دانشگاه شهید چمران اهواز
انجمن آهن و فولاد ایران
گروه ملی صنعتی فولاد ایران

سمپوزیوم فولاد ۸۷
۱۳و ۱۴ اسفند ماه ۸۷
اهواز - دانشگاه شهید چمران

تأثیر عملیات حرارتی بر شکل‌پذیری ورق گالوانیزه گرم

مهزاد آزاده[1]، محمدرضا طرقی‌نژاد[2]
۱ و ۲- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر شکل‌پذیری ورق گالوانیزه گرم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌هایی از ورق گالوانیزه با شرایط تولید، خواص مکانیکی و پوشش یکسان در محدوده دمایی ۵۸۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۱۸۰-۱۰ ثانیه، عملیات حرارتی شدند. به منظور ارزیابی رفتار شکل‌پذیری، از آزمون کشش تک‌محوری و رسم نمودارهای حد شکل‌دهی استفاده شد. توسط روش اچ الکتروشیمیایی، الگوهای دایره‌ای شکل روی ورق‌های گالوانیزه و نیز عملیات حرارتی‌شده در عرض‌های مختلف، اعمال گردید. سپس به وسیله سنبه نیمه‌کروی با قطر ۶۰ میلیمتر در شرایط روانکاری شده، تا حد گسیختگی تغییرشکل داده شدند. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها از خط‌کش میلر استفاده گردید و سطح مقطع شکست نمونه‌های شکل‌دهی شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. نتایج ارزیابی شکل‌پذیری نشان داد که در اثر رشد لایه‌های بین فلزی ترد و شکننده روی-آهن و حذف کامل فاز اتا در حین عملیات حرارتی، سطح منحنی‌های حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد. همچنین عملیات حرارتی در دمای بالاتر و زمان کمتر، سبب بهبود رفتار شکل‌پذیری پوشش نسبت به آنیل در دمای کمتر و زمان بیشتر می‌گردد.

کلمات کلیدی: پوشش، گالوانیزه، گالوانیل، شکل پذیری و نمودار حد شکل‌دهی(FLD).

[1] .mahzadazadeh@gmail.com
[2] .toroghi@cc.iut.ac.ir

مقدمه

ورق‌های فولادی گالوانیزه توسط فرایند غوطه‌وری مداوم در مذاب روی تولید می‌شوند. پوششهای گالوانیزه معمولا حاوی چند فاز بین‌فلزی هستند. پوشش‌های گالوانیل از نوع پوشش‌های نفوذی می‌باشند که از طریق آنیل کردن پوشش گالوانیزه گرم طی یک فرایند مداوم تحت دما و زمان کنترل شده، ایجاد می‌گردند. عملیات حرارتی در سه مرحله صورت می‌گیرد که شامل گرم‌کردن ورق از دمای ذوب تا دمای آنیل، نگهداری در دمای آنیل و مرحله سرد کردن است. دمای ورق خروجی از وان مذاب، تقریباً ۴۶۰°C می‌باشد. دمای ورق با عبور از کوره آنیل با نرخ گرمایشی مناسب به دمای آنیل که در محدوده°C ۵۷۰-۴۹۰ است، رسیده و زمانی حدود ۱۲- ۷ ثانیه را در دمای ثابت سپری کرده و سپس با نرخ سرمایشی مناسب، به کمتر از ۳۵۰°C می‌رسد. طی این عملیات، اتم‌های آهن از زیرلایه فولادی به طرف پوشش گالوانیزه و متقابلاً روی به طرف زیرلایه نفوذ کرده و پوشش کاملاً آلیاژی می‌شود. چنین پوششی شامل لایه‌های آلیاژی روی-آهن بوده که در پوشش‌های گالوانیل با خواص شکل‌پذیری مطلوب، میزان متوسط آهن در پوشش حدود ۱۰٪ می‌باشد. چگونگی ریزساختار پوشش از لحاظ نوع، ضخامت و مورفولوژی لایه‌های آلیاژی از عوامل مؤثر بر خواص پوشش گالوانیل می‌باشد. از جمله مزایای این ورق‌ها نسبت به ورق‌های گالوانیزه گرم مقاومت خوردگی پس از رنگ، رنگ‌پذیری و جوش‌پذیری بهتر، می‌باشد [۱-۲]. شکل‌پذیری، یکی از مهمترین خواص ورقهای فلزی می‌باشد. بیشترین فرایندهای شکل‌دهی مورد استفاده در صنعت شامل خمش، اتساع و کشش عمیق است [۳]. ورق‌های فولادی با پوشش روی به طور گسترده برای محافظت از خوردگی ورق‌های فولادی در صنعت به خصوص خودروسازی بکار برده می‌شوند. از آنجا که این ورق‌ها در فرایندهای شکل‌دهی در معرض تغییرشکل زیادی قرار می‌گیرند، انعطاف‌پذیری پوشش علاوه بر انعطاف‌پذیری زیرلایه، ویژگی مهمی می‌باشد [۴]. یکی از مهمترین ابزارها برای ارزیابی رفتار شکل‌پذیری، نمودارهای حد شکل‌دهی است که از نوع آزمون‌های شکل‌دهی اتساعی می‌باشد [۵]. هدف از این مقاله، بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر رفتار شکل‌پذیری ورق گالوانیزه گرم در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد.

روش تحقیق

روش نمونه‌گیری: ورق‌های گالوانیزه گرم اولیه، از کلاف گالوانیزه‌ای به عرض ۱۰۰۰mm و ضخامت ۰/٦mm از شرکت صنایع گالوانیزه فجر سپاهان تأمین گردید. نمونه‌های موردنیاز جهت عملیات حرارتی از وسط کلاف تهیه شد. سطح کلیه نمونه‌ها بطور چشمی، کنترل کیفی و ضخامت پوشش اندازه‌گیری گردید. جهت عملیات حرارتی از کوره مافلی آزمایشگاهی استفاده شد. به منظور یکنواخت شدن

عملیات حرارتی دو طرف ورق، نمونه‌ها به طور عمودی توسط یک نگهدارنده در کوره قرار گرفتند. به منظور ارزیابی تغییرات ریزساختار پوشش، نمونه‌ها در دماهای ۵۰۰، ۵۲۰، ۵۱۰، ۵۳۰ و $540^{\circ}C$ به مدت ۱۰ تا ۱۸۰ ثانیه آنیل شدند. پس از اتمام عملیات حرارتی، نمونه‌ها در آب سریعاً سرد و خشک گردیدند. به منظور ارزیابی رفتار شکل‌پذیری از آزمایش کشش و همچنین آزمایش اریکسن و رسم نمودارهای حد شکل‌پذیری استفاده گردید. برای رسم نمودارهای حد شکل‌دهی از روش هیکر [۶] استفاده شد. جهت رسم نمودارهای FLD، نمونه‌های مستطیل‌شکل از ورق‌های برش‌یافته اولیه تهیه گردید. برای رسم هر یک از منحنی‌ها، تعداد ۷ نمونه مستطیل شکل از یک ورق به طول ۱۱/۵ سانتیمتر به موازات جهت نورد و عرض‌های ۲۵، ۳۸، ۵۰، ۶۳، ۷۶، ۸۸ و ۱۱۵ میلیمتر تهیه شد. ۲۰ سری از این نمونه‌ها جهت ارزیابی تاثیر عملیات حرارتی بر رفتار شکل‌پذیری ورق گالوانیزه در دماهای ۵۰۰، ۵۲۰ و $540^{\circ}C$ آنیل شدند.

اعمال الگوهای دایره‌ای: برای رسم تجربی نمودارهای حد شکل‌دهی، ابتدا سطح ورق‌های گالوانیزه و نیز آنیل‌شده توسط الگوی دایره‌ای‌شکل، شبکه‌بندی شد. برای اعمال الگو از روش اچ الکتروشیمیایی استفاده گردید(شکل۱). قطر دایره‌های اعمال‌شده توسط الگو در این تحقیق، ۲/۵۴ میلیمتر بود. پس از عملیات الگواندازی سطح نمونه‌ها سریعاً با آب مقطر شستشو و با هوای فشرده خشک گردید.

انجام آزمایش شکل‌دهی: جهت انجام آزمایش شکل‌دهی از دستگاه تست اریکسون **AMSLER BUP 2000** و سنبه نیمکروی با قطر ۶۰ میلیمتر استفاده شد(شکل۲). برای کلیه نمونه‌ها از روانکار استفاده گردید. آزمایش با سرعت ثابت سنبه برابر با ۰/۵ mm/s انجام گرفت. نمونه‌ها تا حد گسیختگی تحت تغییرشکل قرار گرفتند(شکل۳). به منظور دقت بیشتر و افزایش تعداد داده‌ها از هر نوع نمونه ۳ سری تهیه گردید.

اندازه‌گیری کرنش‌ها: بعد از تغییرشکل هر سری از نمونه‌ها، قطر کوچک (کرنش حداقل) و قطر بزرگ (کرنش حداکثر) بیضی‌های اطراف نواحی گسیخته شده به وسیله خط‌کش میلر اندازه‌گیری شد. تعداد بیضی‌های اندازه‌گیری شده برای هر نمونه ۴ تا ۸ عدد بود. از کرنش‌های بدست آمده برای رسم منحنی‌های حد شکل‌دهی استفاده شد و منحنی، زیر بیضی‌های گلویی شده رسم گردید.

بررسی سطح مقطع شکست: سطوح شکست نمونه‌های با عرض‌های مختلف و حالت‌های متفاوت تغییرشکل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. جهت ارزیابی، نمونه‌ها تا نزدیکی ترکهای ناشی از تغییرشکل، برش خوردند. سطح مقطع شکست نمونه‌ها قبل از بررسی، با الکل تمیز گردید.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از مطالعه ریزساختار پوشش گالوانیزه توسط میکروسکوپ الکترونی SEM و آنالیز نیمه‌کمی EDS، الگوهای XRD و نیز آنالیز خطی از سطح مقطع پوشش نشان داد که ریزساختار پوشش

به ترتیب حاوی لایه‌های زتا (Zn-4.2%Fe) و اتا(Zn-1.1%Fe) بر سطح فولاد می‌باشد. نتایج ریزساختار به طور مفصل در مقاله قبلی [۷] ارائه شده است. در ادامه نتایج بدست آمده از آزمون اریکسون برای نمونه‌های گالوانیزه و نیز عملیات حرارتی شده در دما و زمان‌های مختلف (مطابق با جدول ۱) ارائه و تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر رفتار شکل‌پذیری پوشش گالوانیزه بررسی می‌گردد.

نمودارهای حد شکل‌دهی برای نمونه‌های گالوانیزه و نیز به عنوان نمونه برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۵۲۰°C و زمان‌های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. شکل نمودارها همه مشابه و v شکل می‌باشد. محور عمودی در این نمودارها، درصد کرنش حداکثر و محور افقی، درصد کرنش حداقل را نشان می‌دهد. کرنش‌ها برای بیضی‌های گلویی شده و در اطراف ناحیه شکست اندازه‌گیری شده است به همین دلیل منحنی حد شکل‌دهی زیر نقاط بدست آمده، ترسیم گردیده است. ناحیه‌ای که در زیرمنحنی قرار دارد ناحیه ایمن و ناحیه‌ای که در بالای این منحنی قرار دارد، منطقه شکست می‌باشد. با توجه به شکل۴ مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان عملیات حرارتی برای دمای ثابت، سطح نمودارهای حدشکل‌دهی کاهش یافته و از میزان کرنش‌های حداکثر کاسته می‌شود. همچنین میزان FLD_0 (کرنش حداقل برابر با صفر) نیز کاهش می‌یابد. مقادیر FLD_0 برای نمونه‌های گالوانیزه و عملیات حرارتی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۵ نمودارهای حد شکل‌دهی برای ورق‌های گالوانیزه و نیز آنیل شده در دماهای مختلف و وضعیت ظاهری یکسان با هم مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که کرنش‌های حدی برای نمونه‌های گالوانیزه بیشتر از عملیات حرارتی شده بوده و سطح نمودار حد شکل‌دهی نمونه‌های گالوانیزه، ۷-۲٪ بالاتر از نمونه‌های عملیات حرارتی شده می‌باشد و بیانگر این است که حضور لایه‌های آلیاژی ترد روی-آهن در سطح فولاد، بر شکل‌پذیری ورق گالوانیزه آنیل شده تاثیرگذار است. تحقیقات دیگران[۱] نشان داده است در بین این فازها، فازهای دلتا و گاما تردتر بوده و حضور این فازها تاثیر قابل توجهی بر رفتار شکل‌پذیری و چسبندگی پوشش دارد در حالیکه فاز زتا نرمتر است. این لایه‌ها به عنوان مکانهای جوانه‌زنی ترک عمل می‌کنند. ترک معمولاً از لایه گاما ایجاد و به سطح پوشش اشاعه می‌یابد[۸]. نتایج ارزیابی ریزساختار[۷] پوشش گالوانیزه عملیات حرارتی‌شده در دمای۵۲۰°C و زمان ۱۳۵ ثانیه نیز حضور ترک‌ها را در لایه‌های پوشش نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، ریزساختار پوشش شامل فازهای دلتا و گاما بر سطح زیرلایه است. وضعیت ظاهری سطح این نمونه، خاکستری رنگ می‌باشد. با مقایسه شکل ۵-الف و ب، سطح نمودارهای حد شکل‌دهی برای نمونه‌های خاکستری رنگ نسبت به نمونه‌های براق، کمتر می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که برای وضعیت سطح نقره‌ای و براق، سطح نمودارها نسبت به خاکستری روشن بالاتر می‌باشد. نتایج بررسی ریزساختار پوشش[۷] نشان داده است که

با توجه به اینکه در این وضعیت، اسپنگلی در سطح مشاهده نمی‌شود، فاز اتا هنوز در سطح پوشش وجود دارد. چنین ریزساختاری تقریباً مشابه با ریزساختار پوشش‌های گالوانیزه می‌باشد. در این حالت لایه روی خالص در سطح پوشش، به عنوان روانکار جامد نرم عمل کرده و میزان اصطکاک را در حین تغییرشکل کاهش می‌دهد [۹]. با توجه به جدول ۲، جهت ایجاد وضعیت سطح ظاهری براق و مات برای هر دما، زمان متفاوت خواهد بود به نحوی که با افزایش دما، زمان کاهش می‌یابد. در شکل ۵ مشاهده می‌گردد که برای هر دو وضعیت ظاهری سطح، نمودارهای حد شکل‌دهی با افزایش دما، بالاتر رفته و میزان FLD_0 افزایش یافته است. یعنی شکل‌پذیری ورق گالوانیزه آنیل شده تحت شرایط آنیل با دمای بالاتر و زمان کمتر، بهتر می‌باشد. این تغییرات رفتاری ناشی از ریزساختار پوشش و ضخامت لایه‌های آلیاژی است و نشان می‌دهد گسترش و رشد لایه‌های آلیاژی به پارامتر زمان بیشتر از دما حساس است.

نمودارهای تغییرات میزان عمق فنجانی بر حسب عرض نمونه‌های شکل‌دهی برای ورق‌های گالوانیزه آنیل شده در دماهای ۵۰۰ و$^{\circ}C$۵۴۰ تحت زمانهای مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. از بین نقاط، بهترین خط رسم گردیده و معادلات آن در بالای نمودارها ارائه شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که میزان فنجانی شدن با افزایش عرض نمونه‌ها به طور خطی کاهش می‌یابد. تغییرات میزان فنجانی شدن وابسته به حالت‌های مختلف تغییرشکل بوده که این خود، به عرض نمونه‌ها وابسته می‌باشد. نتایج تحقیق دیگران نیز روی شکل‌پذیری ورق‌های فولادی با ضخامت‌های مختلف [۱۰]، چنین تغییراتی را روی میزان ارتفاع فنجانی نسبت به عرض نمونه‌های شکل‌دهی ارائه می‌دهد. نشان داده شده است که چون در حالت کرنش فشاری-کششی میزان کرنش حداقل، منفی و کرنش حداکثر، مثبت است میزان کرنش برشی توسعه یافته نسبت به منطقه کرنش کششی-کششی، بیشتر بوده و ورق می‌تواند مقدار تغییرشکل پلاستیکی بیشتری را تحمل کند، به همین دلیل برای نمونه‌های با عرض کم، میزان ارتفاع فنجانی بیشتر می‌باشد [۱۱].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع شکست نمونه‌های گالوانیزه و آنیل شده در دمای $520^{\circ}C$ و زمان ۱۳۵ ثانیه برای تمامی عرض‌ها در شکل۷ نشان داده شده است. در سطح مقطع شکست همه نمونه‌ها، گودی‌ها و حفراتی مشاهده می‌شود که نشان دهنده تغییرشکل پلاستیکی زیاد قبل از شکست می‌باشد. سطوح شکست، کیفیت‌های مشابهی را ارائه نموده و در همه موارد، تقریباً شکست نرم صورت گرفته است. برای نمونه‌هایی که حالت کرنش فشاری-کششی(شکل۷ الف- ج) داشته‌اند، تعداد زیادی گودی‌های عمیق و حفرات کوچک در سطح مقطع شکست دیده می‌شود که نشان دهنده کشش‌پذیری خوب این نمونه‌ها می‌باشد و این با نتایج بدست آمده از ارتفاع فنجانی (شکل ۶) که مقادیر بالاتری از فنجانی‌شدن را برای این نمونه‌های با عرض کمتر نسبت به نمونه‌های عریض‌تر نشان داده است

نیز، مطابقت دارد. با افزایش عرض به تدریج، برای نمونه‌هایی که در حالت کرنش صفحه‌ای (شکل۷ ج) و در حالت کرنش کششی-کششی (شکل۷ د- ی) بوده‌اند، تعداد حفرات کمتر گردیده و گودی‌ها، کم‌عمق‌تر و سطح یکنواخت‌تر می‌شود که نشان دهنده نرم و تا حدی ترد بودن نوع شکست می‌باشد. نتایج مطالعات دیگران روی سطح مقطع شکست نمونه‌های شکل‌دهی شده ورق گالوانیزه و ورق‌های فولادی بدون پوشش نیز، چنین کیفیت‌هایی را برای سطح شکست نمونه‌ها در حالت‌های مختلف کرنشی نشان داده است. همچنین نتایج بدست آمده از ارزیابی اندازه حفرات در سطح مقطع شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی SEM حاکی از آن است که با افزایش عرض نمونه‌ها، متوسط اندازه حفرات کاهش می‌یابد [۱۰ و ۹].

نتیجه‌گیری

۱- پوشش گالوانیزه گرم اولیه، حاوی فازهای اتا و زتا می‌باشد.

۲- سطح ظاهری پوشش گالوانیزه در حین عملیات حرارتی از براق به خاکستری مات تغییر می‌یابد. در اثر رشد لایه‌های بین فلزی ترد و شکننده روی-آهن و حذف کامل فاز اتا در حین عملیات حرارتی و در نتیجه مات شدن پوشش، سطح منحنی‌های حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

۳- حضور فاز روی خالص در سطح پوشش گالوانیزه گرم، به دلیل نقش روانکاری سبب بهبود رفتار شکل‌پذیری پوشش گالوانیزه نسبت به گالوانیل است.

٤- عملیات حرارتی در دمای بالاتر و زمان کمتر، سبب بهبود رفتار شکل‌پذیری پوشش می‌گردد.

مراجع

[1] A. R. Marder, “The Metallurgy of Zinc Coated Steel”, Progress in Materials Science, 2000, Vol 45, pp. 191-271.

[2] J. M. Long, “Characterization of a Galvanneal Coatings on Strip Steel”, Materials Form, 2004, Vol 27, pp. 62-67.

[3] P. Dadras, “Formability Testing”, ASM Handbook,1999, Vol. 8.

[4] R. Parisot, S. Forest, “Deformation and damage mechanisms of zinc coatings on hot-dip galvanized steel sheets”, Met. and Mater. Trans., 2004, Vol. 35A, pp. 797-811.

[5] S. P. Keeler, W. A. Backofen, “Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches”, 1963, Trans. Am. Soc. Met., Vol. 56, pp. 25-48.

[6] S. S. Hecker, “Simple technique for determinig forming limit curve”,1975 ,Sheet Met Ind., Vol. 53, pp. 671-675.

[۷] مهزاد آزاده و محمدرضا طرقی‌نژاد “تاثیر عملیات حرارتی بر لایه‌های بین فلزی پوشش گالوانیزه گرم” سمپوزیوم فولاد ۸۶ ،بندرعباس ،۱۳۸۶ ،ص ۴۵۵-۴۶۲.

[8] J. Z. Gronostajski, “Behavior of Coated Steel Sheets in-forming Processes”, J. Mater. Process. Technol., 1995, Vol. 53, pp. 167-176.

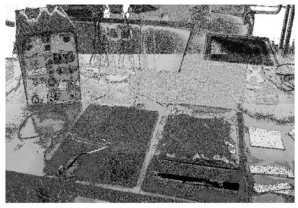
[9] A. K. Gupta, "Formability of Galvanized Interstitial-Free Steel Sheets", Journal of Materials Processing Technology, 2006, Vol. 172, pp. 225-237.
[10] R. Narayanasamy, "Evaluation of Limiting Strains and Strain Distribution for Interstitial Free Steel Sheets", Material and Design, 2007, Vol. 28, pp. 1555-1576.
[11] R. Narayanasamy, "Experimental analysis and evaluation of forming limit diagram for interstitial free steels", 2007, Materials and Design, Vol. 28, pp. 1490-1512.

جدول ۱. شرایط آنیل برای نمونه‌های شکل‌دهی.

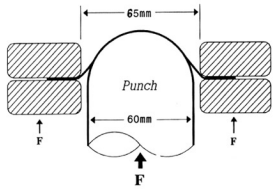
دما (سانتیگراد)	۵۰۰		۵۲۰			۵۴۰	
زمان (ثانیه)	۱۵۰	۱۶۵	۱۲۰	۱۳۵	۱۵۰	۹۰	۱۰۵
وضعیت ظاهری سطح	نقره‌ای براق	خاکستری روشن	نقره‌ای براق	خاکستری روشن	خاکستری مات و زبر	نقره‌ای براق	خاکستری روشن

جدول ۲. میزان FLD_0 برای نمونه‌های گالوانیزه و آنیل شده.

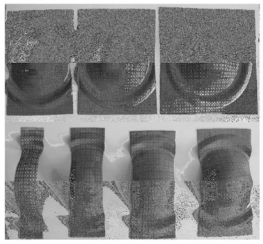
	گالوانیزه	گالوانیزه و آنیل شده					
		۵۰۰°C		۵۲۰°C		۵۴۰°C	
		۱۵۰ s	۱۶۵ s	۱۲۰ s	۱۳۵ s	۹۰ s	۱۰۵ s
FLD_0	۲۹	۲۶	۲۳	۲۷	۲۴	۲۸	۲۶



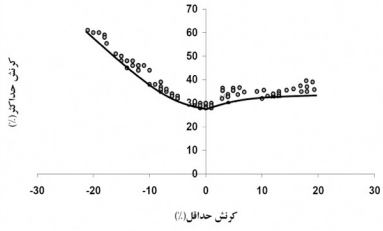
شکل ۱. دستگاه الگوانداز مورد استفاده.



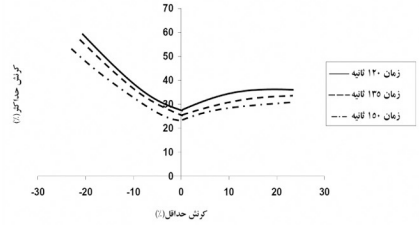
شکل.۲. شماتیک نحوه انجام آزمایش شکل‌دهی.



شکل ۳. سری کامل نمونه‌های آنیل شده پس از تغییرشکل.

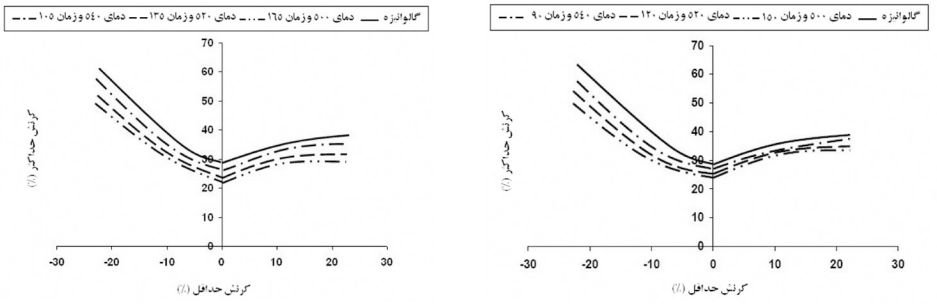


(الف)



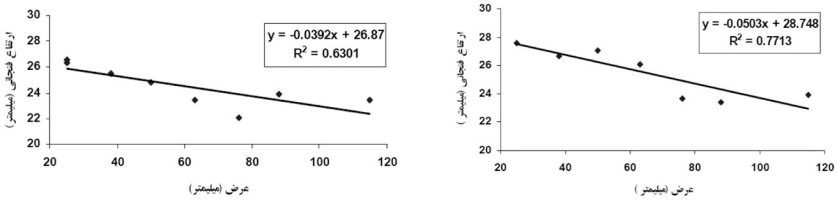
(ب)

شکل ۴. الف) نمودار حد شکل‌دهی نمونه‌های گالوانیزه، ب) نمودارهای مقایسه‌ای حد شکل‌دهی نمونه‌های آنیل شده در دمای ۵۲۰°C.



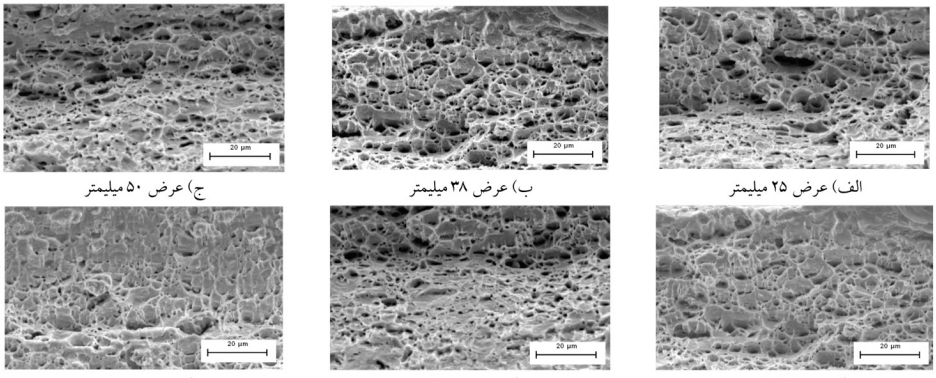
(ب) (الف)

شکل ۵. نمودارهای مقایسه‌ای حد شکل‌دهی نمونه‌های گالوانیزه و آنیل شده در دما و زمان‌های مختلف با سطح ظاهری الف) نقره‌ای براق ب) خاکستری روشن (دما بر حسب سانتی‌گراد و زمان بر حسب ثانیه).



(ب) آنیل شده در دمای $500^{\circ}C$ و زمان ۱۶۵ ثانیه (الف) آنیل شده در دمای $500^{\circ}C$ و زمان ۱۵۰ ثانیه

شکل ۶. نمودارهای میزان فنجانی شدن بر حسب عرض نمونه‌های شکل‌دهی تحت شرایط مختلف آنیل.



ج) عرض ۵۰ میلیمتر ب) عرض ۳۸ میلیمتر الف) عرض ۲۵ میلیمتر

ی) عرض ۸۸ میلیمتر ه) عرض ۷۶ میلیمتر د) عرض ۶۳ میلیمتر

شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM از سطح مقطع شکست نمونه‌های آنیل شده در دمای $520^{\circ}C$ و زمان ۱۳۵ ثانیه.