



ارزیابی سایش گالینگ در قالب‌های کشش عمیق بدنه خودرو با استفاده از آزمایش سایش لغزنده روی سطح تخت

عبدالواحد کمی^{۱*} و بیژن ملائی داریانی^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

چکیده

در این مقاله از آزمایش سایش لغزنده روی سطح تخت برای مطالعه گالینگ در قالب‌های کشش بدنه خودرو (از جنس آلیاژ GGG60) استفاده شد. آزمایش‌های سایش روی ورق‌های فلزی DC06 (استاندارد EN 10130) و DC04 (استاندارد MSC) به دو روش مختلف انجام شدند: در روش اول لغزنده به صورت مکرر روی یک مسیر خطی ثابت حرکت داده شد. در حالیکه در روش دوم، لغزنده روی مسیره‌های خطی موازی و متفاوت حرکت داده شد. روش دوم با استفاده از سطوح تخت و انحنا دار لغزنده انجام شد تا شرایط سایش گالینگ در سطوح تخت و انحنا دار قالب‌ها شبیه‌سازی شود. علاوه بر این، اثر سختی، زبری و استحکام مکانیکی ورق‌های DC04 و DC06 بر گالینگ قالب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های گالینگ با سایش گالینگ ایجاد شده در قالب‌های کشش بدنه خودرو همخوانی داشتند. نتایج نشان دادند که در شکل‌دهی ورق DC04 سایش گالینگ بیشتری ایجاد می‌شود؛ همچنین انطباق کیفی بین نتایج هر دو روش مذکور مشاهده شد. با این وجود در روش اول، سایش در مدت کوتاه‌تری نمایان شد؛ در حالیکه در روش دوم لغزنده روی مسیر بسیار طولانی‌تری حرکت داده شد تا میزان سایش قابل مشاهده‌ای ایجاد شود.

کلمات کلیدی: سایش؛ گالینگ؛ آزمایش لغزنده روی سطح تخت؛ کشش عمیق؛ شکل‌دهی ورق.

Assessment of Galling Wear in Automobile Deep Drawing Dies Using Slider-on-Flat-Surface Wear Test

A. Kami^{1,*}, B. Mollaei Dariani²

¹ Assist. Prof., Fac. Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

² Prof., Mech. Eng. Dept., Amirkabir Univ. Tech., Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, the slider-on-flat-surface (SOFS) test was used to study the galling in automobile body drawing dies (made of GGG60 alloy). The SOFS tests were conducted on the DC06 (EN 10130) and DC04 (MSC standard) alloy sheet metals; according to the following two approaches: in the first approach, the slider was forced to move in a single linear path, repeatedly. While, in the second approach, the slider was moved on separate parallel paths. The second approach was performed using both flat and curved surfaces of the slider to simulate galling conditions on flat and curved surfaces of the dies, respectively. Moreover, the effect of hardness, surface roughness, and mechanical properties of the DC04 and DC06 sheet materials on die galling was investigated. The galling tests' results were in agreement with the galling wear that occurred in automobile body drawing dies. The results showed that forming DC04 sheet metal will lead to more galling wear. Furthermore, a qualitative coincidence was observed between the results of the aforementioned approaches. Nevertheless, in the first approach, wear emerged in a shorter period; while, in the second approach, the slider was moved on a much longer path for creating observable wear.

Keywords: Wear; Galling; Slider-on-Flat-Surface Test; Deep Drawing; Sheet Metal Forming.

۱- مقدمه

سایش گالینگ^۱ در قالب‌های کشت عمیق باعث خرابی تدریجی قالب می‌شود که دلیل آن جوش سرد قطعه و قالب به یکدیگر و سپس جدا شدن آن‌ها در ادامه فرآیند شکل‌دهی است. این عمل باعث جریان مواد روی سطح قالب و یا جدا شدن مواد از سطح قالب می‌شود [۱]. سایش گالینگ علاوه بر آسیب به قالب منجر به خراش شدید در سطح قطعات تولیدی می‌شود. شدت گالینگ به عوامل مختلفی از جمله جنس ورق (خواص مکانیکی، ریز ساختار و ترکیب شیمیایی)، جنس قالب، پوشش سطح قالب، روانکاری و شرایط انجام فرآیند شکل‌دهی دارد [۲ و ۳].

برای تشخیص گالینگ در حین فرآیند شکل‌دهی می‌توان از روش‌هایی مانند مانیتورینگ و تحلیل امواج حاصل از آزمون نشر آوایی [۴ و ۵] استفاده کرد. با این وجود در بسیاری از موارد لازم است تا اثرات مثبت یا منفی استفاده از جنس‌های جدید ورق و قالب و نیز بکارگیری پوشش‌ها و روانکارهای مختلف بر وقوع گالینگ در فرآیندهای کشت عمیق مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور آزمایش‌های متعددی ارائه شده‌اند که امکان مدل‌سازی شرایط مشابه و یا نزدیک به شرایط شکل‌دهی در قالب‌های کشت عمیق بدنه خودرو را فراهم می‌کنند. چند مورد از این آزمایش‌ها عبارتند از: ۱- کشت عمیق در قالب U شکل: در این روش نمونه‌های نواری شکل در یک قالب U شکل فرم‌دهی می‌شوند. این کار تا مشاهده آثار گالینگ در روی قالب ادامه پیدا می‌کند. پیرا و همکاران [۶] از این روش برای بررسی اثرات تغییر هندسه شعاع گوشه قالب بر سایش گالینگ استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر جزئی شعاع گوشه قالب از حالت ایده‌آل حتی در مقادیری کمتر از ۱۵ میکرومتر، منجر به کاهش بیش از ۹۰ درصدی عمر قالب می‌شود. ۲- آزمایش کاهش ضخامت ورق: در این روش یک لغزنده انحنادار روی سطح ورق نواری شکل فشرده شده و حرکت داده می‌شود [۷ و ۸]. ۳- آزمایش خمش نوار: خمش کششی یک نمونه نواری شکل روی سطح میله استوانه‌ای شکل انجام می‌شود [۸]. ۴- آزمایش کشت عمیق: کشت عمیق در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده و سطوح قالب و ورق از لحاظ سایش مورد بررسی

قرار می‌گیرد [۹، ۱۰]. ۵- آزمایش لغزنده روی سطح تخت (SOFS^۲): در این روش یک لغزنده (معمولاً به شکل دیسک با لبه‌های گرد) روی سطح ورق فشرده شده و روی مسی‌های خطی موازی حرکت داده می‌شود [۱۱]. در این روش، می‌توان با بررسی تغییرات نیروی قائم و یا مشاهده آثار گالینگ روی سطح ورق یا قالب، وقوع گالینگ را تشخیص داد [۱۲ و ۱۳]؛ همچنین برای شبیه‌سازی تماس ورق و قالب در نقاط مختلف قالب می‌توان لغزنده را به فرم انگشتی استوانه‌ای (مقطع استوانه با ورق درگیر می‌شود) و یا مخروطی (نوک مخروط با ورق درگیر می‌شود) ساخت [۱۴].

شرایط تماسی بین ورق و ابزار در هر پنج روش فوق‌الذکر، از نوع باز هستند. به عبارت دیگر ابزار در هر لحظه از آزمایش در تماس با سطح جدیدی از ورق است. استانداردهای ارائه شده برای بررسی گالینگ، یعنی استانداردهای ASTM G196-08(2016) [۱۵] و ASTM G98-17 [۱۶]، به دلایل ذیل برای بررسی گالینگ در قالب‌های کشت عمیق بدنه خودرو مناسب نیستند. اولاً، روش ارائه شده در این استانداردها، یک روش آزمایش سایش بسته است. به عبارت دیگر مشابه با آزمایش پین روی دیسک^۳، سطوح تماس ابزار و قطعه تا انتهای آزمایش تغییر نکرده و به صورت تکراری در تماس با یکدیگر هستند. در حالی که در قالب‌های کشت عمیق بدنه خودرو، قالب همیشه در تماس با یک سطح جدید از ورق است. ثانیاً نمونه‌های آزمایش در استانداردهای فوق، به شکل یک استوانه‌ای سوراخ‌دار هستند که با نمونه به شکل ورق فلزی همخوانی ندارد.

هر یک از روش‌های ارائه شده برای بررسی گالینگ مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و انتخاب آنها باید بر اساس دقت مورد نیاز، هزینه‌های آزمایش و مقدار مواد اولیه در دسترس صورت گیرد. از میان این روش‌ها، روش SOFS به دلیل اینکه شرایط تماس ورق و قالب شباهت زیادی با شرایط موجود در قالب کشت عمیق بدنه خودرو دارد و همچنین مقدار ورق فلزی مورد استفاده در آزمایش در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار کمتر است، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در ادامه چند مورد از تحقیقات

^۲ Slider-on-Flat-Surface - SOFS

^۳ Pin-On-Disk

^۱ Gallling Wear

شدند: در روش اول لغزنده روی یک مسیر ثابت حرکت داده شد و در روش دوم، لغزنده روی مسیرهای مجزا و موازی لغزنده شد. بدین ترتیب قابلیت آزمایش SOFS در تشخیص گالینگ در شکل‌دهی ورق‌ها به دو روش مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت؛ همچنین روش دوم با استفاده از سطوح تخت و انحنا دار لغزنده انجام شد تا شرایط سایش گالینگ در سطوح تخت و انحنا دار قالب‌ها شبیه‌سازی شود. در نهایت نتایج آزمایشگاهی با مشاهدات صورت گرفته از قالب‌های کشش بدنه خودرو مقایسه شد.

۲- آثار سایش گالینگ در قالب‌های کشش عمیق

در نتیجه سایش گالینگ در سطح قطعات تولیدی خراش ایجاد شده و همچنین بعد از تولید تعداد اندکی قطعه (بسیار کمتر از حد مورد انتظار) سطوح قالب دچار سایش می‌شود که ترمیم مکرر قالب و متعاقب آن کاهش بازدهی را به همراه دارد. ورق‌های فلزی DC06 و DC04 دارای خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی تقریباً یکسان هستند، با این وجود استفاده از آن‌ها در قالب‌های کشش عمیق بدنه خودرو آثار سایش بسیار متفاوتی ایجاد کرده است. به همین دلیل در این تحقیق روشی ساده برای آزمایش سایش ورق‌ها قبل از استفاده عملی از آن‌ها در قالب‌های کشش ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان در مورد احتمال رخ دادن گالینگ و نیز سرعت سایش قالب در استفاده از یک جنس ورق خاص اظهار نظر کرد.

استفاده از ورق فلزی DC04 باعث ایجاد سایش گالینگ شدید در قالب‌های کشش عمیق بدنه خودرو شده است. این سایش‌ها بیشتر در نواحی با عمق کشش زیاد رخ داده‌اند که علت آن فشار سطحی بالاتر در این نقاط است. نمونه‌ای از آثار سایش از نوع گالینگ در لبه و گوشه قالب از جنس GGG60 در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، سایش گالینگ به تدریج سبب ایجاد شیارهای عمیق در بدنه قالب شده و باعث خارج شدن قالب از هندسه واقعی آن می‌شود. در صورت ادامه این روند، قطعات تولید شده با این قالب به دلیل ظاهر شدن آثار شیارهای ایجاد شده و نیز ایجاد خراش در سطح قطعه، معیوب خواهند شد.

در شکل ۲ خراش‌های ایجاد شده در لبه قالب که ناشی از ذرات ساییده نشان داده شده است که در اثر مکانیزم

صورت‌گرفته با بکارگیری روش SOFS مرور شده است. موسی و همکاران [۱۷]، مکانیزم سایش در ابزارهای ساخته شده از جنس فولادهای استحکام بالا را که در سوراخکاری سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، با روش SOFS مورد مطالعه قرار دادند. لیندول و همکاران [۱۸]، اثر هندسه و فشار تماس بر سایش گالینگ را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از لغزنده دیسک شکل با شعاع‌های مختلف استفاده کردند تا هندسه تماس ورق و لغزنده را تغییر دهند. گالینگ در ورق‌هایی از جنس DC01 (استاندارد EN 10130)، Docol 800DP و Docol 1200M (استاندارد VDA 239-100) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که در صورت کاهش فشار تماس، برای مشاهده گالینگ باید لغزنده در مسیرهای طولانی‌تری حرکت داده شود و همچنین در صورت استفاده از لغزنده با سطح تماس غیرتخت، گالینگ سریع‌تر رخ می‌دهد. کارلسون و همکاران [۱۲]، روش‌های آزمایش پین روی دیسک و لغزنده روی سطح تخت را در تشخیص گالینگ مورد ارزیابی قرار دادند. در روش لغزنده روی سطح تخت به دلیل اینکه لغزنده در لحظه در تماس با سطح جدید است، سایش گالینگ در طول مسیر طولانی‌تری مشاهده شد. کارلسون و همکاران [۱۹]، اثر مقدار تنش گواه^۱ ورق فلزی و میکروساختار ماده قالب در وقوع گالینگ را مورد بررسی قرار داده‌اند. مشاهده شد که برای رخ دادن گالینگ در ورق‌های فلزی با استحکام بالاتر باید از نیروی فشاری بالاتری استفاده شود؛ همچنین با افزودن کاربایدها و کربونیتراپیده کردن قالب می‌توان سایش گالینگ را به تأخیر انداخت. گارد و همکاران [۱۳]، گالینگ بین ورق DP600 (استاندارد ASTM A1088-13) و قالب از جنس AISI D2 را از طریق آزمایش SOFS مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با مشاهدات صورت گرفته از قالب واقعی شکل‌دهی قطعات بدنه خودرو نشان داد که روش SOFS می‌تواند شرایط تماسی بین ورق و قالب را به خوبی مدل‌سازی نماید.

در این مقاله، از روش SOFS برای بررسی وقوع گالینگ در شکل‌دهی ورق‌های فلزی کشش عمیق DC06 (استاندارد EN 10130 - تولید شرکت Hyundai Steel) و DC04 (استاندارد MSC) استفاده شد. آزمایش‌ها به دو روش انجام

¹ Proof Stress

۰/۷ میلی‌متر انجام شدند. ترکیب شیمیایی این ورق‌ها بر اساس برگه مشخصات ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انجام آزمایش گالینگ SOFS، بخشی از ماده قالب کشتش بدنه خودرو (از جنس چدن GGG60) جدا شد. ورق در حین شکل‌دهی، هم روی سطوح تخت قالب و هم روی سطوح انحناداری مانند شعاع لبه‌های قالب کشیده می‌شود. به همین دلیل، برای اینکه بتوان شرایط تماس ورق با قالب را هم برای سطوح تخت و هم برای سطوح انحنادار شبیه‌سازی کرد، هندسه لغزنده مطابق با شکل ۴ در نظر گرفته شد. مطابق با این شکل، شعاع ناحیه گرد لغزنده برابر با ۲۰ میلی‌متر است. برای اینکه شرایط سطحی لغزنده چدنی مورد استفاده کاملاً مشابه با شرایط سطحی قالب باشد، سطح لغزنده با کاغذ سنباده با زبری‌های مختلف پرداخت شده (پرداخت نهایی با کاغذ سنباده ۶۰۰) و آزمایش در شرایط خشک (بدون روانکاری) انجام شد؛ همچنین سطح ورق‌ها و لغزنده برای حذف آلودگی‌ها و چربی با استون تمیز شد. سختی سطحی لغزنده مورد استفاده ۴۶ راکول سی است که برابر با سختی سطح قالب کشتش است. ترکیب شیمیایی لغزنده چدنی در جدول ۲ ارائه شده است.

لغزنده روی یک ابزارگیر نصب شد و مجموعه ابزارگیر و لغزنده روی محور دستگاه فرز FP4M (ساخت ماشین‌سازی تبریز) با ابعاد میز ۸۰۰ در ۴۶۰ میلی‌متر و کورس حرکتی ۵۰۰ میلی‌متر نصب شد. برای انجام آزمایش، لغزنده به کمک نیروی فنر روی سطح ورق فشرده می‌شود. در این حالت لغزنده ثابت بوده و ورق با سرعت خطی ثابت ۶۱۰ میلی‌متر بر دقیقه حرکت نسبی را انجام می‌دهد.



شکل ۳- آثار خراش ایجاد شده ناشی از گالینگ بر روی یک قطعه کشتش عمیق

چسبیدن و جدا شدن قالب و ورق ایجاد می‌شوند. این ذرات ساینده باعث ایجاد خطوط خراش روی قطعات تولیدی نیز می‌شوند. نمونه‌ای از خراش‌های ایجاد شده در سطح قطعه در شکل ۳ نمایش داده شده است. از این قطعه نمی‌توان در نمای ظاهری (بیرونی) خودرو استفاده کرد.

۳- آزمایش‌های تجربی و مواد

آزمایش گالینگ بین ورق و قالب در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و سعی شد، شرایط واقعی شکل‌دهی ورق لحاظ شود. برای این منظور روش آزمایش SOFS برای بررسی گالینگ انتخاب شد. به کمک این آزمایش می‌توان نیروهای قائم را به دلخواه تغییر داد و تحت شرایط نیرویی مختلف وقوع گالینگ بین دو ماده را بررسی کرد. مزیت مهم دیگر این روش آزمایش، امکان اندازه‌گیری نیروی افقی (نیروی اصطکاکی) بدون تاثیر متقابل نیروی قائم است. آزمایش‌های سایش روی دو ورق کشتش عمیق DC04 و DC06 با ضخامت



شکل ۱- سایش و خراش ایجاد شده در لبه و گوشه یک نمونه قالب کشتش عمیق از جنس آلیاژ GGG60



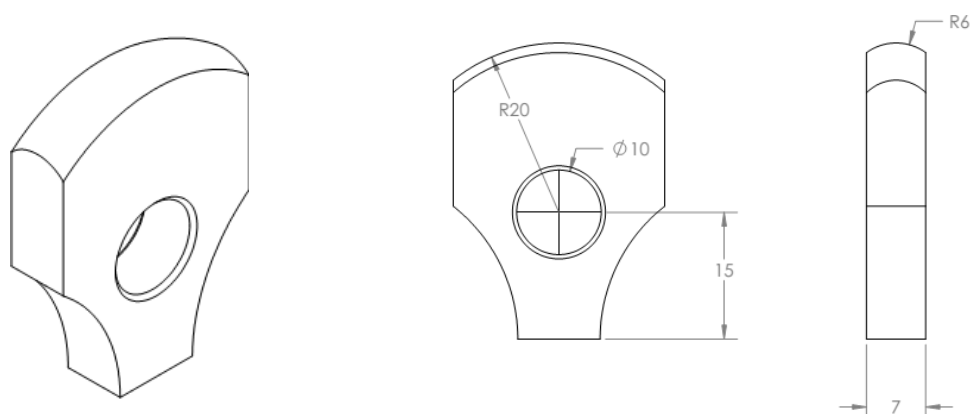
شکل ۲- خراش‌های ایجاد شده در لبه قالب ناشی از ذرات ساینده ایجاد شده در حین سایش گالینگ

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق‌های DC04 و DC06 (درصد وزنی)

جنس ورق	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
DC06	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۸۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۵۸	باقی‌مانده
DC04	۰/۰۲۰	۰/۰۰۱	۰/۱۶۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۰/۰۳۷	باقی‌مانده

جدول ۲- ترکیب شیمیایی لغزنده چدنی آلیاژ GGG60 [۱۷]

نوع عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
درصد وزنی	۴/۰ - ۳/۲	۲/۸ - ۱/۵	۱/۰ - ۰/۰۵	۰/۰۸ >	۰/۰۲ >	۰/۷ - ۰/۰	۰/۰۸ - ۰/۰۳

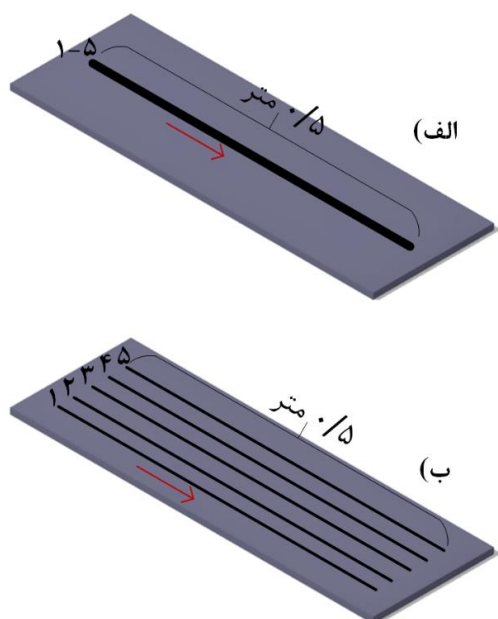


شکل ۴- هندسه لغزنده چدنی GGG60 مورد استفاده در آزمایش SOFS (سطح انحنادار با شعاع ۲۰ میلی‌متر و سطح تخت پایین با ورق تماس پیدا می‌کند)

آزمایش‌های گالینگ به دو روش مختلف انجام شدند: در روش اول لغزنده چندین بار روی یک مسیر خطی ثابت حرکت داده شد؛ در حالیکه در روش دوم، لغزنده روی مسیرهای خطی موازی و متفاوت با یکدیگر حرکت داده شد. شماتیک مسیرهای حرکت لغزنده در این روش‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است (فرض شده است که آزمایش با ۵ بار تکرار حرکت ابزار کامل می‌شود). با توجه به محدودیت حرکت میز دستگاه فرز، طول مسیر حرکت لغزنده در هر کورس برابر با نیم متر تنظیم شد.

خواص مکانیکی ورق‌های DC04 و DC06 با انجام آزمایش کشش تک‌محوری مطابق با استاندارد E8M [۲۰] بدست آمد. هر آزمایش سه بار تکرار و مقدار متوسط داده‌های بدست آمده در جدول ۳ گزارش شده است. مطابق با

نیروی عمودی با تغییر میزان بار دستگاه فرز که میزان فشردگی فنر داخل ابزارگیر را تعیین می‌کند، اعمال می‌شود. مقدار نیروی عمودی در تمام آزمایش‌ها برابر با ۱۵۰ نیوتن در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه فشردگی فنر در حین حرکت میز (و جابه‌جایی ورق) تغییر نمی‌کند، نیروی عمودی ثابت فرض می‌شود. در شکل ۵-الف مجموعه ابزارها و دستگاه فرز مورد استفاده در آزمایش و در شکل ۵-ب، ابزارگیر نمایش داده شده است که شامل غلاف نگهدارنده فنر و نیز لغزنده است. ورق‌ها به صورت نواری و با طول ۷۰۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر برش داده شدند و پس از قرار گرفتن روی یک صفحه فولادی سنگ‌زنی شده، روی میز دستگاه فرز گیره‌بندی شدند.



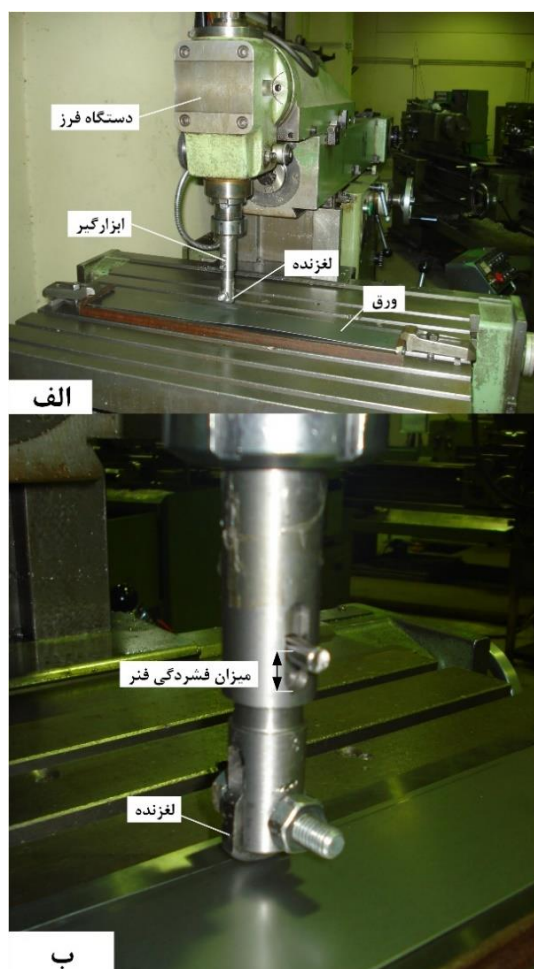
شکل ۶- مسیره‌های حرکت ابزار در آزمایش گالینگ، الف) روش اول: تکرار حرکت لغزنده روی یک مسیر خطی ثابت و ب) روش دوم: لغزنده روی مسیره‌های خطی موازی

علاوه بر آزمایش‌های فوق، آزمایش زبری سطح و سختی ورق‌های فلزی به منظور بررسی ارتباط احتمالی آن‌ها با میزان گالینگ ایجاد شده در سطح قالب انجام شد که نتایج آن در بخش ۵ ارائه شده است.

۴- ارائه نتایج و بحث

شروع گالینگ با مشاهده چشمی آثار ذرات جدا شده از لغزنده و یا ورق در حین آزمایش تشخیص داده شد. در ابتدای آزمایش مسیر حرکت لغزنده روی سطح ورق برآق و بدون عیب است. پس از طی یک مقدار طول مشخص توسط لغزنده، ذراتی که از سطح ورق و یا لغزنده جدا شده‌اند، روی سطح ورق کشیده می‌شوند.

نتایج حاصل از روش اول آزمایش گالینگ نشان داد که در مورد ورق DC04 بعد از ۹ کورس حرکت لغزنده (حدود ۴/۵ متر حرکت لغزنده روی ورق) اولین آثار گالینگ ظاهر می‌شود، در حالی که در استفاده از ورق DC06 بعد از ۱۶ کورس (حدود ۸ متر حرکت لغزنده روی ورق) آثار اولیه گالینگ مشاهده شد. این مشاهدات را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که بین ورق DC04 و لغزنده چسبندگی بیشتری رخ

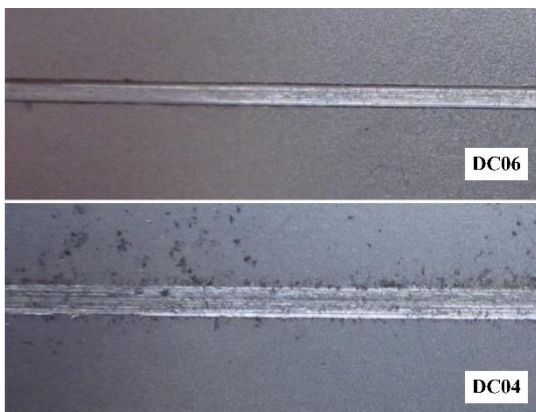


شکل ۵- الف) مجموعه ابزارها و دستگاه فرز مورد استفاده در آزمایش گالینگ و ب) ابزارگیر

این جدول درصد ازدیاد طول و توان کارسختی ورق DC06 اندکی بالاتر است که بیانگر شکل‌پذیری بهتر این آلیاژ است. نکته دیگر در مورد داده‌های جدول ۳، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی است که در مورد ورق‌های DC06 و DC04 این نسبت به ترتیب برابر با ۰/۵۱ و ۰/۶۲ است. این مقادیر نشان می‌دهند که ورق DC06 تغییر شکل پلاستیک بیشتری را تحمل می‌کند. نکته دیگر این است که با توجه به بالاتر بودن مقدار تنش تسلیم ورق DC04 می‌توان انتظار داشت که در شکل‌دهی این ورق (در مقایسه با ورق DC06) تنش‌های فشاری بیشتری به قالب وارد شود که این مسئله می‌تواند وقوع گالینگ را تشدید کند.

جدول ۳- خواص مکانیکی ورق‌های DC06 و DC04 حاصل از تست کشش تک محوری

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی	درصد زیاد طول	توان کارسختی
DC06	۱۴۷/۷	۲۹۲	۰/۵۱	۴۴/۷	۰/۲۶
DC04	۱۸۲/۳	۲۹۶	۰/۶۲	۴۱/۳	۰/۲۴



شکل ۷- مقایسه سطوح سایش در سطح ورق پس از ۱۵ متر حرکت لغزنده در روش اول آزمایش گالینگ و با استفاده از سطح انحنادار لغزنده



شکل ۸- آثار ذرات ساییده تشکیل شده در سطح قالب کشش در استفاده از ورق DC04

ذرات ساییده سخت در این مسیر است. این ذرات ساییده از سطح ورق یا لغزنده جدا شده‌اند و سختی آنها به دلیل تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده روی آنها بسیار بیشتر از سختی ورق و لغزنده است [۲۱]؛ همچنین پستی و بلندی‌های موجود مسیر حرکت لغزنده می‌تواند ناشی از چسبیدن موادی از لغزنده به سطح ورق یا جدا شدن بخش‌هایی از مواد سطح ورق باشد که تعیین دقیق آن نیاز

می‌دهد و در نتیجه، مواد بیشتری از لغزنده جدا شده و در سطح بین لغزنده و ورق قرار می‌گیرند. با ادامه حرکت لغزنده روی ورق این ذرات به عنوان ساینده عمل کرده و سبب سایش بیشتر لغزنده می‌شوند.

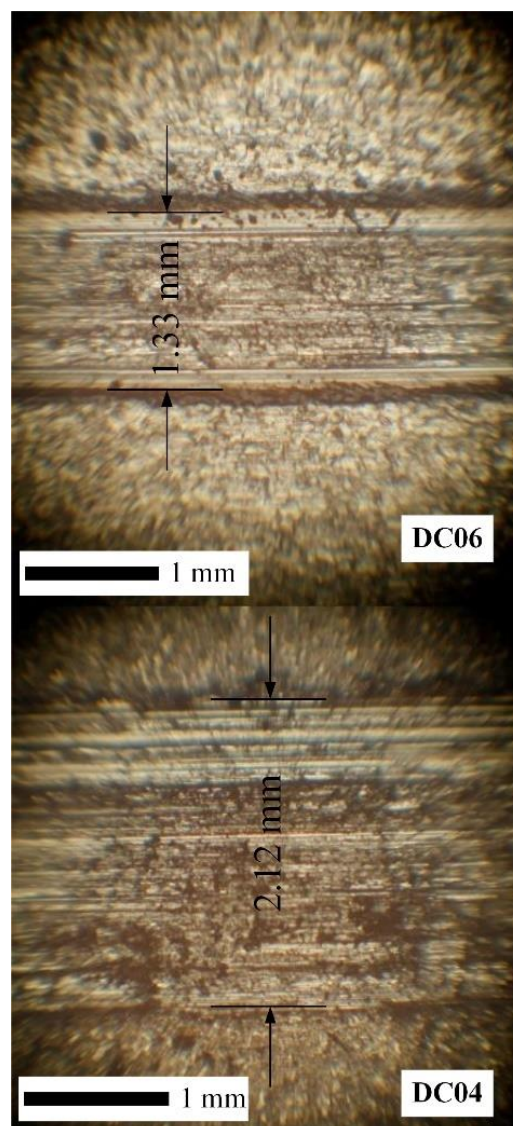
به منظور بررسی تأثیر ذرات ساینده تشکیل شده در طی گالینگ در تشدید سایش لغزنده، حرکت لغزنده تا ۳۰ کورس (۱۵ متر) ادامه پیدا کرد. بعد از اتمام آزمایش سطح ورق‌ها و نیز لغزنده به صورت چشمی و نیز با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰ برابر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۷ آثار سطحی ایجاد شده در مسیر حرکت لغزنده چدنی در آزمایش با ورق‌های DC04 و DC06 با یکدیگر مقایسه شده است. وجود ذرات جدا شده از لغزنده در اطراف و روی مسیر حرکت لغزنده، سایش بیشتر لغزنده و افزایش سطح تماس را تأیید می‌کند. در استفاده از ورق DC04 در قالب کشش عمیق بدنه خودرو نیز آثار ذرات ساینده ایجاد شده به دلیل سایش گالینگ مشاهده شد (شکل ۸). در شکل‌دهی ورق DC06 هیچ‌گونه ذرات ساینده مشاهده نشده است. بدین ترتیب می‌توان ملاحظه کرد که آزمایش‌های گالینگ لغزنده روی سطح تخت به خوبی شرایط واقعی استفاده از ورق‌های مورد آزمایش را شبیه‌سازی نموده است.

برای مشاهده بهتر مسیر حرکت لغزنده و آثار ایجاد شده در سطح ورق، تصاویر میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری زایس با بزرگنمایی ۵۰ تهیه شد که در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، عرض مسیر سایش روی ورق DC04 (۲/۱۲ میلی‌متر) بزرگتر از عرض مسیر سایش روی ورق DC06 (۱/۳۳ میلی‌متر) است. این بدان معناست که سطح تماس لغزنده و ورق DC04 در حین آزمایش افزایش بیشتری پیدا کرده است. بر اساس شکل ۹ در مسیر حرکت لغزنده در هر دو ورق DC06 و DC04 شیارهای کم عمق موازی با مسیر حرکت لغزنده ایجاد شده است که نشان‌دهنده کشیده شدن

۱۵ متر)، امکان مقایسه مقدار سایش ایجاد شده روی لغزنده برای دو ورق وجود دارد. سطح سایش ایجاد شده روی لغزنده در روش اول آزمایش گالینگ در شکل ۱۰ نمایش داده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مقدار سایش ایجاد شده در سطح لغزنده چدنی در آزمایش با ورق DC04 بسیار بزرگتر از مقدار سایش ایجاد شده در آزمایش با ورق DC06 است. با توجه به شیارهای موجود در سطح سایش لغزنده و نیز ذرات ساینده‌ای که شکل ۷ نشان داده شده است، می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که با افزایش طول مسیر طی شده توسط لغزنده، ذرات ساینده سبب تشدید سایش لغزنده می‌شوند. این شرایط در آزمایش با ورق DC04 بسیار شدیدتر است، چرا که گالینگ و جدا شدن مواد از قالب و در نتیجه آن، تشکیل ذرات ساینده بین ورق و لغزنده در طول تماس‌های کوتاه‌تری رخ می‌دهد (همانطور که اشاره شد شروع گالینگ در ورق‌های DC04 و DC06 به ترتیب در ۴/۵ و ۸ متر رخ می‌دهد).

مشاهداتی که در آزمایش گالینگ با روش اول انجام شد با سایش ایجاد شده در قالب‌های کشش عمیق بدنه خودرو همخوانی دارد؛ به طوریکه در شکل‌دهی ورق‌های DC04 آثار گالینگ در قالب بعد از تعداد ضرب کم نمایان شده و با ادامه استفاده از ورق DC04 شیارهای عمیقی در لبه‌ها و شعاع‌های قالب ایجاد شده است (بخش ۴ را ملاحظه کنید).

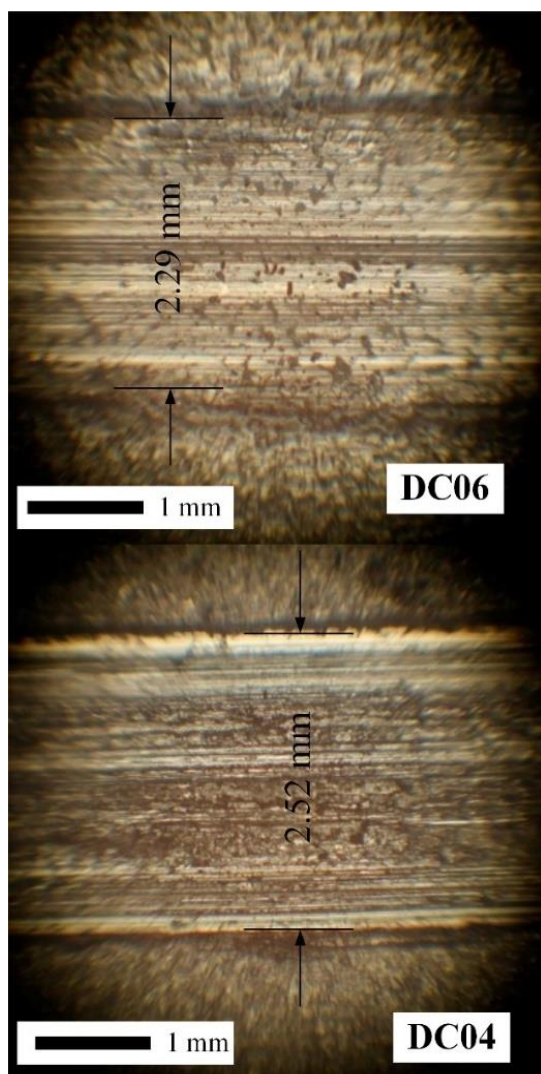
بازرسی‌های صورت گرفته از سطح قالب‌های کشش عمیق نشان می‌دهند که در سطوح تخت قالب‌ها میزان سایش کمتری در مقایسه با لبه‌ها و گوشه‌ها رخ می‌دهد که دلیل آن می‌تواند فشار کمتر بر سطح قالب در نواحی تخت باشد. برای مقایسه سایش سطوح تخت با سایش در نواحی شعاعی، آزمایش‌های گالینگ با سطح تخت لغزنده نیز انجام شدند. با توجه به کم بودن میزان سایش‌ها در این حالت، طول مسیر طی شده توسط لغزنده برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شد. سایر شرایط آزمایش مانند آزمایش گالینگ با روش اول در نظر گرفته شد. مسیر حرکت لغزنده روی ورق‌ها در انتهای آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، مسیر حرکت لغزنده با بزرگنمایی ۵۰ در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به این شکل، عرض مسیر حرکت ابزار در ورق DC04 برابر با ۲/۵۲ میلی‌متر است، در حالی که عرض مسیر حرکت ابزار در ورق DC06 برابر با ۲/۲۹



شکل ۹- مقایسه سطوح سایش در مسیر حرکت لغزنده روی سطح ورق‌های DC04 و DC06 پس از ۱۵ متر حرکت لغزنده در روش اول آزمایش گالینگ و با استفاده از سطح انحنا دار لغزنده (بزرگنمایی ۵۰ برابر)

به آنالیز بیشتر دارد. هم آثار خراش ذرات ساینده و هم میزان پستی و بلندی‌ها در سطح ورق DC04 نسبت به ورق DC06 بیشتر است که نشان‌دهنده شدیدتر بودن میزان سایش گالینگ در استفاده از ورق DC04 است.

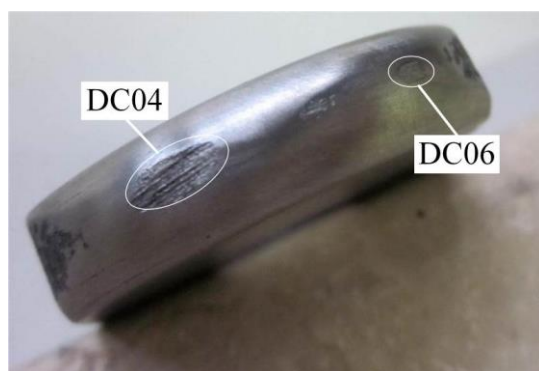
با توجه به اینکه طول مسیر طی شده توسط لغزنده روی ورق‌های DC04 و DC06 با یکدیگر برابر است (هر دو برابر با



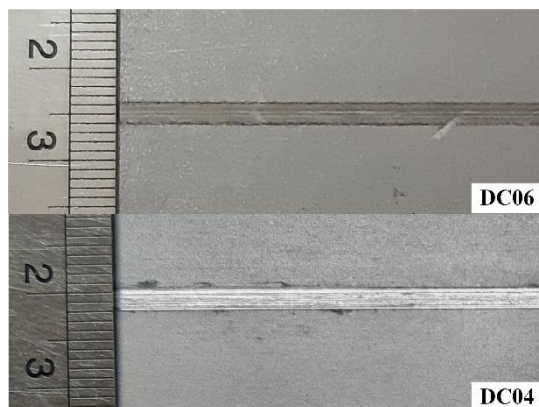
شکل ۱۲- مقایسه سطوح سایش ورق‌های DC04 و DC06 در آزمایش گالینگ با روش اول و لغزش سطح تخت لغزنده (طول حرکت لغزنده ۲۰ متر، بزرگنمایی ۵۰ برابر)

شده در سطح تخت لغزنده در آزمایش با ورق DC04 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. الگوی سایش در سطح تخت لغزنده با آنچه در آزمایش با سطح انحنا دار لغزنده مشاهده شد (شکل ۱۰) همخوانی دارد.

اگرچه نتایج آزمایش‌های روش اول (آزمایش با سطح انحنا دار و تخت لغزنده) نشان می‌دهد که در استفاده از ورق DC04 گالینگ شدیدتر بوده و سایش بیشتری در سطح لغزنده رخ می‌دهد، ولی باید توجه داشت در شرایط واقعی شکل‌دهی در قالب‌های کشش عمیق، سطح قالب همواره در تماس با یک



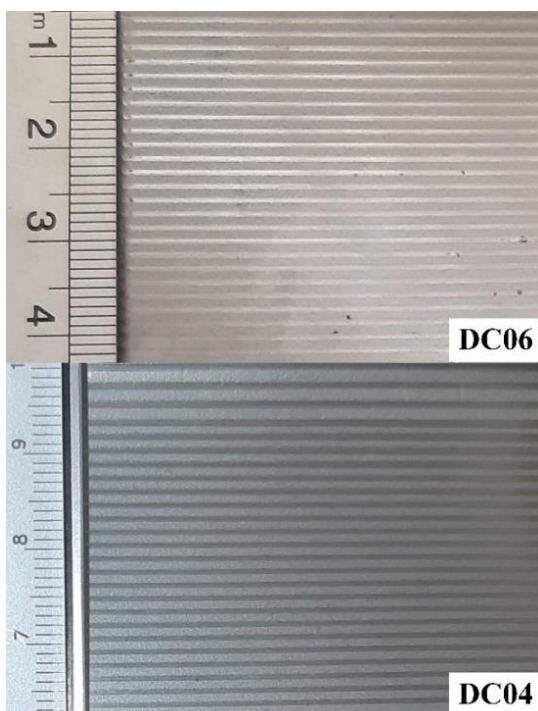
شکل ۱۰- مقایسه سایش ایجاد شده بر روی سطح لغزنده پس از ۱۵ متر حرکت لغزنده در روش اول آزمایش گالینگ



شکل ۱۱- مقایسه سطوح سایش ورق‌های DC04 و DC06 در آزمایش گالینگ با روش اول و لغزش سطح تخت لغزنده (طول حرکت لغزنده ۲۰ متر)

میلی‌متر است. این نتایج مشابه با نتایج آزمایش با سطح انحنا دار لغزنده بوده و بیانگر این نکته است که ورق DC04 در سطوح تخت قالب نیز سایش بیشتری ایجاد خواهد کرد. میزان سایش در ورق DC06 بسیار ناچیز بوده و شیارهای باریکی ناشی از ذرات ساییده ایجاد شده است. در آزمایش با ورق DC04 سایش بیشتری رخ داده و علاوه بر شیارهای حاصل از سایش ذرات ساییده، سطوح زبر در مسیر حرکت لغزنده، نشان‌دهنده چسبندگی بین سطوح ورق و لغزنده است.

بررسی سطح لغزنده در انتهای آزمایش نشان داد که در آزمایش با ورق DC06 سایش ایجاد شده در سطح لغزنده بسیار جزئی است، ولی در آزمایش با ورق DC04 سایش قابل ملاحظه‌ای در سطح تخت لغزنده ایجاد شد. سایش ایجاد



شکل ۱۴- مقایسه سطوح سایش ورق‌های DC04 و DC06 در آزمایش گالینگ با روش دوم و لغزش سطح انحنادار لغزنده (طول حرکت لغزنده ۱۴/۵ متر)

و همچنین مقدار سایش ایجاد شده در لغزنده در آزمایش با ورق DC04 نسبت به سایش ایجاد شده در آزمایش با ورق DC06 بیشتر بود. برای بررسی بهتر، سطوح سایش لغزنده با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر مورد مشاهده قرار گرفت که در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که در آزمایش با هر دو ورق، لغزنده چدنی دچار سایش می‌شود، اگرچه مقادیر آنها متفاوت است. میزان سایش در آزمایش با ورق DC04 بسیار بیشتر از سایش در آزمایش با ورق DC06 است که دلیل آن تشکیل ذرات ساینده بیشتر در آزمایش با ورق DC04 است.

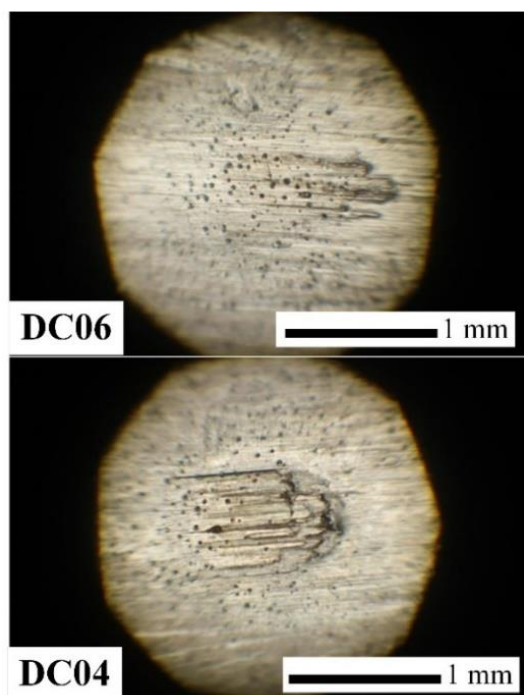
بدین ترتیب مشاهده می‌شود که هر دو روش اول و دوم روندهای یکسانی را در مورد سایش گالینگ در استفاده از ورق‌های DC04 و DC06 ارائه می‌کنند. تنها تفاوت در میزان سایش ایجاد شده در لغزنده و عرض مسیر سایش است؛ به طوریکه مقدار سایش در روش دوم بسیار کمتر از روش اول است. علاوه بر این باید توجه داشت که به علت عدم تغییر مسیر حرکت لغزنده در روش اول، انجام این روش آزمایش



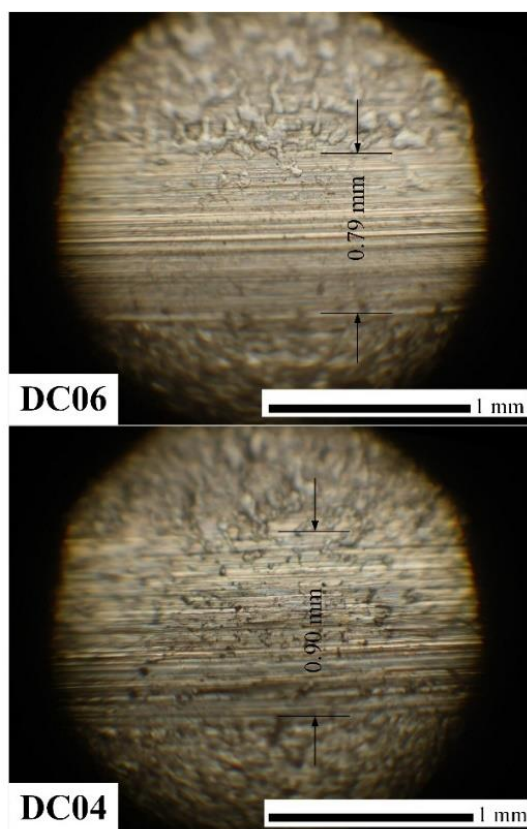
شکل ۱۳- سایش در سطح تخت لغزنده بعد از ۲۰ متر حرکت لغزنده روی ورق DC04

سطح تازه از ورق می‌باشد. زیرا در هر بار تولید قطعه، ورق خام جدیدی به داخل قالب تغذیه می‌شود. در صورتی‌که در آزمایش گالینگ با روش اول که مشابه با آزمایش پین روی دیسک است، لغزنده همواره در تماس با یک سطح ثابت قرار دارد؛ بنابراین برای اینکه این مورد نیز در آزمایش‌ها لحاظ شود، آزمایش‌های گالینگ به روش دومی نیز انجام شدند. در روش دوم آزمایش گالینگ، سطح انحنادار و پرداخت شده لغزنده روی سطح ورق با شرایط مشابه با روش اول حرکت داده شد با این تفاوت که مسیرهای حرکت در هر کورس از یکدیگر مجزا هستند. فاصله مسیرها از یکدیگر برابر با ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و لغزنده در مسیرهایی با مجموع طول ۱۴/۵ متر (۲۹ کورس) حرکت داده شد.

مسیرهای حرکت ابزار روی ورق‌های DC04 و DC06 در روش دوم آزمایش گالینگ در شکل ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ همچنین در شکل ۱۵ تصویر آخرین مسیر حرکت ابزار با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر نمایش داده شده است. مطابق با این شکل، عرض ناحیه سایش در ورق DC04 برابر با ۰/۹۰ میلی‌متر است که مشابه با آزمایش‌های روش اول، بیشتر از عرض سایش ورق DC06 (۰/۷۹ میلی‌متر) است. مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۵ نشان می‌دهد که در روش دوم سایش بسیار کمتری در مقایسه با روش اول ایجاد می‌شود. دلیل این تفاوت، عدم انباشت ذرات ساینده در سطح تماس مشترک لغزنده و ورق‌ها است. در آزمایش با ورق DC04 آثار گالینگ بعد از ۹/۵ متر حرکت لغزنده روی ورق ظاهر شد؛ در حالیکه در آزمایش با ورق DC06 آثار گالینگ که با چشم قابل تشخیص باشد، تا انتهای آزمایش مشاهده نشد. با این وجود، مشابه آنچه در روش اول نیز مشاهده شد، عرض ناحیه سایش



شکل ۱۶- سایش در سطح انحنادار لغزنده بعد از ۱۴/۵ متر حرکت بر روی ورق‌های DC04 و DC06 در روش دوم آزمایش گالینگ (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)



شکل ۱۵- مقایسه سطوح سایش ورق‌های DC04 و DC06 در آزمایش گالینگ با روش دوم و لغزش سطح انحنادار لغزنده (طول حرکت لغزنده ۱۴/۵ متر، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)

شد. در جدول ۴ نتایج زبری سطح ارائه شده است. سه نمونه با ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر از کلاف‌های ورق متفاوت برش داده شدند و مقدار زبری روی سه ناحیه متفاوت از سطوح بالا و پایین این نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. بر اساس داده‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود که هم در سطح بالا و هم در سطح پایین ورق‌ها، میزان زبری سطح دو ورق DC04 و DC06 اختلاف کمی با یکدیگر دارند. مقدار میانگین زبری متوسط در سطح بالای ورق‌های DC04 و DC06 به ترتیب برابر با ۱/۰۴ و ۱/۱۸ میکرومتر است (برای سطح پایین ورق‌ها این مقادیر به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۱/۲۲ میکرومتر است). اگرچه میزان اختلاف زبری سطوح دو ورق DC04 و DC06 پایین است، ولی به صورت کلی می‌توان اظهار داشت که ورق DC04 نسبت به ورق DC06 خواص سطحی بهتری دارد. صافی سطح بالاتر تمایل به ایجاد گالینگ در قالب را بیشتر می‌کند که دلیل آن تأثیر منفی کاهش زبری سطح بر روانکاری مرزی و افزایش سطح تماس واقعی ورق و قالب است [۲۲].

راحت‌تر بوده و سریع‌تر انجام می‌شود؛ در حالی که در روش دوم لغزنده باید روی مسیرهای متفاوت با یکدیگر حرکت داده شود و در صورت طولانی شدن مسیر حرکت لغزنده، تعداد نمونه‌های مورد نیاز بیشتر خواهد شد. با این وجود انجام آزمایش به روش دوم به شرایط شکل‌دهی ورق در قالب کشش بسیار نزدیک‌تر است.

۵- بررسی تأثیر زبری و سختی ورق‌ها بر گالینگ

همانطور که مشاهده شد، میزان گالینگ ورق DC04 نسبت به ورق DC06 بیشتر است. عوامل متعددی مانند الگوی زبری سطحی، زبری متوسط، سختی، شرایط اسیدشویی و خواص مکانیکی ورق در سایش دخیل هستند [۲]. در اینجا به منظور بررسی دقیق‌تر احتمال تأثیر هر یک از این عوامل، زبری سطح و سختی ورق‌های DC04 و DC06 نیز اندازه‌گیری

جدول ۴- مقادیر زبری متوسط سطوح بالا و پایین ورق‌های DC04 و DC06

شماره نمونه	زبری متوسط، R_a ، در سطح بالای ورق (μm) در سه نقطه و مقدار متوسط آن	زبری متوسط، R_a ، در سطح پایین ورق (μm) در سه نقطه و مقدار متوسط آن	میانگین	میانگین	میانگین	میانگین	میانگین
DC06_1	۰/۹۹	۱/۲۰	۱/۰۷	۱/۰۹	۱/۲۸	۱/۱۱	۱/۴۱
DC06_2	۱/۱۶	۱/۳۷	۱/۰۱	۱/۱۸	۱/۲۲	۱/۲۶	۰/۹۹
DC06_3	۱/۳۴	۱/۳۰	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۴۲
DC04_1	۱/۲۴	۰/۹۸	۱/۰۱	۱/۰۸	۰/۸۸	۱/۰۹	۱/۰۸
DC04_2	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۰۰	۱/۰۲	۰/۸۲	۰/۸۷	۱/۰۰
DC04_3	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۹	۱/۰۹	۰/۹۶

در این مقاله گالینگ در شکل‌دهی ورق‌های DC04 و DC06 در قالب کشش عمیق بدنه خودرو از جنس آلیاژ GGG60 با استفاده از روش SOFS مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها

جدول ۵- نتایج سختی سنجی برینل روی ورق‌های DC06 و

شماره نمونه	سختی برینل در سه نقطه و مقدار متوسط آن	میانگین	میانگین	میانگین	میانگین
DC06_1	۳۶/۰	۳۵/۸	۳۵/۰	۳۵/۶	۳۵/۶
DC06_2	۳۴/۶	۳۵/۱	۳۵/۱	۳۴/۹	۳۴/۹
DC06_3	۳۴/۹	۳۴/۷	۳۴/۷	۳۴/۸	۳۴/۸
DC04_1	۳۶/۹	۳۵/۸	۳۶/۱	۳۶/۳	۳۶/۳
DC04_2	۳۶/۱	۳۶/۳	۳۵/۳	۳۵/۹	۳۵/۹
DC04_3	۳۶/۰	۳۶/۲	۳۶/۳	۳۶/۲	۳۶/۲

به دو روش حرکت خطی لغزنده روی یک مسیر تکراری و حرکت روی مسیرهای مجزا و موازی انجام شدند. نتایج حاصل از این بررسی به صورت خلاصه عبارتند از:

- صرف نظر از نوع آزمایش، شدت گالینگ در مورد ورق DC04 بسیار بیشتر از ورق DC06 است؛ به طوریکه گالینگ بعد از طی مسیر کوتاه‌تری رخ

مقادیر سختی دو ورق DC06 و DC04، قبل از انجام آزمایش سایش و به روش سختی‌سنجی برینل اندازه‌گیری شد که نتایج آن در **Error! Not a valid bookmark self-reference.** ارائه شده است. مشابه با اندازه‌گیری زبری، اندازه‌گیری سختی نیز روی سه نمونه از کلاف‌های ورق متفاوت انجام شد و اندازه‌گیری سختی برای هر نمونه سه بار تکرار شد. بر اساس داده‌های **Error! Not a valid bookmark self-reference.** میانگین سختی دو ورق بسیار به یکدیگر نزدیک است (میانگین سختی برینل ورق DC04 برابر با HBN ۳۶/۱ و میانگین سختی ورق DC06 برابر با HBN ۳۵/۱ است). با افزایش میزان سختی ورق، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب کاهش می‌یابد [۲۳] و در نتیجه آن احتمال رخ دادن گالینگ کم می‌شود [۲۴]. با توجه به اینکه مقادیر سختی دو ورق DC04 و DC06 بسیار نزدیک به یکدیگر است، این عامل تأثیر نامحسوسی در ایجاد گالینگ در قالب کشش عمیق GGG60 در استفاده از این ورق‌ها دارد.

باید توجه داشت که عوامل دیگری مانند نحوه اسیدشویی، مکانیزم روانکاری و پارامترهای فرایندی می‌تواند در وقوع گالینگ مؤثر باشد که نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۶- نتیجه‌گیری

بیشتر بودن سایش در استفاده از این نوع ورق باشد.

(۷) با وجود نزدیک بودن خواص مکانیکی، ترکیب شیمیایی و مقادیر زبری سطوح ورق‌های DC06 و DC04، بر اساس نتایج آزمایش SOFS می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ورق DC04 در قالب‌های کشش عمیق GGG60 بسیار مخرب خواهد بود.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از گروه صنعتی ایران خودرو و شرکت فولاد مبارکه اصفهان به دلیل در اختیار قرار دادن مواد اولیه و همراهی در انجام آزمایش‌ها و تهیه داده‌های مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۸- مراجع

- [1] Pereira MP, Yan W, Rolfe BF (2012) Wear at the die radius in sheet metal stamping. *Wear* 274-275: 355-367.
- [2] van der Linde G (2011) Predicting galling behaviour in deep drawing processes.
- [۳] بدخشیان ح، مرکانی مس، ملایی داریانی ب، پرویزی ع (۲۰۱۷) بررسی سایش گالینگ روی قالب‌های تولیدی ضربه‌ای حین کار با ورق فولادی پراستحکام پیشرفته. *مجله علمی پژوهشی مهندسی ساخت و تولید ایران* ۱۳-۱۹: ۳(۳).
- [4] Moghadam M, Christiansen P, Bay N (2017) Detection of the onset of galling in strip reduction testing using acoustic emission. *Procedia Eng* 183: 59-64.
- [۵] سیدمحمد ج، حمید مق، مهدی ب (۱۳۹۰) تشخیص عیب سایش سمبه با استفاده از روش انتشار صدا. *تحقیقات موتور* ۲۸-۲۱: ۲۴(۷).
- [6] Pereira MP, Weiss M, Rolfe BF, Hilditch TB (2013) The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping. *Int J Mach Tool Manu* 66: 44-53.
- [7] Olsson DD, Bay N, Andreassen JL (2004) Prediction of limits of lubrication in strip reduction testing. *CIRP Annals* 53(1): 231-234.
- [8] Sulaiman MH, Farahana RN, Bienk K, Nielsen CV, Bay N (2019) Effects of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in sheet-metal forming under dry

داده، عرض مسیر سایش در ورق DC04 بزرگتر بوده و سایش ایجاد شده در لغزنده نیز بیشتر است. در آزمایش گالینگ با استفاده از سطح انحنا دار لغزنده و با طی مسیرهای تقریباً یکسان (۱۵ متر) این نتایج حاصل شدند: در روش اول (مسیرهای تکراری)، عرض مسیر سایش در ورق DC04، ۲/۱۲ میلی‌متر و در ورق DC06، ۱/۳۳ میلی‌متر بدست آمد. در روش دوم (مسیرهای موازی)، عرض مسیر سایش در ورق DC04، ۰/۹۰ میلی‌متر و در ورق DC06، ۰/۷۹ میلی‌متر بود.

(۲) اگر لغزنده روی یک مسیر تکراری حرکت داده شود، سایش در مدت زمان کوتاه‌تری و با طی طول مسیر کوتاه‌تری نمایان می‌شود.

(۳) انجام آزمایش با حرکت دادن لغزنده در مسیرهای مجزا و موازی به شرایط واقعی شکل‌دهی ورق در قالب نزدیک‌تر است. با این وجود لازم است تا لغزنده روی مسیر طولانی‌تری حرکت داده شود تا میزان سایش قابل مشاهده‌ای ایجاد شود.

(۴) آزمایش‌های گالینگ با استفاده از سطح تخت لغزنده، سایش در سطوح تخت قالب را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در این حالت نیز سایش لغزنده و نیز عرض مسیر سایش در آزمایش با ورق DC04 نسبت به ورق DC06 بیشتر است. عرض مسیر سایش در آزمایش به روش اول و با طول لغزش ۲۰ متر، در ورق DC04، ۲/۵۲ میلی‌متر و در ورق DC06، ۲/۲۹ میلی‌متر بدست آمد.

(۵) نتایج حاصل از آزمایش گالینگ SOFS با مشاهدات صورت گرفته از سطح قالب‌های شکل‌دهی بدنه خودرو همخوانی خیلی خوبی نشان داد؛ به طوریکه آثار سایش لغزنده و نیز ذرات ساینده مشاهده شده در حین آزمایش، مشابه با مشاهدات صورت گرفته در استفاده از ورق‌های DC04 و DC06 در قالب کشش عمیق بدنه خودرو است.

(۶) اگرچه مقادیر زبری سطح ورق‌های DC06 و DC04 بسیار نزدیک به یکدیگر است، با این وجود زبری سطح کمتر ورق DC04 می‌تواند دلیلی بر

- [16] ASTM International (2017) ASTM G98-17, Standard Test Method for Galling Resistance of Materials. West Conshohocken, PA.
- [17] Mussa A, Krakhmalev P, Bergström J (2020) Sliding wear and fatigue cracking damage mechanisms in reciprocal and unidirectional sliding of high-strength steels in dry contact. *Wear* 444-445: 203119.
- [18] Lindvall F, Gåård A, Krakhmalev P, Bergström J (2013) Study of the influence of contact geometry and contact pressure on sliding distance to galling in the slider-on-flat-surface wear tester. *Tribol T* 56(6): 1137-1145.
- [19] Karlsson P, Krakhmalev P, Gåård A, Bergström J (2013) Influence of work material proof stress and tool steel microstructure on galling initiation and critical contact pressure. *Tribol Int* 60: 104-110.
- [20] ASTM (2000) E8M standard test methods for tension testing of metallic materials.
- [21] Becker WT, Shipley RJ, Lampman SR, Sanders BR, Anton GJ, Hrivnak N, et al. (2002) ASM handbook. *J Fail Anal Prev* 11: 1072.
- [22] Hirasaka M, Nishimura H (1994) Effects of the surface micro-geometry of steel sheets on galling behavior. *J Mater Process Technol* 47(1): 153-166.
- [23] Jang J, Kim W, Van Tyne C, Moon Y (2007) Experimental analysis on the frictional behaviour of drawbeads in sheet metal forming. *Steel Res Int* 78(12): 884-889.
- [24] Shailendra K (2011) An intelligent system for selection of materials for press tool components. *J Eng Res Stud* 2(2): 119-130.
- and oil-lubricated conditions: Experimental and numerical studies. *Wear* 438-439: 203040.
- [9] Dong W, Xu L, Lin Q, Wang Z (2017) Experimental and numerical investigation on galling behavior in sheet metal forming process. *Int J Adv Manuf Tech* 88(1-4): 1101-1109.
- [10] Moghadam M, Nielsen CV, Bay N (2020) Analysis of the risk of galling in sheet metal stamping dies with drawbeads. *P I Mech Eng B-J Eng* 0954405420911307.
- [11] van der Heide E, Stam ED, Giraud H, Lovato G, Akdut N, Clarysse F, et al. (2006) Wear of aluminium bronze in sliding contact with lubricated stainless steel sheet material. *Wear* 261(1): 68-73.
- [12] Karlsson P, Eriksson J, Gåård A, Krakhmalev P, Olsson M, Bergström J (2012) Galling resistance evaluation of tool steels by two different laboratory test methods for sheet metal forming. *Lubr Sci* 24(6): 263-272.
- [13] Gåård A, Krakhmalev P, Bergström J (2008) Wear mechanisms in deep drawing of carbon steel – correlation to laboratory testing. *Tribotest* 14(1): 1-9.
- [14] Cora N (2009) Development of Rapid Die Wear Test method for assessment of die life and performance in stampings of A/UHSS sheet materials. Diss VCU.
- [15] ASTM International (2016) ASTM G196-08(2016), Standard Test Method for Galling Resistance of Material Couples. West Conshohocken, PA.