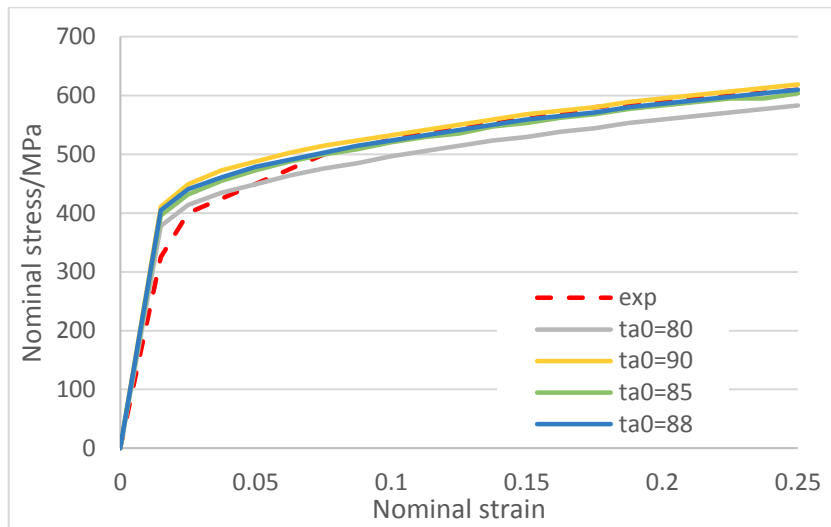
شرایط مرزی تست کشش ساده به المان حجمی مدل سازی شده اعمال شد. برای جلوگیری از تاثیر در سایر درجات آزادی نقاط سمت راست که بار بر روی آنها اعمال می شود، یک نقطه مرجع تعریف شد و توسط قید معادله در نرم افزار آباکوس به نقاط واقع در ضلع سمت راست نمونه متصل شد و بار به آن اعمال شد تا بار یکسانی به همه نقاط به صورت افقی اعمال شود و شرایط کشش ساده فراهم شود. برای محاسبه درصد فازی ± 0.5 درصد خطا در نظر گرفته شده است. درجات آزادی نقاط مربوط به ضلع سمت چپ نیز در راستای کشش مقید شد. نمودار تنش مهندسی- کرنش مهندسی حاصل با استفاده از نیروهای عکس العمل محاسبه شده و رسم شده است. کرنش مهندسی ۰/۲۵ به عنوان کرنش نهایی در نظر گرفته شد و جابجایی متناسب با کرنش به هر نمونه اعمال شد. برای محاسبه تنش سطح اولیه نمونه و برای محاسبه کرنش طول اولیه نمونه مورد استفاده قرار گرفته است.

برای صحت سنجی نتایج و امکان استفاده از روش پلاستیسیته کریستالی به کالیبره کردن متغیرهای سخت شوندگی τ_0 و h_0 و τ_s پرداخته می شود.



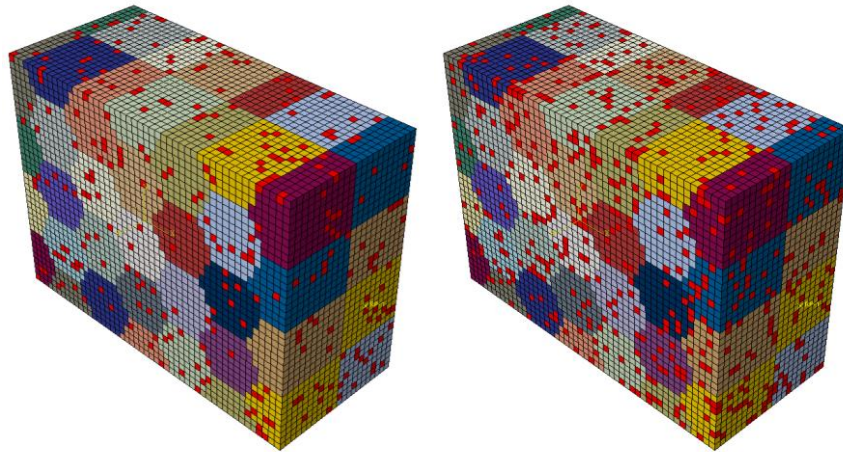
شکل ۵. کالیبراسیون پارامتر سخت‌شوندگی h_0 .

Fig. 4. The calibration of hardening parameter h_0



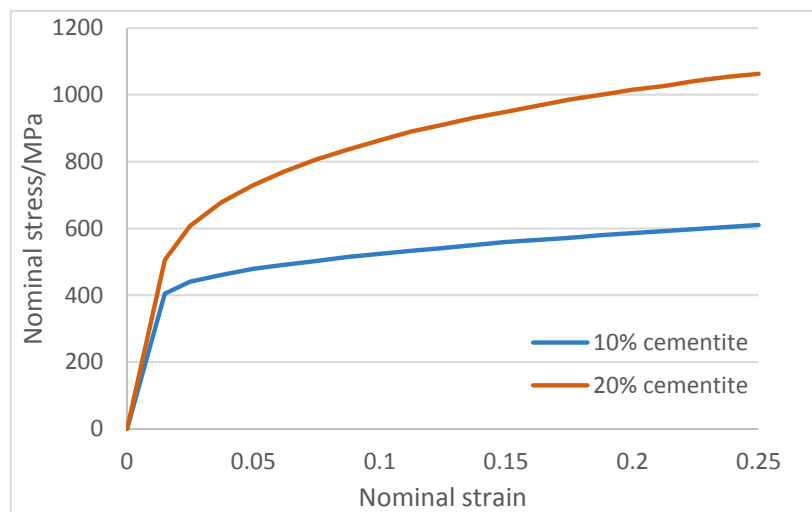
شکل ۶. کالیبراسیون پارامتر سخت‌شوندگی τ_0 .

Fig. 6. The calibration of hardening parameter τ_0



شکل ۷. نمونه‌های آماده‌شده برای بررسی تاثیر درصد فاز سمانتیت ۱۰ و ۲۰ درصد.

Fig. 7. RVE produced to study the effect of volume fraction of cementite for two case 10% and 20 %



شکل ۸. بررسی تاثیر درصد فاز سمانتیت برای دو نمونه با درصد فاز سمانتیت ۱۰ و ۲۰ درصد.

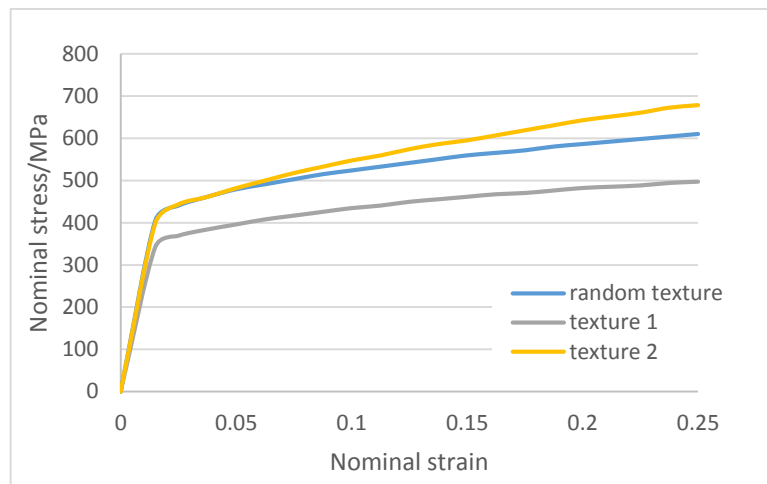
Fig. 8. Investigation of the effect of volume fraction of cementite for two case 10% and 20 %

یافته و نحوه مدل‌سازی این خاصیت نمایش داده شده‌است، ۲ المان حجمی نماینده با ابعاد ذکرشده در بخش ۱-۲ شامل ۶۲ دانه فریت یکسان با قطر میانگین ۷ میکرومتر مدل‌سازی شد. کلیه شرایط هر دو المان حجمی یکسان فرض شد و تنها درصد فاز سمانتیت که در هر دو المان به صورت تصادفی توزیع شده‌است، تغییر داده شد. همانطور که در نمودار شکل ۸ مشخص است با افزایش درصد این فاز سخت میزان تنش‌ها در ماده افزایش می‌یابد و نمودار به سمت بالا جابجا می‌شود. علت آن نیز افزایش ناهمگنی و بی‌نظمی

۴-۲- بررسی تاثیر ویژگی‌های ریزساختار در رفتار فولاد کروی شده

• بررسی تاثیر درصد فاز سمانتیت

در شبیه‌سازی انجام‌شده برای انجام کالیبراسیون و صحت‌سنجی نتایج بر اساس نتایج تجربی، فاز سمانتیت ۱۰ درصد در نظر گرفته شده‌بود. برای بررسی تاثیر درصد این فاز در نمودار تنش- کرنش فولاد کروی، درصد این فاز تغییر داده شده و دو نمونه با درصد فاز سمانتیت ۱۰ و ۲۰ درصد برای این منظور در نظر گرفته‌شد. همانطور که در شکل ۷ خروجی نرم‌افزار توسعه



شکل ۹. بررسی تاثیر بافت زمینه فریتی بر رفتار فولاد کروی شده.

Fig. 9. Investigation of the effect of ferrite texture on mechanical properties of spheroidized steel

• بررسی تاثیر اندازه ذرات فریت

این روش مدل سازی قابلیت بررسی تاثیر اندازه دانه ها را نیز دارد. طبق بررسی هایی که پیشتر به طور کامل توسط عاصم پور و همکارانش [۱۴] درباره تاثیر اندازه دانه های فریت در رفتار فولاد انجام شده است، نشان داده شده است که کاهش اندازه دانه های فریت باعث بالارفتن استحکام فولاد و افزایش تنش تسلیم و تنش حد نهایی می شود. در این فولاد نیز همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با افزایش اندازه دانه های فریت از ۷ میکرومتر به ۱۴ میکرومتر استحکام فولاد کاهش می یابد و با کاهش اندازه دانه های فریت این مقدار افزایش می یابد.

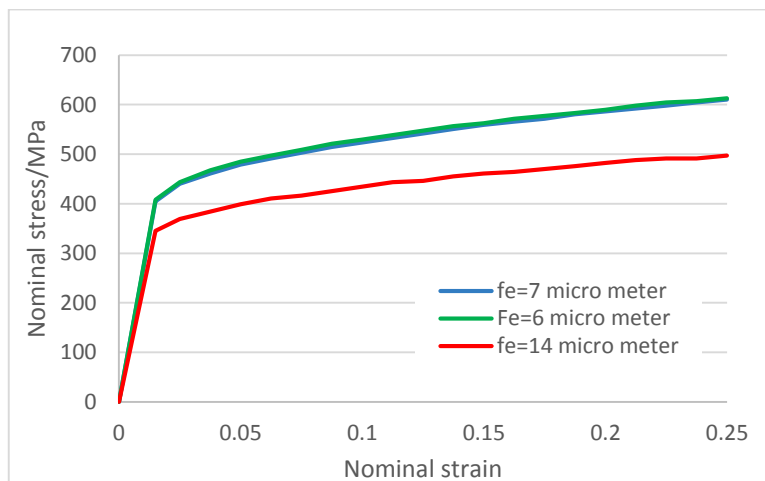
• بررسی تاثیر تجمع و نوار ذرات سمانتیت در یک منطقه

در صورتی که ذرات سمانتیت بطور موضعی در منطقه ای از ورق تجمع یابند به گونه ای که حجمی از ماده بطور خاص دارای غلظت بیشتری از این ذرات باشد، همانطور که در شکل زیر نمایش داده شده است، رفتار ماده بطور موضعی طبق نمودار زیر تغییر خواهد کرد و به علت تمرکز تنش های ایجاد شده در آن منطقه با کاهش فاصله ذرات، تنش ها به شدت افزایش می یابند و به تبع آن با اعمال معیارهای شکست، ماده خیلی سریع در آن مکان دچار شکست خواهد شد. برای بررسی تاثیر تجمع ذرات در بخشی از ماده بطور ناخواسته که جزء عیوب ورق محسوب می شود و همچنین نشان دادن قابلیت این روش مدل سازی فولاد، ۳ المان حجمی با ابعاد ذکر

در مجموعه می باشد. لذا تجمع نابجایی ها درون ذرات فریت اطراف دانه های سمانتیت و میزان تمرکز تنش افزایش یافته و سطح تنش ها بطور محسوسی افزایش می یابد و بگونه ای ماده سخت تر می شود. البته باید توجه داشت در این حالت تغییر شکل پلاستیک همگن ماده کاهش می یابد و شکست زودتر آغاز خواهد شد که در نمودار فوق نمایش داده نشده است.

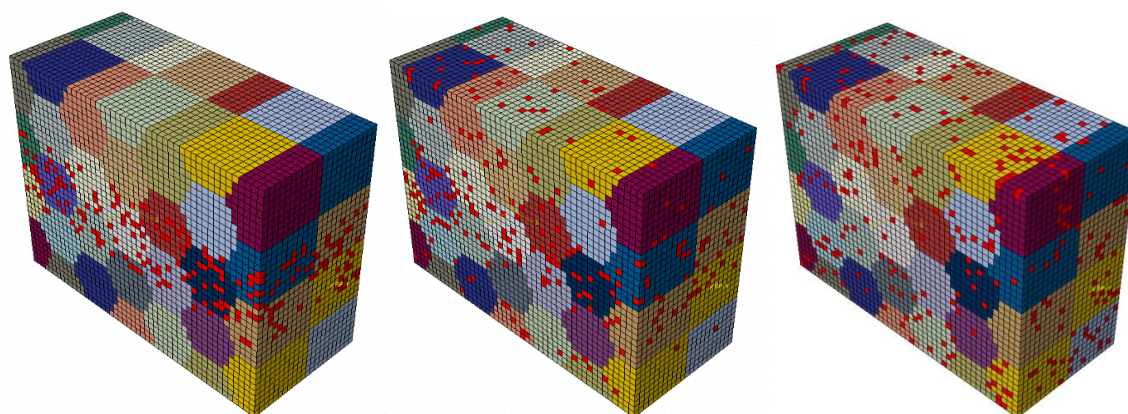
• بررسی تاثیر بافت فریت زمینه

مدل سازی انجام شده قابلیت بررسی اعمال هرگونه بافت به زمینه فریتی را داراست. با توجه به فرایند آنیلینگ طولانی مدت کروی سازی، بافت زمینه کاملاً تصادفی می باشد که در کلیه شبیه سازی ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود ممکن است در بخش هایی از ورق به صورت موضعی، بعد از انجام این عملیات کروی سازی نیز بافت به صورت تصادفی توزیع نشده باشد و ورق دارای یک یا چند بافت غالب باشد که براحتی در زیر برنامه طراحی شده امکان اعمال بافت با استفاده از زوایای اوپلر فراهم می باشد. به عنوان نمونه در شکل ۹ برای نمایش تاثیر بافت برای چند حالت مختلف جهت گیری دانه ها بررسی و مقایسه شده است. در بافت ۱ جهت گیری دانه ها بگونه ای است که محورهای دانه با محورهای اصلی نمونه همراستا هستند. در بافت ۲ محورهای X و Z به اندازه ۴۵ درجه حول محور Y دوران داشته اند و همانطور که انتظار می رود با توجه به جهت گیری دانه ها و راستای لغزش دانه ها، فولاد رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد.



شکل ۱۰. بررسی تاثیر اندازه دانه‌های فریت در رفتار فولاد کروئ شده.

Fig. 10. Investigation of the effect of ferrite grain size

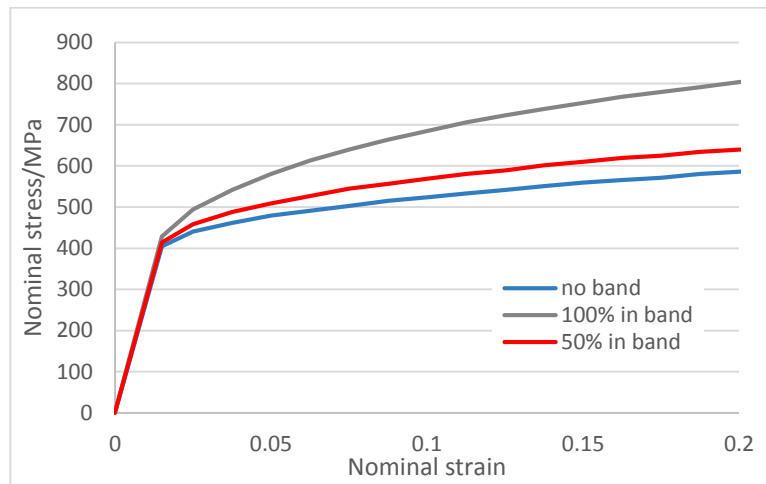


شکل ۱۱. نمونه‌های آماده‌شده برای بررسی تاثیر تجمع ذرات به صورت موضعی در حجمی از ماده.

Fig. 11. RVE produced to study the effect of carbide bands in a volume of the RVE

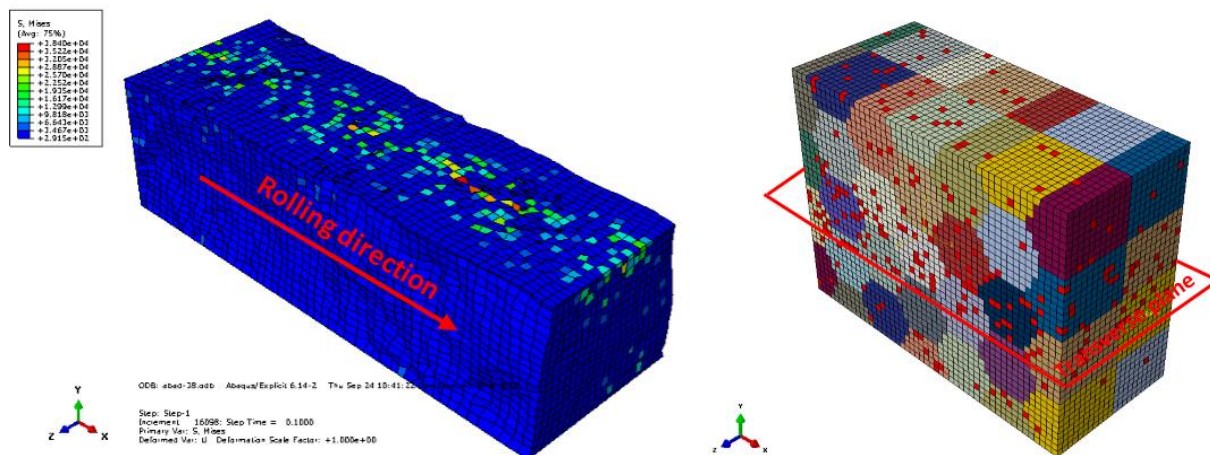
شدند. همانطور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود با افزایش این تجمع ذرات و در نتیجه تمرکز تنش بالا در نوار مرکزی، میزان تنش‌ها در المان حجمی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. لذا این منطقه تحت شرایط تغییر شکل بسیار آسیب‌پذیر بوده و مکانی برای شروع ترک و شکست خواهد بود. اما آنچه که در واقعیت معمولاً به عنوان عیب ساختاری در ورق‌های فولادی کروئ شده دیده می‌شود، تشکیل نوار یا تجمع ذرات سمانتیت در صفحات جانبی عمود بر راستای نورد در یک یا چند منطقه است. پهنا و تعداد این نوارها به شدت در رفتار تغییر شکل ورق فولادی تاثیر گذار می‌باشد.

شده در بخش ۲-۱ مدل‌سازی شد. در هر ۳ مدل تمامی خواص از جمله درصد فاز سمانتیت مشابه هم در نظر گرفته شده‌است. همانطور که در شکل ۱۱ خروجی نرم‌افزار توسعه‌یافته و نحوه مدل‌سازی انجام‌شده، نمایش داده شده‌است، به ترتیب از سمت راست به چپ ذرات سمانتیت به صورت کاملاً تصادفی، ۵۰ درصد ذرات به صورت تصادفی و باقی آن‌ها در نواری حجمی در مرکز المان حجمی و در المان حجمی سوم کل ذرات سمانتیت در نواری حجمی در مرکز نمونه توزیع شدند. المان‌های حجمی مدل‌شده تحت شرایط کشش ساده قرار گرفتند و نمودار تنش-کرنش حاصل باهم مقایسه



شکل ۱۲. بررسی تاثیر تجمع ذرات به صورت موضعی در حجمی از ماده در ۳ حالت که ذرات کاملاً تصادفی توزیع شده باشند، ۵۰ درصد ذرات در نواری حجمی از ماده توزیع شده باشند و حالتی که ۱۰۰ درصد ذرات در این ناحیه متمرکز شده باشند.

Fig. 12. Investigation of the effect of carbide bands in a volume of the RVE on 3 cases: Randomly distributed, Accumulation of 50% of cementite particles in a volume of RVE and Accumulation of 100% of cementite particles in a volume of RVE

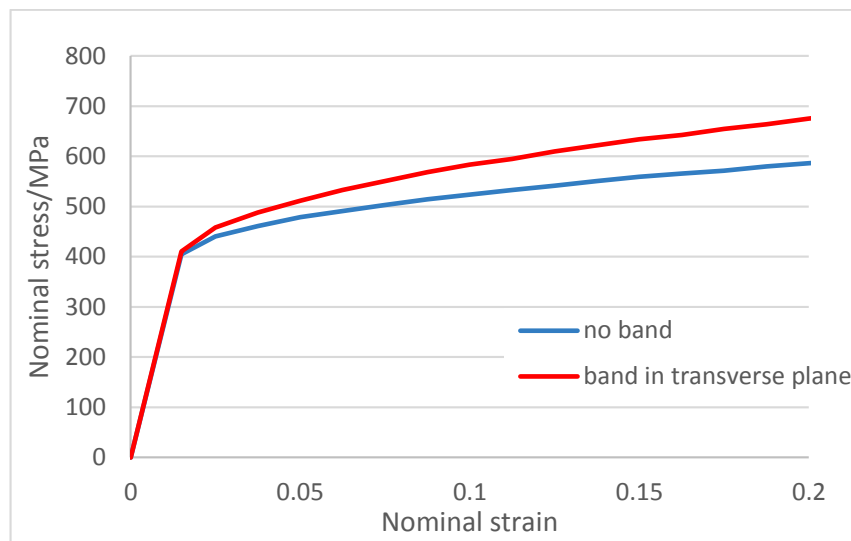


شکل ۱۳. نمونه مدل سازی شده و شبیه سازی شده برای بررسی تجمع ذرات در صفحه جانبی.

Fig. 13. RVE produced to study the effect of carbide bands in transverse plane

شروع و رشد ترک می‌باشند. هرچقدر تجمع این ذرات بیشتر باشد، پهنای نوار کوچکتر باشد و یا تعداد نوارهای تشکیل شده بیشتر باشد، سطح تنش در ماده بالاتر رفته و از حالت ایده‌آل با توزیع تصادفی سمانتیت‌ها فاصله بیشتری می‌گیرد. از دیدگاه کارسختی، معمولاً نمونه‌هایی که تجمع ذرات بیشتری در این نوارها داشته باشند، تغییر شکل یکنواخت کمتری خواهند داشت که به شدت شکل‌پذیری ورق را تحت تاثیر قرار می‌دهد. کاهش شکل‌پذیری نیز

برای بررسی این عیب ساختاری رفتار نمونه مدل سازی شده‌ای که در آن ذرات سمانتیت بطور کاملاً تصادفی توزیع شده‌اند با نمونه‌ای که در شکل ۱۳- (۱) نمایش داده شده‌است و حدود ۵۰ درصد ذرات در صفحه جانبی در یک نوار با پهنای ۸ میکرومتر تجمع یافته‌اند، مقایسه شده‌است. همانطور که در شکل ۱۳- (۲) نشان داده‌است، تنش در نواحی نوار تشکیل شده از ذرات سمانتیت بطور موضعی به شدت بالا رفته و و این صفحات مکانی برای



شکل ۱۴. بررسی نتایج رفتار ماده در حالتی که ذرات به صورت موضعی در بخشی از صفحات جانبی تجمع یافته باشند.

Fig. 14. Investigation of the effect of carbide bands transverse plane

داده شد روش فوق قابلیت بسیار بالایی در مدل سازی رفتار ماده منطبق با نتایج تجربی دارد.

- به بررسی تاثیر برخی از ویژگی های ریزساختار از جمله درصد فاز سخت سمانتیت و بافت زمینه فریتی در رفتار فولاد فوق پرداخته شد و نشان داده شد که درصد فاز سخت سمانتیت در میزان تنش ها و تغییر خواص ماده بسیار موثر است و با افزایش این فاز میزان تنش ها بطور قابل ملاحظه ای در ماده افزایش می یابد.

- تجمع ذرات سمانتیت در صفحات جانبی عمود بر راستای نورد نیز به عنوان یک عیب ساختاری رایج که به شدت بطور موضعی میزان شکل پذیری ورق را تحت تاثیر قرار می دهد مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد این تجمع ذرات باعث افزایش تمرکز تنش بطور موضعی در ماده می شود و بدین ترتیب سرعت رشد و بهم پیوستن حفره ها بیشتر شده و آسیب زودتر آغاز خواهد شد و تغییر شکل یکنواخت کمتری خواهیم داشت.

به این ترتیب با استفاده از این روش مدل سازی می توان به بررسی تاثیر ویژگی های مختلف در رفتار فولاد کرومی شده و با طراحی یک فولاد با رفتار دلخواه پرداخت. همچنین می توان با استفاده از این روش به بررسی عیوب مختلف به طور موضعی در ورق و تاثیر آنها در شکل پذیری ورق پرداخت.

به علت تجمع نابعایی ها و افزایش تمرکز تنش در این منطقه می باشد. در شکل ۱۴ رفتار ورقی سالم با توزیع ایده آل ذرات سمانتیت به صورت کاملا تصادفی در کل نمونه با حالتی که در یک صفحه جانبی از نمونه یک نوار از ذرات سمانتیت با پهنای مشخص تشکیل شده است، مقایسه شده است. همانطور که توضیح داده شد، سطح تنش در نمونه معیوب بسیار بالاتر است.

۵- جمع بندی

- در این پژوهش فولاد با ذرات سمانتیت کروی به صورت سه بعدی با در نظر گرفتن ویژگی های مختلف ریزساختار شبیه سازی شد. برای بررسی رفتار فاز فریت از روش پلاستیسیته کریستالی استفاده شد و ذرات سخت سمانتیت به صورت الاستیک با خواص مشخص در نظر گرفته شدند.

- برای مدل سازی ساختار میکروسکوپی این فولاد و تهیه یک المان حجمی نماینده مناسب، یک نرم افزار مدل سازی با قابلیت در نظر گرفتن متغیرهای مختلف فولاد کروی از جمله اندازه و درصد ذرات، چگونگی توزیع ذرات و در نظر گرفتن تاثیر بافت طراحی شد.

- مدل شبیه سازی شده با استفاده از نرم افزار آباکوس و زیر برنامه هوانگ تحلیل شد و نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی ذکر شده در سایر مقالات مقایسه شده و متغیرهای سخت شونده آن کالیبره شدند و نشان

- elastic composites: a numerical study, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(9) (1997) 1449-1459.
- [10] J. Tyrus, M. Gosz, E. DeSantiago, A local finite element implementation for imposing periodic boundary conditions on composite micromechanical models, *International Journal of Solids and Structures*, 44(9) (2007) 2972-2989.
- [11] Y. Yan, L. Geng, A. Li, Experimental and numerical studies of the effect of particle size on the deformation behavior of the metal matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, 448(1-2) (2007) 315-325.
- [12] H. Qing, 2D micromechanical analysis of SiC/Al metal matrix composites under tensile, shear and combined tensile/shear loads, *Materials & Design*, 51 (2013) 438-447.
- [13] X. Zhuang, S. Ma, Z. Zhao, A microstructure-based macro-micro multi-scale fine-blanking simulation of ferrite-cementite steels, *International Journal of Mechanical Sciences*, 128 (2017) 414-427.
- [14] O. Amelirad, A. Assempour, Experimental and crystal plasticity evaluation of grain size effect on formability of austenitic stainless steel sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, 47 (2019) 310-323.
- [15] C. Zheng, L. Li, Y. Wang, W. Yang, Z. Sun, Micromechanical behavior of eutectoid steel quantified by an analytical model calibrated by in situ synchrotron-based X-ray diffraction, *Materials Science and Engineering: A*, 631 (2015) 181-188.
- [16] R.J. Asaro, *Crystal plasticity*, (1983).
- [17] J.W. Hutchinson, Bounds and self-consistent estimates for creep of polycrystalline materials, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 348(1652) (1976) 101-127.
- [18] D. Peirce, R.J. Asaro, A. Needleman, Material rate dependence and localized deformation in crystalline solids, *Acta metallurgica*, 31(12) (1983) 1951-1976.
- [1] G. Krauss, *Steels: processing, structure, and performance*, Asm International, 2015.
- [2] L. Anand, S. Kalidindi, The process of shear band formation in plane strain compression of fcc metals: effects of crystallographic texture, *Mechanics of Materials*, 17(2-3) (1994) 223-243.
- [3] X. You, T. Connolley, P. McHugh, H. Cuddy, C. Motz, A combined experimental and computational study of deformation in grains of biomedical grade 316LVM stainless steel, *Acta materialia*, 54(18) (2006) 4825-4840.
- [4] J. Kadkhodapour, A. Butz, S. Ziaei-Rad, S. Schmauder, A micro mechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model, *International Journal of Plasticity*, 27(7) (2011) 1103-1125.
- [5] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, D. Jeulin, Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach, *International Journal of solids and structures*, 40(13-14) (2003) 3647-3679.
- [6] A. Ramazani, K. Mukherjee, A. Schwedt, P. Goravanchi, U. Prah, W. Bleck, Quantification of the effect of transformation-induced geometrically necessary dislocations on the flow-curve modelling of dual-phase steels, *International Journal of Plasticity*, 43 (2013) 128-152.
- [7] G. Laschet, P. Fayek, T. Henke, H. Quade, U. Prah, Derivation of anisotropic flow curves of ferrite-pearlite pipeline steel via a two-level homogenisation scheme, *Materials Science and Engineering: A*, 566 (2013) 143-156.
- [8] W. Drugan, J. Willis, A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(4) (1996) 497-524.
- [9] A.A. Gusev, Representative volume element size for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Einolghozati, A. Assempour, Effect of microstructure features on the mechanical properties of spheroidized steel by crystal plasticity method, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 4079-4094.

DOI: 10.22060/mej.2021.19214.6976



