

بررسی و مقایسه‌ی نحوه‌ی توزیع کرنش در ورق‌های ضخیم فولادی میکروآلیاژی و ساده‌کربنی

فرید انوشه‌پور (کارشناس)

محمود عباسی (کارشناس)

مصطفی کتابچی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سیدحسین حسینی (کارشناس ارشد)

حمید رحمانی (کارشناس ارشد)

مرکز تحقیقات مواد شرکت سایکو

با توجه به فراگیر شدن مصرف فولادهای میکروآلیاژی و جایگزینی فولادهای ساده‌کربنی توسط این گروه از فولادها، مقایسه‌ی شکل‌پذیری این نوع فولادها اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. یکی از روش‌های مقایسه‌ی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی نحوه‌ی توزیع کرنش در ورق پس از عملیات شکل‌دهی است. برای تهیه‌ی نمونه از ۵ نوع ورق استفاده شده است (یک نوع ورق از خانواده فولادهای میکروآلیاژی تولید داخل، دو نمونه ورق فولادی میکروآلیاژی خارجی و دو نمونه ورق فولادی ساده‌کربنی). همچنین در این تحقیق اثر حضور روان‌ساز در بهبود شکل‌پذیری مورد بررسی قرار گرفته است. از ویژگی‌های این تحقیق ضخامت نسبتاً زیاد ورق‌های مورد مطالعه است که این عامل تاکنون کم‌تر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

مقدمه

یکنواخت‌تر توزیع شده باشد قابلیت شکل‌پذیری ورق هم بیشتر خواهد بود. توزیع ناهمگن کرنش در ورق موجب موضعی شدن کرنش در مناطقی از ورق می‌شود، و با تجاوز از کرنش‌های حادی در این مناطق پدیده‌های گردنه‌یی شدن و شکست آغاز می‌شود. بنابراین بررسی چگونگی توزیع کرنش و عوامل موثر بر آن می‌تواند معیاری برای مقایسه‌ی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی باشد.

با توسعه‌ی روزافزون صنایع ساخت و تولید، فرایندهای شکل‌دهی فلزات هم پیشرفت‌های شایان‌ذکری یافته و وسیعاً مورد مطالعه قرار گرفته است. اولین تلاش‌ها در زمینه‌ی ارزیابی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی و به‌دست آوردن نمودارهای حد شکل‌پذیری (FLD) در اوایل دهه‌ی ۶۰ صورت گرفت.^[۱]

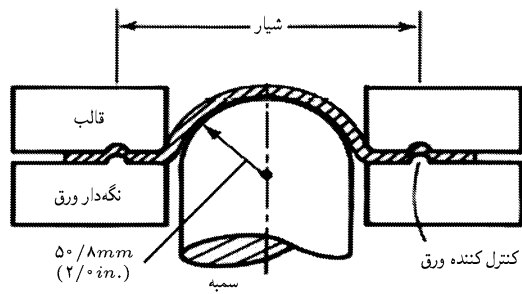
در این تحقیق شکل‌پذیری ورق‌های ضخیم (در حدود ۳ mm) مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات انجام گرفته بر روی ورق‌هایی با این ضخامت بسیار محدودتر از مطالعات انجام شده بر روی ورق‌های با ضخامت کم است، که از جمله‌ی این معدود تحقیق‌ها می‌توان به مقاله‌ی Padamanhan و Date^[۲] اشاره کرد.

در ادامه‌ی فعالیت‌های محققان قبلی در اواخر دهه‌ی ۶۰ روشی ارائه شد^[۳] که تا امروز هم اکثر محققان از آن برای بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی استفاده می‌کنند. از جمله کارهای اخیر می‌توان به تحقیقات صورت گرفته براساس به‌کارگیری روش‌های عددی همراه با همان نظریه‌های قبلی،^[۴] اشاره کرد.

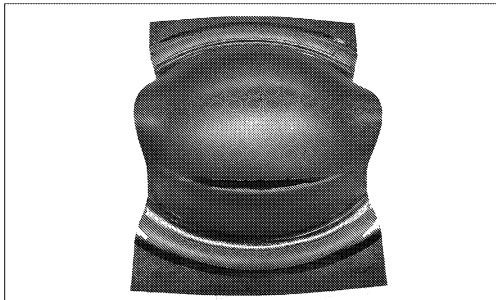
بحث تولید ورق‌های میکروآلیاژی به‌خصوص در دهه‌ی اخیر مطرح شده است، ورق‌های میکروآلیاژی جایگاه ویژه‌یی، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، به خود اختصاص داده‌اند. استفاده از این ورق‌ها با استحکام بالاتر، امکان به‌کارگیری ورق‌های نازک‌تر را به جای ورق‌های ضخیم‌تر فولادهای ساده‌کربنی فراهم می‌سازد. علت این امر بالاتر بودن خواص مکانیکی فولادهای میکروآلیاژی در مقایسه با فولادهای ساده‌کربنی است. با فراگیر شدن کاربرد این نوع ورق‌ها در خودرو، وزن خودرو سبک‌تر شده و باعث کاهش مصرف سوخت و همچنین

در فرایندهای شکل‌دهی، ورق تاجایی می‌تواند تغییر شکل را تحمل کند که در آن باریک‌شدگی^۱ و در نتیجه شکست رخ ندهد. بنابراین برای بررسی شکل‌پذیری یک ورق ابتدا باید نسبت به تعیین کرنش‌های حادی که در آن، باریک‌شدگی در ورق شروع می‌شود اقدام شود. در این تحقیق از میان روش‌های موجود برای تعیین کرنش‌های حادی، روش Hecker^۲ مورد استفاده قرار گرفته است.

یکی از عوامل‌های مؤثر در افزایش شکل‌پذیری ورق چگونگی توزیع کرنش در ورق طی فرایند شکل‌دهی است. هر چه کرنش اعمالی



شکل ۱. تصویری شماتیک از قالب، شامل قالب، ورق‌گیر و سنجه و چگونگی قرار گرفتن ورق درون قالب.



شکل ۲. نمایش تبدیل دایره‌های حک شده روی نمونه به بیضی پس از انجام آزمایش (نمونه ورق با عرض ۱۰۰mm).

جنس سنجه و ماتریس قالب از فولاد سردکار^۳ است. پس از انجام آزمایش، شکل دایره‌های حک شده روی نمونه تغییر شکل یافته و متناسب با منطقه‌ی که در آن قرار دارند به بیضی یا دایره‌ی بزرگتر تبدیل می‌شوند یا به همان اندازه‌ی قبلی باقی می‌مانند (شکل ۲).

بعد از آنکه تمامی نمونه‌ها در دو حالت خشک و روان‌کاری شده مورد آزمایش قرار گرفتند، ارتفاع گنبد و قطرهای اصلی و فرعی دایره تبدیل شده به بیضی، روی خطی که از مرکز نمونه و در امتداد طولی آن می‌گذرد، به دقت اندازه‌گیری و کرنش‌های مهندسی مربوطه نیز محاسبه شد. از این داده‌ها برای رسم نمودارهای توزیع کرنش، استفاده خواهد شد.

$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \text{ : کرنش فرعی}$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \text{ : کرنش اصلی}$$

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق‌های فولادی.

نام فولاد	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N _۲
BiA	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۷۵۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰۵	۰٫۰۳۴	۰٫۰۳۷	۳۳Ppm
C	۰٫۰۶	۰٫۱۳۰	۰٫۵۲۰	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۵۶	۰٫۰۴۸	۴۸Ppm
D	۰٫۱۵	۰٫۲	۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۶	۰٫۰۴	—	—
E	۰٫۰۹	۰٫۰۱۵	۰٫۴۵	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۸	۰٫۰۵	—	—

کاهش هزینه‌ی تولید خودرو می‌شود. به همین سبب، بررسی خواص شکل‌پذیری فولادهای میکروآلیاژی از این نظر از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

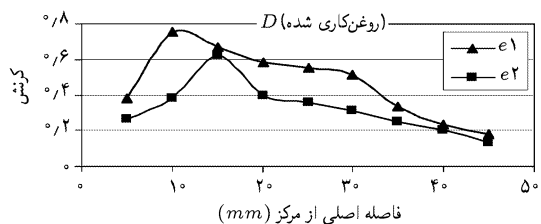
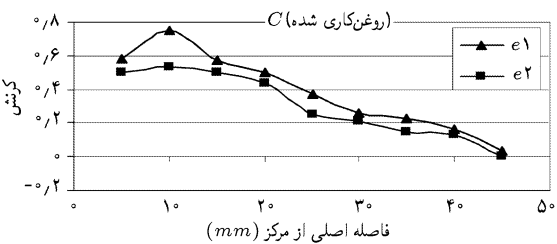
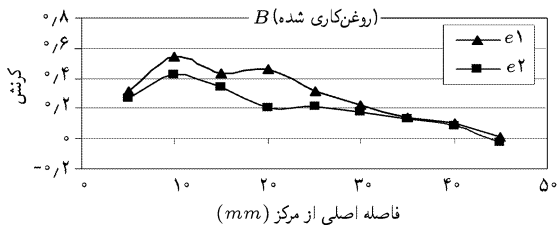
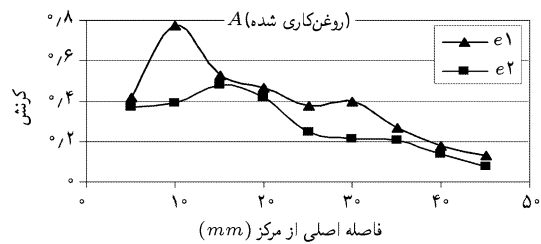
آنچه که در این نوشتار ارائه شده، تحقیقی است برای مقایسه‌ی قابلیت شکل‌پذیری ۵ نمونه ورق فولادی (فولاد میکروآلیاژی داخلی، دو نمونه از فولاد میکرو آلیاژی خارجی و دو نمونه از فولاد ساده کربنی)، براساس نحوه‌ی توزیع کرنش در نمونه‌های تهیه شده از این فولادها و همچنین براساس اندازه‌ی ارتفاع گنبد^۲ که در همین نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق همچنین تأثیر ضخامت و شرایط روغن‌کاری در آزمایش‌ها مورد نظر قرار گرفته است.

روش تحقیق و آزمایش

همانطور که پیش‌تر اشاره شده، در تحقیق حاضر بررسی و مقایسه‌ی شکل‌پذیری پنج نوع ورق فولاد مورد نظر قرار گرفته است: فولاد میکروآلیاژی خارجی در دو ضخامت ۳ و ۲٫۵ میلی‌متر که به ترتیب با حروف A و B نام‌گذاری شده است، فولاد میکروآلیاژی داخلی با ضخامت ۳ میلی‌متر که با حرف C نشان داده شده است و فولاد ساده‌کربنی در دو ضخامت ۳٫۳ و ۲٫۶ میلی‌متر که به ترتیب با D و E نام‌گذاری شده‌اند. ترکیب شیمیایی فولادهای فوق در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انجام تحقیق، ابتدا تعدادی ورق به ابعاد $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ برای هریک از فولادهای مورد نظر تهیه شد. سپس بر روی هریک از این نمونه‌ها، با استفاده از چاپ سیلک دایره‌ی به قطر ۲٫۵ میلی‌متر حک شده، که فاصله‌ی مرکز تا مرکز هر دایره با دایره اطراف ۵ میلی‌متر است. در این روش چاپ، ابتدا طرح دایره مورد نظر بر روی شابلون مخصوص منتقل، و سپس عملیات رنگ‌آمیزی نمونه‌ها انجام می‌شود. در پایان مرحله‌ی پخت رنگ به منظور ثبوت طرح در دمای کم صورت می‌گیرد. سپس ورق‌های فوق را در عرض‌های ۱۰، ۱۲٫۵، ۱۵، ۱۷٫۵ و ۲۰ سانتی‌متر برش داده و به منظور بررسی توزیع کرنش و ارتفاع گنبد آزمایش می‌کنند.

برای انجام آزمایش، از عملیات اتساع از نوع «آزمون ارتفاع گنبد» استفاده شد که نقشه‌ی قالب و سنجه‌ی آن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۴. نمودار توزیع کرنش در نمونه‌های عرض 200mm روانکاری شده.

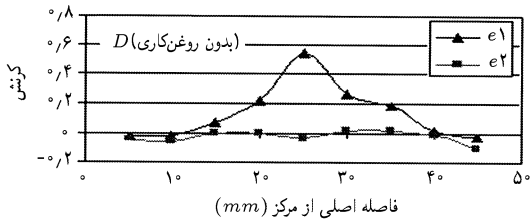
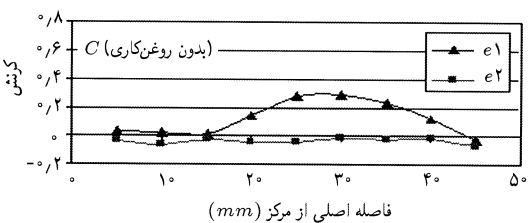
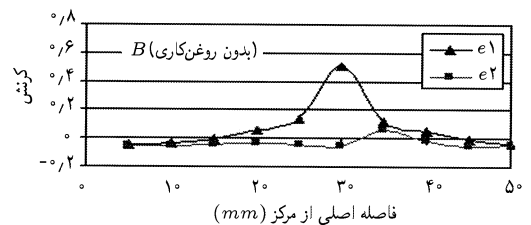
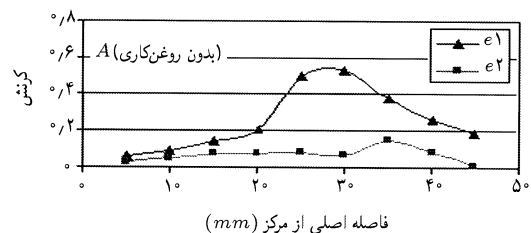
این منحنی‌ها پارامترهایی نظیر نحوه‌ی تغییرات e_1 و e_2 ، تأثیر شرایط روغن کاری، تأثیر جنس نمونه، موقعیت محل گلوبی و ارتفاع گنبد مطرح است که در ادامه، این عوامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در نگاه اول به منحنی‌های توزیع کرنش نکته‌یی که به نظر می‌رسد هماهنگی بین نمودارهای توزیع کرنش e_1 و e_2 است، که نقاط نهایی هر دو منحنی در یک منطقه از ورق اتفاق افتاده است. علت آن است که توقف روند افزایشی کرنش e_1 به دلیل آغاز وضعیت گردنه‌یی شدن موضعی^۱، از ادامه‌ی تغییرات در کرنش e_2 هم ممانعت می‌کند. لذا در ورق‌های با عرض‌های 20 ، $17/5$ و 15 سانتی‌متر که تغییر شکل در آنها از نوع اتساع دوماحوری $e_2 \geq e_1$ است منحنی‌های e_1 و e_2 تقریباً رفتار یکسانی دارند؛ یعنی به‌طور یکنواخت افزایش و کاهش می‌یابند (شکل‌های ۷ و ۸ برای عرض‌های $17/5$ و 20 سانتی‌متر). در ورق‌های به‌عرض $12/5$ و 10 سانتی‌متر که تقریباً وضعیت کشش تک‌محوری ($e_1 > 0$ ، $e_2 < 0$) یا بیشینه کرنش صفحه‌یی ($e_1 > 0$)،

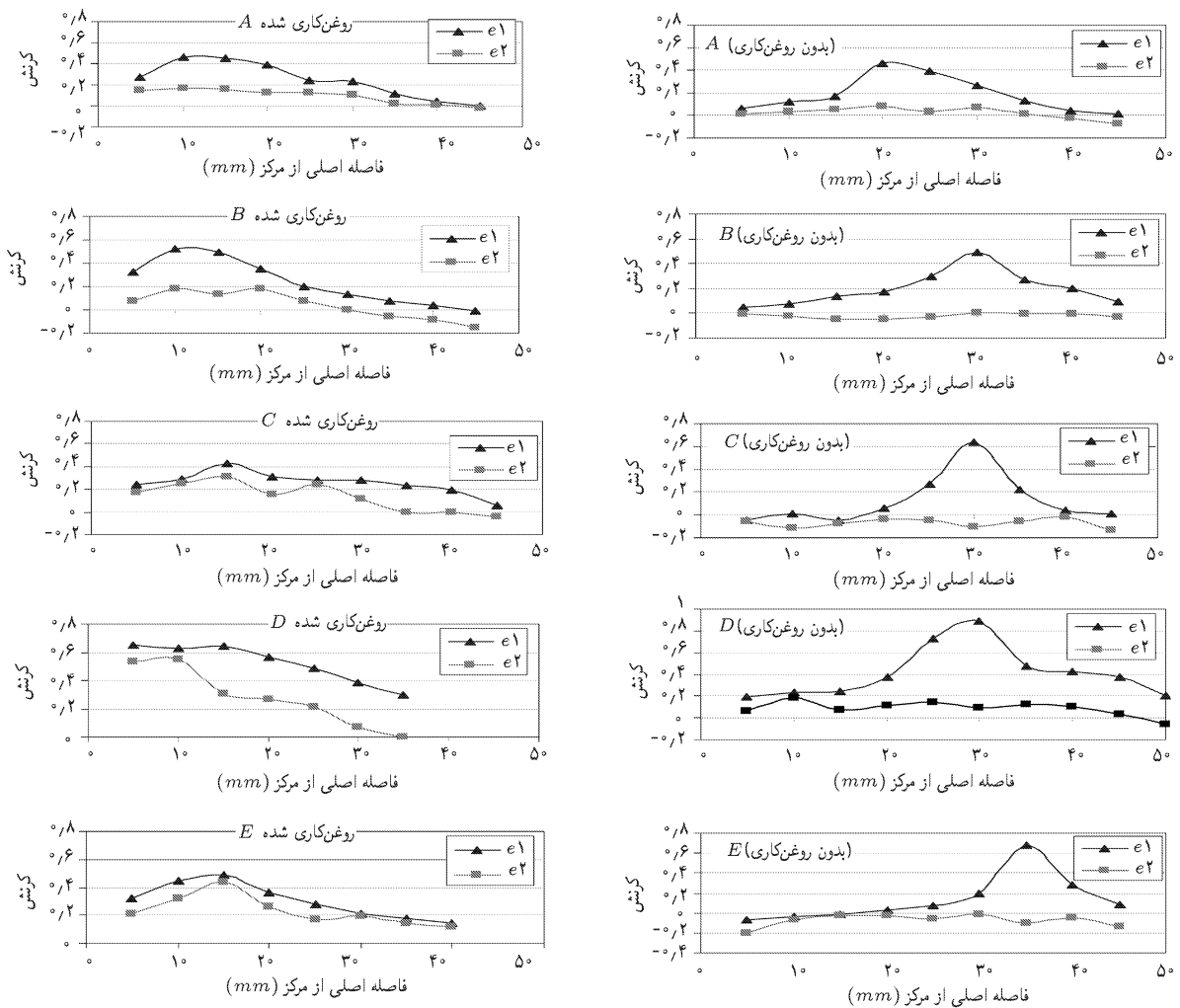
که در آن d قطر نخستین دایره‌ی اولیه، و d_1 و d_2 قطر بزرگ و قطر کوچک بیضی نهایی هستند. لازم به ذکر است که سرعت اعمال نیرو در هنگام انجام آزمایش $15 \frac{mm}{sec}$ در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

محاسبه‌ی کرنش‌های اصلی و فرعی به‌دست آمده در امتداد خط طولی نمونه از مرکز تا کناره طبق روابط فوق (برحسب فاصله از رأس گنبد نمونه) منحنی‌های توزیع کرنش را نتیجه می‌دهد. در شکل‌های ۳ و ۴ منحنی‌های توزیع کرنش نمونه‌های A، B، C، D، E برای عرض 20 سانتی‌متر در دو وضعیت روانکاری شده و بدون روانکاری ترسیم شده است. در شکل ۵ و ۶ منحنی‌های توزیع کرنش این نمونه‌ها در عرض 17 سانتی‌متر رسم شده و در شکل ۷ و ۸ منحنی‌های توزیع کرنش نمونه‌ی C برای عرض‌های مختلف از 10 تا 20 سانتی‌متر در دو حالت خشک و روانکاری شده نشان داده شده است. در خصوص



شکل ۳. نمودار توزیع کرنش در نمونه‌های عرض 200mm بدون روانکار.



شکل ۶. نمودار توزیع کرنش در نمونه‌های عرض ۱۷۵mm روانکاری شده.

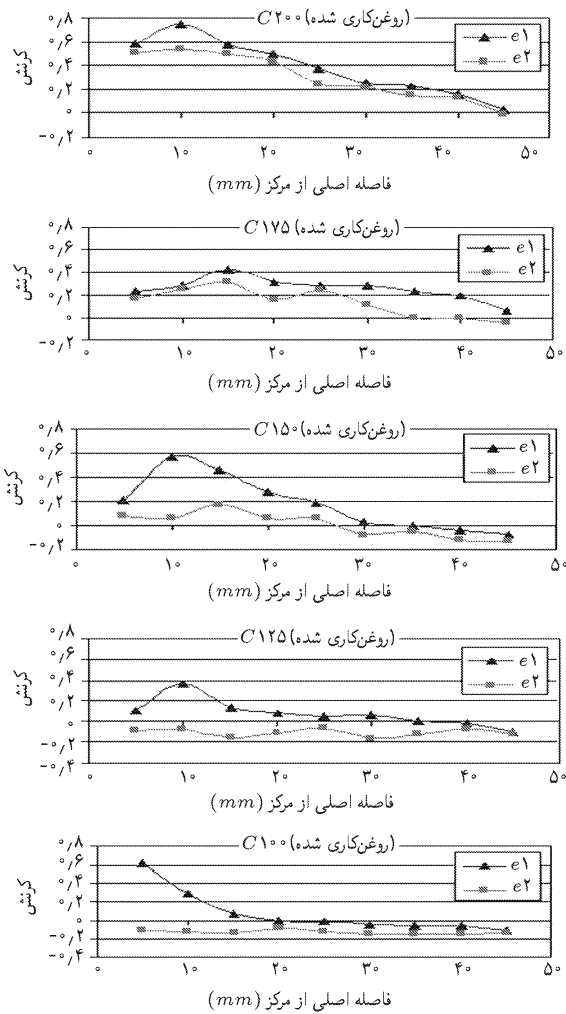
شکل ۵. نمودار توزیع کرنش در نمونه‌های عرض ۱۷۵mm بدون روانکار.

در حالت بدون روان‌ساز، در هر منطقه از ورق پس از تماس با سنبه، به دلیل ایجاد حالت اصطکاک چسبنده بین ورق و سنبه تغییر شکل طولی (روند افزایش کرنش‌های شعاعی) محدود می‌شود، و ادامه‌ی حرکت سنبه فقط با تحمیل تمامی تغییر شکل به سایر قسمت‌های ورق (که با سنبه در تماس نیستند) ممکن می‌شود. نتیجه‌ی این امر انتقال منطقه گردنه‌یی به دیواره‌های گنبد است که دیرتر با سنبه تماس پیدا می‌کنند. اما حضور روان‌ساز موجب کاهش اصطکاک و تداوم کرنش در تمامی مناطق ورق تا زمان شکست می‌شود. در نتیجه در چنین وضعیتی یک افزایش کلی در میزان کرنش‌های اصلی و همچنین حرکت منطقه‌ی گردنه‌یی به سمت رأس گنبد مشاهده می‌شود.^[۸]

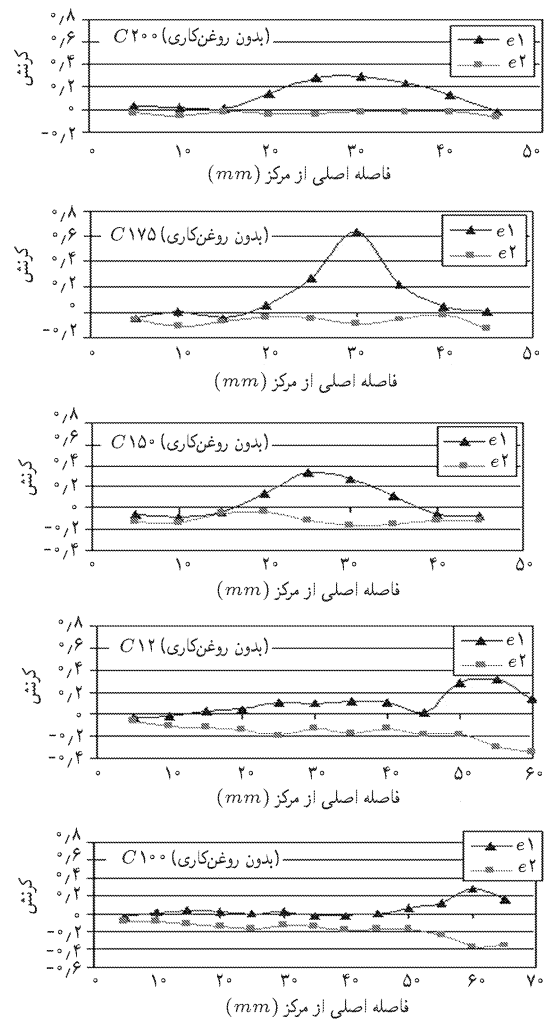
در مورد تأثیر جنس ورق بر منحنی‌های توزیع کرنش، بررسی شکل‌های ۵ و ۶ برای نمونه‌های B (فولاد میکروآلیاژی) و E (فولاد ساده‌کربنی)، که ضخامت‌های مشابه دارند نشان می‌دهد که در فولاد ساده‌کربنی توزیع کرنش یکنواخت‌تر فراهم شده، و مقدار کرنش بالاتری

در آنها حاکم است منحنی‌های e_1 و e_2 رفتار معکوس دارند (شکل‌های ۷ و ۸ در ورق‌های با عرض ۱۰ و ۱۲٫۵ سانتیمتر)؛ یعنی در محلی که کرنش e_1 به بیشینه‌ی مقدار خود رسیده کرنش e_2 حداقل مقدار ممکن را دارد.^[۷]

همچنین، چنان که از مقایسه‌ی شکل‌های ۳ با ۴ و ۵ با ۶ (نمودارهای توزیع کرنش در عرض‌های ۲۰ و ۱۷٫۵ در دو حالت خشک و روان‌کاری شده) و بررسی عرض به عرض شکل‌های ۷، ۸ (نمودار توزیع کرنش نمونه C در دو حالت خشک و روان‌کاری شده) مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که حضور روان‌ساز سبب توزیع یکنواخت‌تر کرنش و در نتیجه جلوگیری از موضعی شدن بیش از حد کرنش و از طرفی جابه‌جایی محل گردنه‌یی شدن از دیواره‌ی گنبد به سمت نوک آن می‌شود، که این تغییرات به معنای افزایش شکل‌پذیری است.^[۸] علت جابه‌جایی منطقه‌ی شکست در حالت روان‌کاری شده به سمت رأس گنبد را می‌توان چنین توجیه کرد که هنگام انجام آزمایش



شکل ۸. نمایش چگونگی تغییرات در توزیع کرنش با تغییر در عرض نمونه روانکاری شده.



شکل ۷. نمایش چگونگی تغییرات در توزیع کرنش با تغییر در عرض نمونه بدون روانکار.

جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه‌ها.

نمونه	U.T.S(MPa)	Y.S(MPa)	Elongation(%)
A	۴۷۲	۳۸۱	۳۵
B	۴۷۱	۳۵۶	۳۲
C	۴۵۹	۳۹۷	۳۲
D	۴۵۹	۳۰۶	۳۶
E	۳۸۹	۲۶۱	۳۸

شکل ۹ خلاصه شده است. با توجه به گفته‌های قبلی و ترکیب شیمیایی (جدول ۱) و خواص مکانیکی نمونه‌ها (جدول ۲) انتظار می‌رود که فولاد میکروآلیاژی شکل‌پذیری و در نتیجه ارتفاع گنبد شکست کم‌تری نسبت به فولاد ساده‌کربنی داشته باشد، که این موضوع را می‌توان در شکل ۹ الف و همچنین ۹ ب در مورد ورق‌های فولادی میکروآلیاژی B و ساده‌کربنی E مشاهده کرد. همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند که دو فولاد C و A که هر دو میکروآلیاژی، اما یکی خارجی و دیگری داخلی است، ارتفاع گنبد تقریباً یکسانی دارند.

تحلیل می‌شود که این دو نشانه‌ی قابلیت شکل‌پذیری بهتر آنها نسبت به ورق‌های فولادی میکروآلیاژی است. بررسی دو شکل ۵ و ۶ در مورد نمونه‌های میکروآلیاژی خارجی A و میکروآلیاژی تولید داخل C نشان می‌دهد که این دو فولاد از نظر چگونگی توزیع کرنش تفاوت قابل ملاحظه‌ی ندارند.

این مشاهدات با توجه به ترکیب شیمیایی این ورق‌ها (جدول ۱) قابل توجیه است؛ چرا که فولادهای میکروآلیاژی در بردارنده‌ی مقادیر جزئی از عناصر میکروآلیاژی از قبیل نیوبوم، تیتانیم، وانادیم و... هستند که حضور این عناصر سبب استحکام‌دهی این‌گونه فولادها و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری آنها نسبت به فولادهای ساده‌کربنی می‌شود.^[۸] در جدول ۲ نتایج ارائه شده‌ی حاصل از آزمون کشش این فولادها و خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده مؤید این مطلب است.

اندازه‌گیری ارتفاع گنبد نمونه‌های مختلف پس از انجام اتساع در

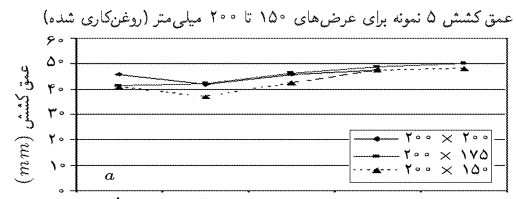
در مورد تغییر ارتفاع با تغییر عرض نیز باید گفت که در منحنی‌های حد شکل دهی (FLD) نقطه‌ی کمینه‌ی بی (FLD) وجود دارد که مربوط به کم‌ترین میزان کرنش اصلی، و به عبارتی نقطه‌ی بحرانی نمودار است، و به حالت تغییر شکل در وضعیت کرنش صفحه‌ای مربوط می‌شود. اگر عرض ورق‌ها تحت تغییر شکل، بیشتر از عرض حالت کرنش صفحه‌ی بی باشد، بر اثر کاهش عرض ارتفاع گنبد نیز کاهش می‌یابد. اما اگر عرض ورق‌ها کمتر از عرض حالت کرنش صفحه‌ی بی باشد، با کاهش عرض ارتفاع گنبد نیز افزایش می‌یابد. این موضوع تقریباً با آنچه در شکل ۹ ج، چه در حالت خشک و چه در حالت با روان‌ساز، دیده می‌شود مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

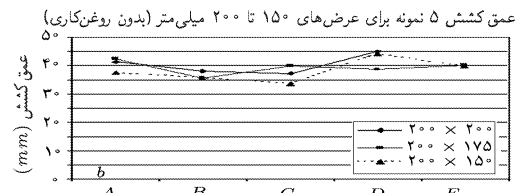
۱. ورق‌های ساده‌کربنی، از نظر یکنواختی توزیع کرنش و ارتفاع گنبد در نمونه‌های آزمایش اتساع از نوع «آزمایش ارتفاع گنبد» شکل‌پذیری بهتری نسبت به ورق‌های میکروآلیاژی از خود نشان می‌دهند.

۲. با توجه به نتایج به‌دست آمده و آنچه که بحث شد، چنین نتیجه می‌شود که بالاترین میزان شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌ی D و سپس نمونه‌های A و C، و بعد از این‌ها نمونه‌ی E و کم‌ترین میزان شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌ی B است.

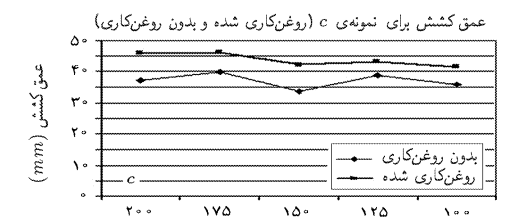
۳. تمامی نتایج حکایت از افزایش قابلیت شکل‌پذیری در صورت استفاده از مواد روان‌ساز دارد.



الف) با تغییر جنس و عرض نمونه در حالت روانکاری شده؛



ب) با تغییر جنس و عرض نمونه در حالت بدون روانکار؛



ج) تنها در نمونه ج در عرض‌های مختلف در دو حالت خشک و روانکاری شده.

شکل ۹. بررسی روند تغییرات در ارتفاع گنبد.

بررسی و مقایسه‌ی شکل‌های ۹ الف و ۹ ب (تفاوت در جنس ورق) و همچنین شکل ۹ ج (تفاوت در عرض ورق) نشان می‌دهد که حضور روان‌ساز سبب افزایش شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش ارتفاع گنبد می‌شود.

پانویس

1. necking
2. dome height
3. cold worked steel
۴. (local necking) موضعی شدن کرنش در منطقه گردنه‌ی بی، به دلیل محدود شدن کرنش ورق در مجاورت ناخالصی‌های پراکنده موجود در ورق، یا به دلیل تماس سنبه یا ورق می‌باشد.

منابع

1. Keeler, S.P. "Determination of forming limits in automotive stamping", *Sheet Metal Industries*, pp. 683-697 (1965).
2. Goodwin, G.M. "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop", *SAE Automotive engineering congress, Detroit*, 77, p. 680093 (1968).
3. Hecker, S. "Simple technique for determining forming limit curves", *Sheet Metal Industries*,

- pp. 671-676 (1975).
4. Avila, A.F. Vieira, E.L.S. "Proposing a better forming diagram prediction: a comparative study", *J. Material Processing Technology*, 141, pp. 101-108 (2003).
5. Butuc, M.C. "A more general model for forming limit diagrams prediction", *J. Material Processing Technology*, 125-126, pp. 213-218 (2002).
6. Date, P.P. & Padamanhan, K.A. "On the formability of 3.15 mm thick low-carbon steel sheets", *J. Material Processing Technology*, 35, pp. 165-181 (1992).
۷. ملاتی‌داریانی، بیژن. «ارائه روش تجربی به‌دست آوردن منحنی‌های FLD در شکل‌پذیری ورق‌های فولادی» چهارمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، صص. ۶۲۵-۶۳۴، شیراز (۱۳۷۵).
8. Keeler, S.P. "Die design and lubrication", *Sheet Metal Industries*, pp. 687-691 (1971).