Archive of SID

استخراج عددی نمودار حد شکل‌دهی فولاد ۳۰٤ بر اساس تغییر فاز در فرایند کشش عمیق

مسعودنصر اصفهانی [۱] مهران مرادی [۲،*] فرهاد حاجی ابوطالبی [۳]

* نویسنده مسئول: moradi@cc.iut.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم برای مدل‌سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS است. برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی استخراج شده‌اند. برای این منظور، ابتدا پارامترهای نمودار FLD به‌طور عملی از آزمون اریکسن برای فولاد زنگ نزن نیمه‌پایدار آستنیتی۳۰۴ استخراج شده است. با یک روش جدید، رفتار تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت این فولاد در حین شکل‌دهی کشش عمیق توسط نرم‌افزارهای CLEMEX و SIGMAPLOT مدل شده است و نتایج آن با تعریف تغییرات خواص مکانیکی و فیزیکی ماده الاستیک-پلاستیک با برنامه‌نویسی به زبان فورترن توسط زیربرنامه VUMAT به نرم‌افزار ABAQUS انتقال می‌یابد. سپس آزمون اریکسن در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی گردیده و از زیربرنامه ذکرشده جهت تعریف تغییرات خواص در شبیه‌سازی استفاده شده است. نقاط مستعد به گلویی شدن موضعی، برای تمام نمونه‌ها شناسایی شده و نمودار FLD عددی بر اساس کرنش‌های اصلی در این نقاط ترسیم شده است، در پایان، نتایج حاصل از این روش و پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش عملی روی نمودار FLD مقایسه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: مکانیک آسیب، حد شکل‌دهی، آزمون اریکسن، تغییر فاز ، فرایند کشش عمیق، گلویی شدن، شبیه‌سازی اجزای محدود.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد،گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آسیب[۱] در حقیقت به‌وجود آمدن نقص در وضعیت داخلی قطعه قبل از شکست است. قبل از پیشنهاد مدل مکانیک آسیب، قرن‌های متوالی شکست قطعات عموماً ناشی از بار و تنش بحرانی و یا زیاد بودن تعداد سیکل کاری شناخته می‌شد. تاکنون راهکارهای تئوری زیادی جهت اندازه‌گیری یا مدل‌کردن آسیب ارائه شده است.

باید در نظر داشت که تفاوت‌هایی بین پلاستیسیته و آسیب وجود دارد. از جمله این‌که جریان پلاستیک مواد به‌وسیله لغزش در سطح کریستالی یا مولکولی اتفاق می‌افتد ولی آسیب، تغییر مرز از سطح اتمی تا مقیاس بزرگتر برای شروع ترک است. در حقیقت تجمع مناطق آسیب و نقص، باعث به‌وجود آمدن ترک یا حفره می‌شوند. تشخیص و تعیین آسیب قبل از شکست مسئله مهمی است، زیرا به کمک آن می‌توان قبل از تخریب تجهیزات از وقوع شکست جلوگیری کرده یا آن‌را پیش‌بینی کرد. پالمگرین، ماینر و روبینسون اولین کسانی بودند که تحقیق‌هایی در زمینه آسیب انجام دادند[۱]. کاچانوف[۲] اولین مطلب راجع به مفهوم ترمودینامیکی آسیب را عنوان کرد. آسیب به دو نوع ترد و نرم تقسیم می‌شود[۱]. منظور از آسیب در این مقاله، آسیب نرم (همراه با کرنش پلاستیک) است. اندازه‌گیری آسیب تا به حال به روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است:

- اندازه‌گیری مستقیم
- اندازه‌گیری آسیب براساس تغییر مدول الاستیسیته
- اندازه‌گیری آسیب براساس انتشار امواج آلتراسونیک
- اندازه‌گیری آسیب براساس تغییر ریزسختی
- اندازه‌گیری تغییر چگالی و مقاومت الکتریکی[۲-۳]

همچنین مدل‌های ریاضی مختلفی مانند معیار آسیب نرم، جانسون کوک، آسیب برشی، نمودار حدشکل‌دهی (FLD)، مدل مارسینیاک-کوچینسکی، نمودار تنش حدشکل‌دهی و نمودار کرنش معادل حد شکل‌دهی برای محاسبه آسیب توسط محققین پیشنهاد شده است[۳-۵]. در نرم‌افزار ABAQUS امکان استفاده از این مدل‌ها فراهم شده است، اما برای استخراج پارامترهای مربوط به هر یک از آنها به آزمایش‌های پرهزینه‌ای احتیاج است. یکی از معیارهای ذکرشده، معیار FLD است. این معیار توسط کیلر[۳] به منظور معین کردن محدوده فرم‌دهی یک ماده قبل از وقوع آسیب یا گلویی شدن[۴] مطرح شد. این مدل شامل نموداری است که محورهای آن کرنش‌های لگاریتمی اصلی بوده و منحنی V شکل این نمودار مرز بین ناحیه‌ی شکل‌دهی ایمن و شکست یا پارگی را مشخص می‌کند [۶-۸]. این نمودار برای شکل‌دهی ورق‌ها خصوصاً در فرایند کشش عمیق کاربرد فراوان دارد. گروهی از فولادهای زنگ‌نزن و بسیار شکل‌پذیر در صنعت، فولادهای گروه ۳۰۰ هستند. هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از خود نرم‌افزار است ولی برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی نیز استخراج شده‌اند. این روش روی فولاد ۳۰۴ و با شرایط پیچیده‌تر، از جمله تغییر فاز و خواص در حین شکل‌دهی بسط داده شده است. روشی جهت بیان رفتار تغییر فازی (از آستنیت به مارتنزیت[۵]) فولاد زنگ نزن نیمه‌پایدار آستنیتی ۳۰۴ در حین فرایند کشش عمیق ارائه گردیده که با نوشتن یک زیربرنامه به زبان فورترن در تحلیل‌های نرم‌افزار ABAQUS، جهت انجام شبیه‌سازی آزمون اریکسن دخالت داده می‌شود. در نهایت نمودار FLD حاصل از شبیه‌سازی عددی، با نمودار FLD حاصل از آزمایش عملی مقایسه می‌شود. به‌طور کلی فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای پایه آهنی هستند که دارای عنصر کروم با درصد وزنی بالای ۱۰٫۵٪ هستند. گروه‌های مختلفی از فولاد زنگ نزن وجود دارد [۹]. یکی از این گروه‌ها، فولادهای زنگ نزن آستنیتی گروه ۳۰۰ است که به کِرِس‌های[۶] گروه ۳۰۰ معروف هستند. این گروه مقاومت به خوردگی و چقرمگی بالایی دارند و رایج‌ترین نوع فولادهای زنگ نزن هستند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی قابلیت شکل‌پذیری خوبی دارند و استحکام آن‌ها در دماهای بالا نیز حفظ می‌شود. به دلیل نیمه‌پایدار بودن فاز آستنیت، با

۱- Damage

۲- L. M. Kachnov

۳- Keeler

۴- Necking

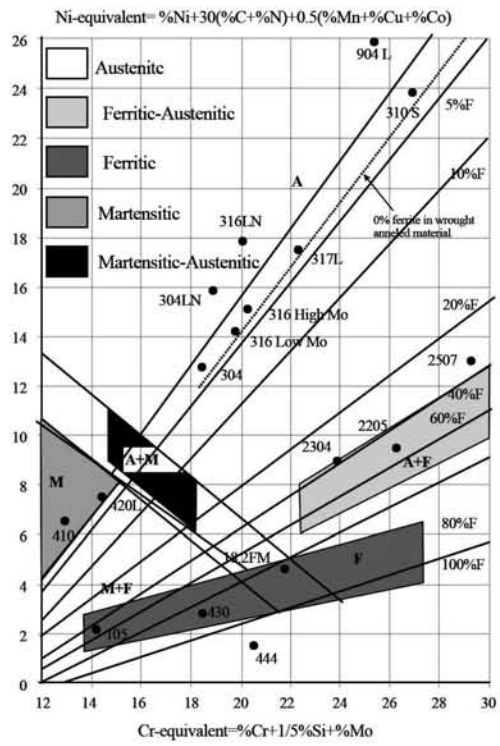
۵- Austenite-Martensite

۶- Cress (Corrosion resistance steel)

www.SID.ir

Archive of SID

انجام کارسختی بر روی این فولادها، براساس درصد عناصر آلیاژی و ترکیب شیمیایی آن‌ها، درصدی از ساختار به مارتنزیت تبدیل گردیده و مارتنزیت به‌وجودآمده در حین شکل‌دهی این گروه فولاد تأثیر زیادی در رفتار کششی آن‌ها به‌وجود می‌آورد [۱۰-۱۱]. یکی از ابزارهای رایج برای پیش‌بینی ساختار از روی ترکیب شیمیایی این فولادها، نمودار اسچادلر-دلونگ مطابق شکل(۱) است [۱۲].



شکل(۱) نمودار اسچادلر - دلونگ [۱۲].

بر اساس این نمودار برای به‌دست آوردن ساختار آستنیتی به درصد بالایی از نیکل نیاز است که در فولادهای گروه ۳۰۰ این مورد قابل مشاهده است[۱۳]. در این نمودار فولادهای آستنیتی کم‌آلیاژ در سمت چپ و در پایین قابل مشاهده‌اند. بنابراین آن‌ها نزدیک به ناحیه تشکیل مارتنزیت بوده و فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی سخت‌تر و مستحکم‌تر از فولادهای آستنیتی‌اند. از طرف دیگر این انتقال فاز با کارسختی همراه است که مقاومت به گلویی شدن[۱] را بیشتر و تغییر شکل پلاستیک یکنواخت‌تر و ایمن‌تر را بهبود می‌بخشد. در این مقاله یکی از فولادهای این گروه با نام فولاد ۳۰۴L یا ۱۸۸ مورد بررسی قرار گرفته که خود شامل سه زیر گروه است. خواص مکانیکی این سه گروه در شرایط بازپخت[۲] و در دمای اتاق براساس استاندارد ASTM A۲۴۰ در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) خواص مکانیکی سه گروه فولاد ۳۰۴ [۱۰].

خصوصیت	خواص مکانیکی بر اساس ASTM A۲۴۰		
	۳۰۴H	۳۰۴L	۳۰۴
استحکام تسلیم (MPa)	۲۰۵	۱۷۰	۲۰۵
استحکام کششی (MPa)	۵۱۵	۴۸۵	۵۱۵
درصد ازدیاد طول در ۵۱ میلیمتر	۴۰	۴۰	۴۰
بیشینه سختی(برینل)	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱
چگالی (kg/m^3)		۸۰۳۰	
مدول الاستیسیته (MPa)		۱۹۳۰۰۰	

برخی از کاربردهای این فولاد در صنایع هوایی، کشتی‌سازی، لوازم بیمارستانی، خودروسازی، ساخت قالب، تجهیزات قابل جوشکاری، مبدل‌ها و لوله‌کشی است.

یکی از دلایل بهینه شدن خواص مکانیکی فولاد نیمه‌پایدار آستنیتی پس از کارسرد[۳] (ناشی از به‌وجود آمدن مارتنزیت)، مقاوم بودن مارتنزیت نسبت به ایجاد حفره‌ها یا عیوبی است که تحت فرایند شکل‌دهی به‌وجود می‌آیند. لازم به ذکر است این حفره‌ها و عیوب در فرایند کشش عمیق باعث ایجاد شکاف و پارگی می‌شوند. تاکنون تحقیق‌های زیادی در مورد رابطه میان میزان کرنش و درصد مارتنزیت به‌وجود آمده، انجام شده است. اکثر این تحقیق‌ها براساس پیدا کردن رابطه‌ای میان درصد مارتنزیت و کرنش در دو بعد (غیر از ضخامت) و یا کرنش مؤثر صورت گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق‌ها روابطی ریاضی بوده که حتی بعضی از مواقع با نتایج عملی تناقض داشته است.

۱- Necking

۲- Anneal

۳- Cold working

www.SID.ir

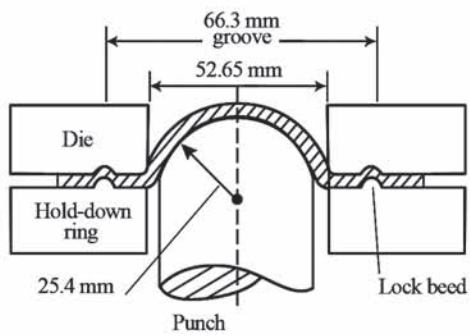
Archive of SID

در نهایت آندرسون و همکاران [۱۳] تحقیق‌هایی روی رابطه میان کرنش ضخامتی و درصد مارتنزیت انجام دادند که نتایج حاصل از این تحقیق‌ها بسیار به نتایج عملی نزدیک است.

۲- جزئیات آزمایش‌ها

نمونه‌های لازم برای انجام آزمون عملی کشش اریکسن[۱] بر اساس استاندارد DIN 50155 ، ۹ قطعه ورق با طول ثابت ۱۱۵ *mm* وعرض‌های ۱۲، ۲۴، ۳۶،....و ۱۰۸ *mm* می‌باشد.

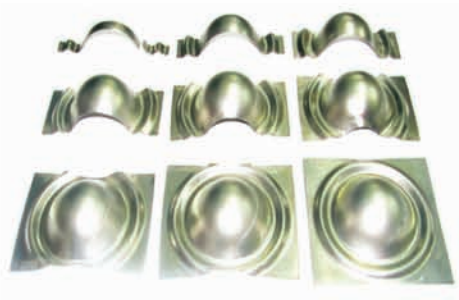
قالب آزمون اریکسن دارای سه قسمت اصلی ماتریس، سنبه‌ی نیم کروی و ورق‌گیر است که در شکل(۲) نمای برش خورده‌ی این قالب نشان داده شده است.



شکل (۲) ابعاد و سنبه(ساچمه)، ماتریس و ورق‌گیر[۱۲].

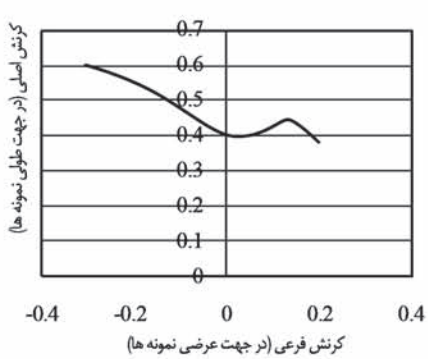
لازم به‌ذکر است که براساس استاندارد مذکور قبل از انجام هر آزمایش، ساچمه (سنبه) کاملاً به روغن مخصوص (تفلون) جهت روانکاری آغشته شده و سطوح درگیری ورق و ورق‌گیر کاملاً بدون لغزندگی و روانکار می‌باشند. همچنین سطح تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه الکترومارک[۲] (به‌صورت شبکه‌های دایره‌ای شکل به قطر ۲/۵ *mm*) با استفاده از خاصیت خوردگی حکاکی شده است.

پس از قرار گرفتن نمونه روی دستگاه و بسته شدن گیره مربوط به ورق‌گیر، سنبه‌ی دستگاه با سرعت تنظیم شده، از سمت پایین به بالا حرکت کرده و بر روی نمونه اعمال کشش می‌کند. این کشش تا جایی ادامه می‌یابد که مطابق شکل(۳) اولین آثار گلویی‌شدگی موضعی روی نمونه مشاهده شود. در این لحظه براساس میزان حساسیت دستگاه نسبت به تشخیص پدیده‌ی گلویی‌شدگی ورق، سرعت کشش و تأخیر زمانی تنظیم شده بر روی دستگاه، حرکت سنبه متوقف می‌شود. نمونه‌های حاصل از آزمون اریکسن روی فولاد ۳۰۴ در شکل(۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) نمونه‌های تغییر شکل یافته پس از انجام آزمایش اریکسن.

پس از انجام این آزمون بر روی تمام نمونه‌ها، میزان کرنش اعمال شده در هر نقطه از سطح هر نمونه، در فاصله‌ی یک دایره حول موضع گلویی شده یا ترک، با توجه به قطر اولیه‌ی دایره و قطرهای کوچک و بزرگ بیضی (هر یک از دایره‌ها پس از شکل دهی به بیضی تبدیل می‌شوند) با خط‌کش مخصوص میلر[۳] اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. نمودار FLD به‌دست آمده از این آزمون عملی در شکل(۴) نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده کرنش در جهت قطر فرعی بیضی‌ها و محور عمودی نشان دهنده‌ی کرنش در جهت قطر اصلی آن‌ها می‌باشد. (منظور از بیضی‌ها، بیضی‌های حول نقاط باریک‌شدگی موضعی روی هر نمونه است)



شکل (۴) نمودار FLD به‌دست آمده از آزمایش عملی.

۱- Erichsen

۲- Electromark

۳- Miler

www.SID.ir

Archive of SID

۳- متالوگرافی[۱] نمونه‌های حاصل از آزمایش کشش

در این مرحله نمونه‌های آزمایش عملی FLD از وسط بریده می‌شوند. دلیل برش این است که کرنش در وسط عرض، بیش از دو لبه‌ی مجاور بوده و برای انجام محاسبه‌های بعدی قابل اعتمادتر است.

پس از برش، یکی از دو نوار به‌دست آمده از هر نمونه انتخاب و در جهت طولی به تکه‌هایی به طول mm ۱۰ تقسیم می‌شود. در شکل(۵) نحوه‌ی تقسیم وبرش نمونه به‌همراه لبه مورد استفاده جهت متالوگرافی، نشان داده شده است.

شکل (۵) نحوه‌ی تقسیم وبرش نمونه.

در مرحله بعد، تکه‌های بریده شده جهت تهیه مانت[۲] قالب‌گیری شده‌اند. برای جلوگیری از باز پخت، این کار به روش مانت سرد انجام شده است. شکل (۶) حالت قرارگیری تکه‌های نمونه در مانت شفاف را جهت بررسی ساختار در ضخامت ورق نشان می‌دهد.

شکل (۶) حالت قرار گیری تکه‌های نمونه در مانت شفاف.

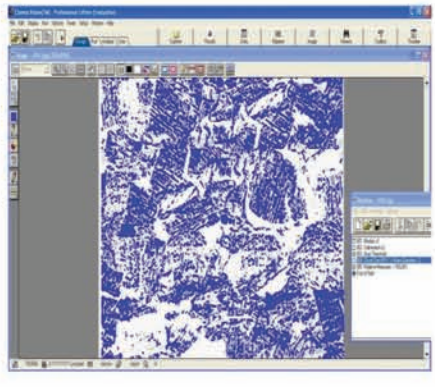
لازم به‌ذکر است، در این تحقیق از محلول اچ[۳] شیمیایی با ترکیب ($۵۰ml\ H_2O$, ۱۰ ml HCl, ۰/۱۵ gr $K_2S_2O_5$) استفاده شده است[۱۴].

مشاهده‌های ساختاری این نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus Bx۶۰m انجام شده است. شکل(۷) ساختار متالوگرافی ضخامت ورق را برای کرنش ضخامتی ۰/۳۲۲ نشان می‌دهد. در این شکل مناطق سفیدرنگ، فاز آستنیت پایه و مناطق تیره‌تر، فاز مارتنزیت است.

شکل (۷) ساختار متالوگرافی ضخامت ورق در کرنش ضخامتی ۰/۳۲۲.

٤- تفکیک ریزساختار نمونه‌ها

در این تحقیق، روش تحلیل عکس میکروساختار، برای تفکیک درصد فازهای آستنیت و مارتنزیت به‌کار رفته است. در این راستا از نرم‌افزار CLEMEX استفاده شده که یکی از نرم‌افزارهای کاربردی در مهندسی متالورژی[۴] است و قابلیت تشخیص و اندازه‌گیری دانه‌ها، فازها، تفکیک ساختار را بر روی عکس میکروساختار و ... دارد. نحوه انجام کار و تحلیل و همچنین خروجی‌های مورد نیاز با استفاده از تنظیم‌های موجود در جعبه‌ابزار[۵] نرم‌افزار مشخص می‌شوند. با تنظیم حساسیت و دقت نرم‌افزار در تشخیص هر فاز، تحلیل بر روی هر تصویر انجام می‌شود. به طور مثال، فاز مارتنزیت تشخیص داده شده از تصویر ریزساختار یک نمونه با کرنش ضخامتی ۰/۳۹۷ به‌صورت شکل (۸) است.



شکل (۸) فاز مارتنزیت تشخیص داده شده از تصویر ریز ساختار.

۱- Metallographic
۲- Mount
۳- Etch
۴- Metallurgy
۵- Toolbox

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج مربوط به درصد فاز مارتنزیت، برای هر تصویر ریزساختار (در یک کرنش ضخامتی معین) در جدول(۲) ارائه شده است.

جدول (۲) درصد مارتنزیت تولیدشده در هر کرنش ضخامتی.

آزمایش	کرنش ضخامتی	درصدمارتنزیت
آزمایش۱	۰/۱۴۵	۲/۹
آزمایش ۲	./۲۲۳	۷/۴
آزمایش ۳	./۲۶۱	۱۱/۱
آزمایش ۴	./۳۲۲	۱۴/۷
آزمایش ۵	./۳۵۸	۱۷/۸
آزمایش ۶	./۳۹۷	۲۰/۸
آزمایش ۷	./۴۳۱	۲۶/۷
آزمایش ۸	./۴۹۲	۳۷/۷
آزمایش ۹	./۵۶۹	۴۵/۶
آزمایش ۱۰	./۶۰۳	۴۸
آزمایش ۱۱	./۶۳۴	۴۹/۷

آندرسون و همکاران [۱۳] فرمول تئوری زیر را برای پیش‌بینی درصد مارتنزیت، بر اساس کرنش ضخامتی برای کرس‌های گروه ۳۰۰ پیشنهاد داده‌اند:

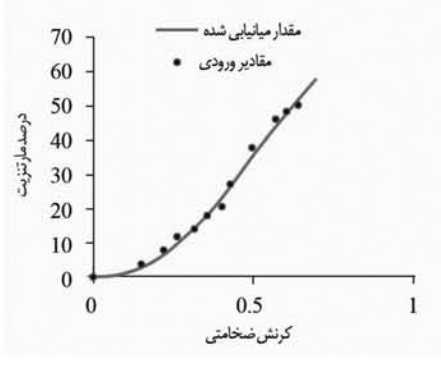
$$W_t\%(martensite)=\frac{a}{1+[\frac{\varepsilon\ thickness}{M_\circ}]^{b}} \qquad (1)$$

که $W_t\%$ (martensite) درصد مارتنزیت به‌وجودآمده و a، b و $M_\circ$ ثابت‌هایی هستند که باید مشخص شوند.

نرم‌افزار SIGMAPLOT از جمله ابزارهای مورد استفاده مهندسین است که برای میان‌یابی وترسیم نمودارها و تخمین معادله‌های هم‌پوشانی داده‌ها استفاده می‌شود. این نرم‌افزار در حل مسائل از روش رگرسیون[۱] استفاده کرده که رابطه‌ی میان مقادیر وابسته و غیروابسته را در سیستم مختصات کارتزین برای هم‌پوشانی داده‌های ورودی مشخص می‌کند. روش هم‌پوشانی داده‌ها در این نرم‌افزار، روش کمترین مربعات[۲] است که هدف آن کمینه شدن مجموع مربعات اختلاف میان مقادیر میان‌یابی شده توسط نرم‌افزار و داده‌های اولیه است[۱۵].

$$Min\sum_{i=1}^{n}Wi(y_i-\hat{y}_i)^{2} \qquad (2)$$

y_i داده‌ی اولیه و $\hat{y}_i$ مقدار میان‌یابی شده توسط نرم‌افزار است. جهت به‌دست آوردن ضرایب ثابت معادله (۱)، مقادیر مندرج در جدول (۲) به‌صورت مقادیرورودی به نرم‌افزار SIGMAPLOT داده شده و با تعریف معادله (۱) به عنوان شکل کلی معادله‌ی مورد نظر و انجام تحلیل، مقدار ثابت‌های a، b و $M_\circ$ به ترتیب برابر ۱۰۵/۶، ۲/۵۶۲- و ۰/۶۴۷۸ به‌دست آمده‌اند. امکان بررسی خطا در این نرم‌افزار نیز تعریف شده است. بررسی خطا و همچنین مقایسه منحنی ترسیم شده از معادله به‌دست آمده با مقادیر ورودی مطابق شکل (۹)، حاکی از هم‌پوشانی مناسب داده‌های خروجی با مقادیر ورودی است.



شکل(۹) مقایسه‌ی منحنی معادله به‌دست آمده با مقادیر ورودی.

۵- جزئیات زیربرنامه

اکنون بایستی به‌گونه‌ای مدول الاستیسیته، چگالی و روابط تنش کرنش پلاستیک، بر اساس تغییر فاز فولاد تعریف شوند. به این‌منظور از یک زیربرنامه از نوع Vumat برای تعریف معادله‌های صریح[۳] همسان‌گرد[۴] الاستیک- پلاستیک استفاده شده است. در این معادله‌ها، تغییرات تنش بر اساس نمو کرنش به‌صورت روابط (۳) و (۴) تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\Delta\sigma_{ij}=\lambda^{*}\delta_{ij}\Delta\varepsilon_{kk}+2\mu^{*}\Delta\varepsilon_{ij}+(\frac{\overline{\sigma}^{pr}-\sigma_y}{3\mu+h}) \qquad (3)$$

۱- Regression
۲- Least square
۳- Explicit
۴- Isotropic

www.SID.ir

Archive of SID

که:

$$h=\frac{d\sigma_y}{d\bar{\varepsilon}^{pl}},\ \mu^*=\frac{\mu(\sigma_y+h\Delta\bar{\varepsilon}^{pl})}{\bar{\sigma}^{pr}},\ \lambda^*=k-\frac{۲}{۳}\mu^* \quad (۴)$$

h ضریب کارسختی، σ_y تنش تسلیم، $\bar{\sigma}^{pr}$ تنش مؤثر فون‌میزز، k مدول حجمی، μ ضریب لامه، $\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$ نمو کرنش مؤثر پلاستیک، $\Delta\varepsilon$ نمو کرنش و $\Delta\sigma$ نمو تنش هستند.

با به‌کارگیری زیربرنامه‌ی مذکور، محاسبه‌های مربوط به تنش، کرنش، چگالی، ضریب ارتجاعی و کرنش سختی از اختیار نرم‌افزار ABAQUS خارج و معادله‌های تعریف شده در زیربرنامه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر لحظه مدول الاستیسیته و چگالی بر اساس میزان مارتنزیت تشکیل شده(وابسته به میزان کرنش در راستای ضخامت ورق)، مطابق مجموعه معادله‌های (۵) و(۶)تغییر می‌کنند:

$$e_{total}=e_{au}*(۱-(wt/۱۰۰))+e_m*(wt/۱۰۰) \quad (۵)$$

$$d_{total}=d_{au}*(۱-(wt/۱۰۰))+d_m*(wt/۱۰۰) \quad (۶)$$

e_{total} مقدار مدول الاستیسیته و d_{total} چگالی جدید در هر نقطه از ورق است که مقادیر آن‌ها وابسته به درصد مارتنزیت $(w_t/۱۰۰)$ و درصد آستنیت $((w_t/۱۰۰)-۱)$ است (درصد مارتنزیت از رابطه (۱) به‌دست می‌آید). e_{au} و e_m به ترتیب مدول یانگ آستنیت و مارتنزیت، و d_{au} و d_m نیز به‌ترتیب چگالی آستنیت و مارتنزیت‌اند.

بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت که ناشی از عملیات شکل‌دهی است، تغییر چندانی در ضریب پواسون ندارد[۱۷].

ساختار مارتنزیت، مکعبی مرکزپر (bcc[۱]) و ساختار آستنیت مکعبی مرکز وجه‌پر (fcc[۲]) بوده، بنابراین چگالی bcc، ۰/۹۶۴ برابر چگالی fcc است[۱۸]. در این‌صورت، چگالی مارتنزیت برابر است با:

$$\rho_m=۰/۹۶۴^*۸۰۳۰=۷۷۴۳\ kg/m^۳ \quad (۷)$$

در زیربرنامه، بر اساس تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت، مقادیر تنش، کرنش، چگالی، ضریب ارتجاعی، کرنش سختی و ... در روابط انرژی و تنش- کرنش(رابطه(۳))، تغییر یافته و به روزرسانی می‌شوند.

برای استخراج مدول الاستیسیته فاز مارتنزیت، بر اساس استاندارد آزمون کشش(ASTM E۸)، یک نمونه تحت دو مرحله آزمون کشش قرار گرفته و بر اساس اختلاف در مدول الاستیسیته این دو مرحله، مدول الاستیسیته فاز مارتنزیت محاسبه شده است.

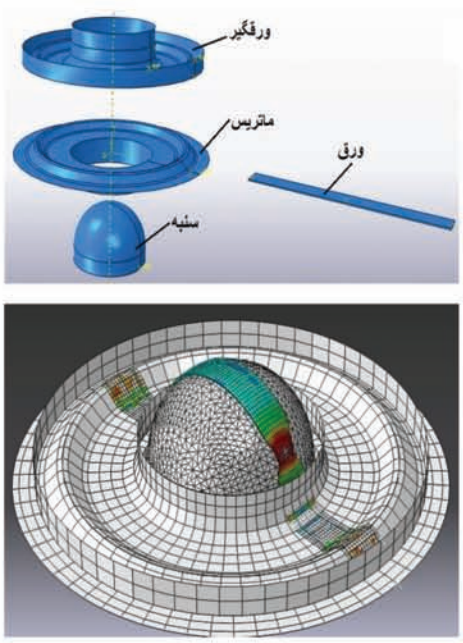
۶- جزئیات مدل‌سازی اجزای محدود

قالب مورد استفاده در آزمون اریکسن در نرم‌افزار ABAQUS به‌طور کامل مدل شده و مانند یک آزمون عملی، برای ۹ نمونه با عرض‌های مختلف، شبیه‌سازی آزمون اریکسن انجام می‌گیرد. در هر شبیه‌سازی، فرایند کشش نمونه در طی دو مرحله انجام می‌شود:

۱- گرفتن ورق بین ماتریس و ورق‌گیر ۲- اعمال کشش روی ورق توسط سنبه ساچمه‌ای (کروی).

برای اعمال تغییرات خواص ماده ناشی از تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت در محدوده شکل‌دهی پلاستیک، از رفتار تنش-کرنش در این محدوده استفاده شده است که قبلاً براساس استاندارد ASTM E۸ در آزمون کشش تک‌محوری ورق تعیین شده است. لازم به‌ذکر است که در فرایند کشش ساده نیز مانند سایر روش‌های شکل‌دهی، تغییر فاز در ماده به‌وجود می‌آید.

شکل(۱۰) اجزای قالب را در دو حالت باز و بسته نشان می‌دهد. تمامی اجزای قالب به‌صورت پوسته‌ای وصلب مجزا[۳] و ورق به‌صورت شکل‌پذیر تعریف شده است.



شکل(۱۰) اجزای قالب در دو حالت قالب باز و بسته.

۱- Body centered cubic

۲- Face centered cubic

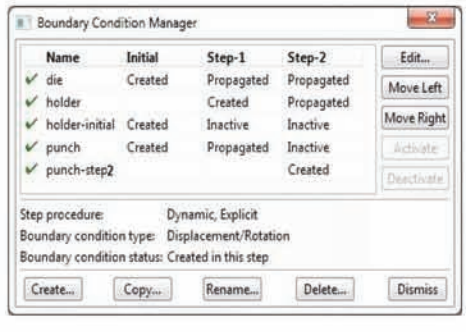
۳- Discrete rigid

www.SID.ir

Archive of SID

هر دو مرحله تحلیل از نوع تحلیل صریح تعریف شده‌اند. شرایط تماسی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که بر اساس شکل‌های (۹) و (۱۰)، با قرار گرفتن ورق بین ورق‌گیر و ماتریس، یک تماس بین ورق‌گیر و سطح بالایی ورق و تماسی دیگر بین ماتریس و سطح زیرین ورق با ضریب اصطکاک ۰/۰۷ تعریف شده است. همچنین تماس بین سطح زیرین ورق وسنبه با ضریب اصطکاک ۰/۰۳ (به دلیل استفاده از روانکار) در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی مطابق شکل(۱۱) به گونه‌ای تعریف شده که ماتریس در تمام مراحل هیچ‌گونه درجه آزادی ندارد. همچنین ورق‌گیر در مرحله (۱) به‌طرف پایین حرکت نموده و روی ورق قرار می‌گیرد و نیروی (۲۰۰-) کیلوگرم نیرو (به‌طرف پایین) را تا پایان کار به آن وارد می‌کند. در مرحله دوم، سنبه که درجات آزادی آن از ابتدای کار تا به این‌جا کاملا بسته بوده اکنون به طرف بالا (+y) حرکت کرده و شکل‌دهی انجام می‌شود.

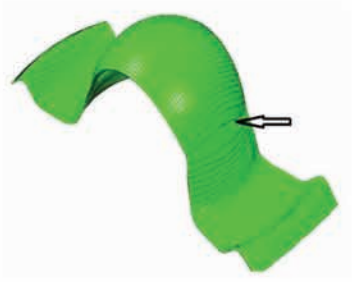


شکل(۱۱) تعریف کلی شرایط مرزی .

دانه‌بندی ورق با المان‌های شش‌گوشه با اندازه‌ی ۰/۶ میلی‌متر و نوع صریح انتخاب شده و برای دانه‌بندی اجزای قالب از نوع المان صلب مجزا و صریح استفاده گردیده است.

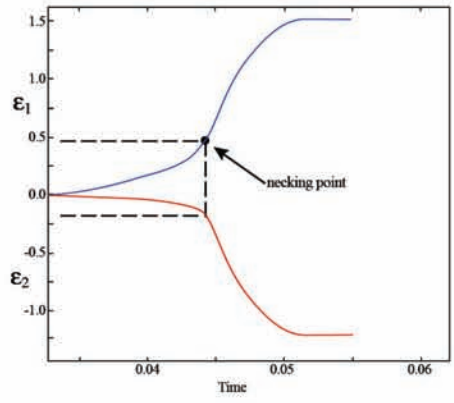
۷- بررسی نتایج

معیار اصلی در انتخاب کرنش‌های مورد نیاز در آزمون عملی اریکسن جهت ترسیم نمودار حد شکل‌دهی، وقوع پدیده‌ی گلویی‌شدن موضعی در اولین ناحیه روی هر نمونه است. در شبیه‌سازی نمونه‌ها، با بررسی مرحله‌به‌مرحله حرکت سنبه، پس از اعمال کشش می‌توان اولین ناحیه‌ای از یک المان که پدیده گلویی‌شدن موضعی رخ می‌دهد را مشخص کرد، شکل (۱۲) را ببینید.



شکل(۱۲) تشخیص اولین نقطه‌ی گلویی‌شدن موضعی.

بر این اساس، مطابق شکل(۱۳)، با استفاده از کرنش‌های اصلی در دو جهت، نمودار تلفیقی کرنش- زمان برای هریک از نقاط مستعد به گلویی شدن استخراج شده‌اند. از این نمودار، کرنش‌های اصلی (ε_1 , ε_2) در لحظه شروع ازدیاد شیب نمودار کرنش- زمان (لحظه‌ی شروع گلویی شدن) برای ترسیم نمودار FLD به‌دست آمده‌اند. این شیوه برای تمام نمونه‌ها در شبیه‌سازی‌ها انجام شده که نتایج آن به‌صورت داده‌های جدول (۳) است.



شکل (۱۳) نمودار تلفیقی کرنش- زمان.

جدول (۳) کرنش‌های اصلی وفرعی به‌دست آمده از روش عددی برای ۹ نمونه.

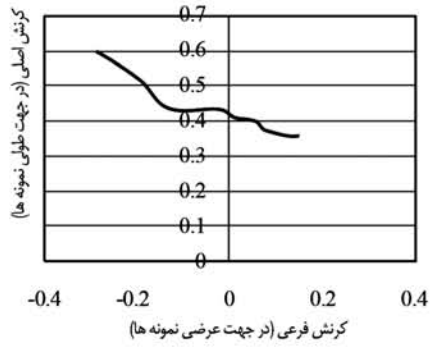
نمونه	ε_2	ε_1
نمونه۱	-۰/۴	۰/۶
نمونه ۲	-۰/۲	۰/۵۲
نمونه ۳	-۰/۲	۰/۴۴
نمونه ۴	۰	۰/۴۴
نمونه ۵	/۰۲۰	۰/۴۱
نمونه ۶	۰/۰۷	۰/۴
نمونه ۷	۰/۰۹	۰/۳۸
نمونه ۸	۰/۱۶	۰/۳۶
نمونه ۹	۰/۲	۰/۴

www.SID.ir

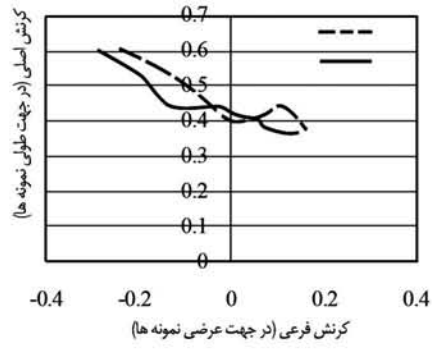
Archive of SID

چنانچه اطلاعات موجود در جدول(۳) روی نمودار ترسیم شود، می‌توان به نمودار FLD که حاصل روش عددی است دست یافت، شکل(۱۴) را ببینید.

در شکل(۱۵) دو نمودار FLD به‌دست آمده از آزمایش‌های عملی و روش عددی مقایسه شده‌اند.



شکل(۱۴) نمودار FLD استخراج شده به روش عددی.



شکل(۱۵) مقایسه‌ی نمودار FLD به‌دست آمده از آزمایش عملی و روش عددی.

اختلاف بین نمودارهای FLD به روش عددی و تجربی را می‌توان عمدتاً ناشی از دو عامل دانست. اولین عامل خطای محاسبه و اندازه‌گیری درصد مارتنزیت تشکیل شده و عامل دوم نحوه‌ی تشخیص گلویی شدن موضعی در روش‌های عددی و تجربی است. در شبیه‌سازی، این امر به شکل گرافیکی صورت گرفته و به محض شروع این پدیده در هر نقطه می‌توان آن را تشخیص داد ولی تشخیص گلویی شدن موضعی در روش آزمون اریکسن وابسته به سنسور حساس به سرعت حرکت سنبه است. پس از پاره شدن قسمتی از ورق، دستگاه متوقف شده و عمدتاً همراه با تاخیر زمانی است، در حالی که در روش عددی به محض وقوع گلویی‌شدن موضعی می‌توان ε_2 ، ε_1 را به‌عنوان کرنش‌های یک نقطه از نمودار FLD به دست آورد. به همین دلیل معمولاً ε_1 به‌دست آمده از روش عددی کوچکتر از ε_1 روش تجربی برای هر نمونه است.

۸- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار است، ولی برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی نیز استخراج شده‌اند. این روش روی یکی از فولادهای گروه ۳۰۰، با خاصیت تغییر فاز و خواص در حین شکل‌دهی بسط داده شده است و استفاده از آن‌را حتی در شرایط پیچیده و با تغییرات خواص ماده‌ی اولیه در حین شکل‌دهی تضمین می‌کند. همچنین روش پیشنهادی در مورد تغییر رفتار فولاد می‌تواند به عنوان یک مدل کلی برای فرموله نمودن رفتار فولادهای گروه ۳۰۰ در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی این فولادها به‌کار برده شود.

بر اساس نمودار هم‌پوشانی داده‌ها، رابطه‌ی میان درصد کارسرد روی ورق و میزان مارتنزیت تولید شده در فولادهای آستنیتی نیمه‌پایدار، با روش‌های عددی و نرم‌افزاری ارائه شده در این مقاله، با دقت بسیار بالایی امکان‌پذیر است. همچنین استخراج نمودار FLD به روش عددی براساس نمودارهای کرنش- زمان، حتی تحت شرایط تغییر فاز و با اعمال زیربرنامه مربوط به تغییرات خواص و معادله‌های مربوطه، امکان‌پذیر است. بنابراین به دلیل رشد آسیب در فرایندهای شکل‌دهی و هزینه زیاد آزمایش‌های عملی، می‌توان از روش‌های عددی برای پیش‌بینی آسیب استفاده کرد.

فهرست علائم

درصد مارتنزیت	$Wt\,\%\,(martensite)\,(m)$
ثابت‌ها	$M_\circ, a, b$
مدول الاستیسیته	E
نمو زمان	ΔT
ضریب کارسختی	h
تنش تسلیم	σ_y
تنش مؤثر فون‌میزز	$\overline{\sigma}^{pr}$

www.SID.ir

Archive of SID

مدول حجمی	k
ضریب لامه	μ
نمو کرنش مؤثر پلاستیک	$\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$
نمو کرنش	$\Delta\varepsilon$
نموتنش	$\Delta\sigma$
مدول یانگ الاستیک کلی	$te(E_{Total})$
چگالی کلی	d_{total}
چگالی آستنیت	d_{au}
چگالی مارتنزیت	d_m
مدول الاستیسیته الاستیک فاز مارتنزیت	e_m
مدول الاستیسیته الاستیک آستنیت	e_{au}
تابع وزنی	Wi
مقدار اصلی متغیر وابسته	y_i
مقدار متغیر وابسته پیش‌بینی شده	$\hat{y}_i$
کرنش ضخامتی	$\varepsilon_{thickness}$
کرنش در جهت اصلی	ε_1
کرنش در جهت اصلی دوم	ε_2
ضریب پواسون الاستیک	υ
چگالی مارتنزیت	ρ_m

مراجع

[۱] حاجی ابوطالبی، ف. ، پیش‌بینی رشد آسیب در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه دکترا، ۱۳۸۹.

[2] Lemaitre J., A course on damage mechanics, Verlag, New York,1992,

[3] Kattan P.I., Voyiadjis G. Z., Damage mechanics with finite elements, Springer-Verlag, Berlin, 2001.

[4] Trana E. ,Buguru M.,Zecheru T., *Johnson-cook constitutive model for OL 37 Steel*,6th WSEAS International Conference on System Science and Simulation In Engineering , Italy, Vol. 2, 2007, pp. 269-274.

[5] Solta J., Spisak E., Comprision of the Forming-Limit Diagram(FLD)Models for Drawing Quality(DQ)Steel Sheets, *J.Metalurgija*,No.44,2005,PP.249-253

[6] Waleed J., Anas A., Balod O., Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel, Brass and Aluminum Alloy Sheets, *J.Mechanic Eng.* , No.14, 2006, pp.40-55.

[7] Mater J., Calculation of Forming Limit Diagrams for Changing Strain Paths on the Formability of Sheet Metal, *J.Technol* ,No.1,Vol 17,2001.

[8] Stoilov G., Genov J. , Kovachev J., Kavardzhikov V., *a software system for determination of forming limit diagram* , Seventh International Conference on Information Research and Applications, Varna, Vol. 7, 2009, pp. 45-52.

[9] Blandford ,K., Rahl , E., Morton , K.and Snow , D., tensile stress-strain results for 304L and 316L stainless steel,Pressure Vessels and Piping Division Conference ,San Antonio , (208), 2007,pp. 526-541.

[10] Milad M., Zreiba N., Elhalouan F., Baradai C., The Effect of Cold Work on Structure and Properties of AISI 304 Stainless Steel, *J. Materials Processing Technology*, No.44, 2008, pp. 80–85.

[11] Ding B., Wu Y., Cao B., Hmida S., Xie J., Martensite Transformation Induced by Deformation and its Phas Eletrochemichal Behavior for Stainless Steels AISI 304 and 316L, *J.University of Science and Technilogy Beijing*,Vol 9, 2002, pp. 437.

[12] Hedstrm P., Lindgren L. E., *Deformation and martensitic phase transformation in stainless steels*, University of Technology SE-971 87 Lule, Sweden, 2007.

[13] Andersson R., Oden M., Magnusson C., *A new equation to describe the microstructural transformation of meta-stable austenitic stainless steels during plastic deformation*, Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering , 2009.

[14] Beese A.M., Mohr D., Santacreu P., *Isotropic phase transformation in anisotropic stainless steel 301LN sheets*, Department of Mechanical Engineering, Cambridge MA, USA, 2009.

www.SID.ir

Archive of SID

[15] www.alfabib.com/filter/sigmaplot11usersguid .pdf.

[16] www.imechanica.org/files/writing

[17] Talonen J., *Effect of strain-induced α'-martensite transformation on mechanical properties of metastable austenitic stainless steels*, Helsinki University of Technology, 2007.

[۱۸] گلعذار م.، اصول کاربرد عملیات حرارتی فولادها، ویرایش ۲، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸، صص ۵-۲۸.

www.SID.ir