



## بررسی سایش گالینگ روی قالب‌های تولیدی ضربه‌ای حین کار با ورق فولادی پر استحکام پیشرفته

حمیدرضا بدخشیان<sup>1</sup>، محمد سروش مرکانی<sup>2</sup>، بیژن ملایبی داریانی<sup>3</sup>، علی پرویزی<sup>4\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-4563، aliparvizi@ut.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

به منظور بهبود مقاومت بدنه و کاهش مصرف سوخت، در سال‌های اخیر، صنعت اتومبیل‌سازی بطور گسترده از فولادهای پر استحکام پیشرفته برای تولید اجزای مختلف بدنه خودرو استفاده می‌نماید. از سوی دیگر، استحکام بالاتر این نوع فولادها در مقایسه با فولادهای کشش عمیق مرسوم، باعث شده تا به منظور شکل‌دهی ورق، فشار بالاتری به سطوح ابزار و قطعه‌کار اعمال شود. این مسأله سبب کاهش طول عمر ابزار شده است. گالینگ، حالتی از خوردگی چسبندگی، به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل افزایش هزینه‌های نگهداری قالب و همچنین افزایش نرخ اسقاط مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق، به منظور مطالعه سایش گالینگ روی قالب تولیدی درب خودروی پژو 405 حین کار با DC04، انجام گرفته است. با استفاده از آزمون ارائه شده توسط استانداردهای بین‌المللی برای سنجش سایش گالینگ، مقاومت به سایش گالینگ در ورق‌های کشش عمیق مرسوم و ورق پر استحکام پیشرفته مقایسه شده است. اثر عوامل مختلف از جمله ترکیب شیمیایی ورق، عملیات حرارتی و فرایند نورد ورق، فشار ورق‌گیر، سختی و زبری قالب روی سایش گالینگ تعیین شده است. در پایان، راه‌حل‌های مناسب برای کاهش سایش در ابزار نظیر تغییر نسبت وزنی عناصر به کار رفته در ورق اولیه، پوشش‌دهی ابزار شکل‌دهی و تغییر در نیروی ورق‌گیر پیشنهاد شده است.

شکل‌دهی ورق‌های فلزی  
بدنه خودرو  
سایش قالب  
خوردگی چسبندگی  
گالینگ

## Investigation of Galling wear on stamping dies due to work with advances high strength steel sheets

Hamidreza Badakhshian<sup>1</sup>, Mohammad Shorouh Merkani<sup>2</sup>, Bijan Mollaei Dariani<sup>1</sup>, Ali Parvizi<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, aliparvizi@ut.ac.ir

### Keywords

Sheet Metal forming  
Automotive structure  
Wear of the die  
Adhesive wear  
Galling

### Abstract

In order to increase the strength of vehicles body as well as reduce the fuel consumption, usage of Advanced High Strength Steels (AHSS) as raw materials for producing car body parts has been increased significantly in the automotive industries during the recent years. From the other aspect, higher strength of these steel types in comparison to common deep drawing steels leads to higher contact pressure on tools faces (dies) and work pieces (steel sheets). This issue has caused lower tool life. Galling, as a state of adhesion corrosion, is one of the main reasons that increases the die maintenance costs and tool scrap rate. In this study, the galling wear of Peugeot 405 door production die has been investigated in which DC04 steel sheets are formed. Considering the international standard tests for galling wear and professional metal forming software, galling resistance of common deep drawing steels are compared with the advanced high strength steels. The effects of different parameters including chemical composition of sheet, heat treatments and rolling process, blank holder pressure, and hardness and roughness of die on galling wear are determined. At last, the proper solutions for decreasing the wear of the die including changing the chemical composition of initial blank, coating the forming tools, and changing blank holder pressure are proposed.

### 1- مقدمه

بین‌المللی و همچنین قوانین مربوط به کاهش آلایندگی

امروزه، افزایش الزامات ساختاری ایمنی توسط استانداردهای اتومبیل، نیاز به افزایش کارایی این صنعت از طریق استفاده از

Please cite this article using:

H.R. Badakhshian, M. Shorouh Merkani, B. Mollaei Dariani, A. Parvizi, Investigation of Galling wear on stamping dies due to work with advances high strength steel sheets, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 13-19, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روی آن نیز بر سایش قالب مؤثر است، گزارش نشده است. در موارد مشابه، اوکن [8] به بررسی اثر گالینگ در سایش آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت با استفاده از روش پین روی صفحه<sup>2</sup> پرداخت. بانسالی و میلر [9]، اثر انرژی عیوب لایه‌ای<sup>3</sup> را بر روی سایش گالینگ فلزات پایه کبالت با روش پین روی بلوک<sup>4</sup> بررسی کردند. وانگ و همکاران [10] اثر پوشش‌دهی به روش‌های نیتride کردن سطح و نفوذ حرارتی کاربرد به سطح در مقاومت به گالینگ ابزار شکل‌دهی را زمانی که با ورق پر استحکام پیشرفته در تماس باشد، مطالعه کردند. پودگورنیک و همکاران [11] خواص ضد گالینگ نیتride بور هگزگونال را در شکل‌دهی آلیاژهای آلومینیوم مطالعه کردند. بهاتاچاریا و همکاران [12] اثر گالینگ ورق‌های پر استحکام پیشرفته را روی قالب‌های تریم (برش اضافه‌کار) مورد مطالعه قرار دادند. کورا و همکاران [13]، سایش قالب را با پوشش‌های سطحی مختلف، ضمن کار با ورق‌های فولادی پر استحکام پیشرفته ارزیابی کردند. کورا و کوک [14] ویژگی‌های سایشی جنس‌های قالب مورد استفاده برای شکل‌دهی ورق‌های فولادی پر استحکام پیشرفته را مورد بررسی قرار دادند.

با بررسی پیشینه پژوهش مشخص شده که تاکنون اثر انرژی عیوب لایه‌ای و سایش گالینگ در ورق‌های فولادی پر استحکام پیشرفته بعنوان ماده خام مورد استفاده در صنایع خودروسازی برای تولید قطعات بدنه خودرو، گزارش نشده است. در این تحقیق تلاش شده است تا ضمن معرفی استاندارد G98 انجمن تست و مواد امریکا<sup>5</sup> برای مقایسه مقاومت به گالینگ در بین مواد مختلف، مقاومت به گالینگ بین دو نوع ورق کشش عمیق با مقدار انرژی عیوب لایه‌ای متفاوت، در مقابل آلیاژ GGG60 بر اساس استاندارد 1693 موسسه استاندارد آلمان<sup>6</sup> که یک آلیاژ پر کاربرد در ساخت قالب‌های شکل‌دهی است، بررسی شود. همچنین سعی شده است تا با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی شکل‌دهی و مدل کردن قالب مورد نظر، اثر پارامترهای کاری قالب شکل‌دهی بر روی سایش بدست آید. نتایج حاصل از این تحقیق برای انتخاب ماده اولیه به منظور ساخت قالب‌های شکل‌دهی و انتخاب ورق اولیه و تعیین پارامترهای کاری شکل‌دهی توسط صنایع خودروسازی مفید خواهد بود. تحقیقات آینده می‌تواند در زمینه یافتن بازه قابل قبول درصد عناصر محلول در ورق‌های فولادی پر استحکام پیشرفته، به منظور بروز

مواد سبک‌تر در ساخت اتومبیل را باعث شده است. به منظور اجرای این قوانین و استانداردها، صنایع خودروسازی به استفاده از فولادهای پر استحکام پیشرفته<sup>1</sup>، روی آورده‌اند. این ورق‌های فولادی ضمن کار با قالب‌های شکل‌دهی ورق، اثرات سایشی بیشتری نسبت به سایر ورق‌های فولادی مرسوم بروز می‌دهند. این موضوع با افزایش زمان تعمیر و نگهداری قالب، محدودیت در حجم تولید محصول را باعث می‌شود. از این رو، یافتن راهی برای کاهش میزان سایش در قالب‌های تولید بدنه خودرو که از ورق‌های فولادی پر استحکام پیشرفته استفاده می‌شود، به دلیل کاهش زمان تعمیر و نگهداری و در نتیجه کاهش قیمت محصول، مورد توجه واقع شده است.

بطور کلی عوامل مؤثر در سایش را از جنبه‌های متفاوتی می‌توان بررسی نمود. بخشی از این عوامل مربوط به متالورژی ورق و قالب و خواص سطحی آنهاست که تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی دارد. بخشی دیگر مربوط به پارامترهای کاری قالب‌های شکل‌دهی است.

تاکنون تحقیقات زیادی در مورد سایش لبه قالب‌ها ارائه شده است: عطاف و همکاران [1] با مطالعه توزیع تنش روی لبه قالب نشان دادند که پروفیل تنش روی لبه قالب دو نقطه ماکزیمم دارد. مکان نقطه ماکزیمم بزرگتر در ورودی و دیگری با توجه به زاویه خمش ورق روی لبه قالب، در ادامه شعاع قالب اتفاق می‌افتد. پریرا و همکاران [2] به بررسی دقت پروفیل لبه قالب پرداختند و نشان دادند که افزایش تیرانس لبه قالب بیش از حد قابل قبول 15 میکرومتر، موجب افزایش تنش‌های وارده به لبه قالب می‌شود. ونگ و همکاران [3] اثر نیروی ورق‌گیر و ضریب اصطکاک در توزیع تنش روی لبه‌های قالب را بررسی نمودند. کرخورن و همکاران [4] به مطالعه اثر ریزساختار فولاد قالب روی اصطکاک قالب با ورق که عاملی تأثیرگذار روی سایش قالب است، پرداختند. فلوسکی و ولترسن [5] به بررسی سایش در قالب‌های کشش عمیق در ابعاد میکرو پرداختند. سینگ و همکاران [6]، اثر سرعت فرایند شکل‌دهی و اثر روانکار را بر سایش لبه قالب در فورج داغ ارزیابی کردند. همچنین، ونگ و مسعود [7] به بررسی اثر پروفیل منحنی لبه قالب روی توزیع تنش در لبه قالب پرداختند.

اگرچه پارامترهای مؤثر بر توزیع تنش روی لبه قالب، به عنوان عامل اصلی در سایش قالب‌های شکل‌دهی ورق، به طور گسترده مورد تحقیق قرار گرفته‌اند، اما مطالعه ای در مورد اثر متالورژی ورق در تماس با قالب، به عنوان ماده‌ای که اثر تنش

<sup>2</sup> Pin on Plate<sup>3</sup> SFE: Stacking Fault Energy<sup>4</sup> Pin on Block<sup>5</sup> ASTM G98<sup>6</sup> DIN 1693 GGG60<sup>1</sup> AHSS: Advanced High Strength Steel

کمترین احتمال رخداد در گالینگ، متمرکز شود.

## 2- مکانیزم سایش گالینگ

بر اساس استاندارد G40 انجمن تست و مواد امریکا<sup>1</sup>، "گالینگ گونه‌ای از آسیب سطحی است که بین سطوحی که روی یکدیگر می‌لغزند، ایجاد می‌شود و با مشاهده میکروسکوپی زبرشدگی و نقاط برآمدگی محلی روی سطح اصلی، قابل تشخیص است." با لغزش سطوح فلزی روی یکدیگر، در اثر پدیده مکث و لغزش مقداری از سطح یک فلز به دیگری منتقل می‌شود. با ادامه فرایند و انتقال ماده بیشتر و روی هم انباشته شدن این رسوبات فلزی روی یکدیگر، به تدریج توده سخت و فشرده شده‌ای تشکیل می‌شود که می‌تواند استحکام تا 1500 مگاپاسکال داشته باشد [15]. این ذرات ضمن جدا شدن از سطح آشیانه خود و حرکت بین سطوح، موجب خراش‌های جدی روی سطوح فلزی (قالب و ورق) می‌شوند.

### 1-1- انرژی عیوب لایه‌ای و رابطه آن با سایش گالینگ

به طور کلی هر عاملی که باعث تسهیل لغزش صفحات کریستالی روی یکدیگر شود، به سایش گالینگ کمک می‌کند. مقاومت یک ماده در مقابل گالینگ، معمولاً با فاکتور انرژی عیوب لایه‌ای بیان می‌شود. مواد دارای انرژی عیوب لایه‌ای بالا مستعد گالینگ هستند. بانسالی و میلر [9] نشان دادند که کاهش انرژی عیوب لایه‌ای به کاهش تمایل فلز به گالینگ منجر می‌شود. جدول 1، میزان انرژی عیوب لایه‌ای برای عناصر مختلف را نشان می‌دهد. انرژی عیوب لایه‌ای برای عناصر مختلف و آلیاژهای گوناگون، متناسب با درصد وزنی آنها متفاوت است، بنابراین برای هر آلیاژ با توجه به عناصر محلول در آن باید از فرمول محاسبه معینی استفاده کرد. در مقایسه اولیه بین ورق‌های فولادی عاری از عناصر بین‌نشین<sup>2</sup> (IF) و ورق‌های AHSS، حتی با مساوی بودن میزان انرژی عیوب لایه‌ای، به دلیل بالا بودن درصد کربن و کاهش یافتن چسبندگی لایه‌های کریستالی در ورق‌های AHSS، می‌توان پیش‌بینی کرد که این ورق‌ها، استعداد بیشتری به لغزش لایه‌های کریستالی روی یکدیگر دارند.

جدول 1 میزان انرژی عیوب لایه‌ای برای عناصر مختلف [15]

عنصر	Al	Ag	Si	Ni	Cu	Mg
SFE(mJ/m <sup>2</sup> )	160-200	20-30	42<	90	70-78	125

در نتیجه مقاومت به گالینگ کمتری در مقایسه با نمونه‌های

فولادی IF مرسوم دارند. از آنجا که برای بالا نگه‌داشتن استحکام ورق نمی‌توان درصد کربن محلول را کاهش داد، باید میزان انرژی عیوب لایه‌ای ورق‌های AHSS در حد بهینه کنترل شود.

### 2-2- آزمون G98 برای مقایسه مقاومت به گالینگ [17]

استاندارد G98 انجمن تست و مواد امریکا برای مقایسه مقاومت به گالینگ مواد مختلف، چیدمانی مشابه شکل 1 پیشنهاد می‌دهد. مطابق این شکل، یکی از دو نمونه به صورت پین و دیگری به صورت بلوک بطور عمود در تماس با هم قرار می‌گیرند. پس از وارد کردن نیروی فشاری معین بر مجموعه پین و بلوک، پین یا بلوک (معمولاً پین) در شرایط خشک و بدون حضور روانکار، یک دور کامل در مقابل دیگری گردش می‌کند. زمان چرخش پین در مقابل بلوک باید بین 3 تا 20 ثانیه باشد. تمامی ابعاد پین و بلوک به جز قطر و تلرانس ابعادی قطر پین در اختیار کاربر قرار دارد. سایر الزامات مورد نیاز برای اجرای آزمایش در جدول 2 ارائه شده است.

قبل از اجرای هر آزمایش و برای زدودن چربی‌ها، ضروریست که پین با مایع تری‌کلرواتان شسته شود. همچنین بر طبق استاندارد می‌توان از هر وسیله مکانیکی یا هیدرولیکی که نیروی مورد نظر را بطور ثابت در طول آزمایش اعمال نماید، استفاده کرد.

### 3- مقایسه مقاومت به گالینگ ورق فولادی IF با ورق

#### AHSS

به منظور صحت‌گذاری بر پیش‌بینی انجام شده در بخش قبل مبنی بر کمتر بودن مقاومت به گالینگ ورق‌های AHSS نسبت به ورق‌های فولادی IF، با استفاده از چیدمان توصیه شده توسط استاندارد G98، به مقایسه مقاومت به گالینگ یک نمونه ورق فولادی IF با یک نمونه ورق AHSS مورد استفاده در تولید بدنه خودروی پژو 405 گروه صنعتی ایران‌خودرو پرداخته شده است.

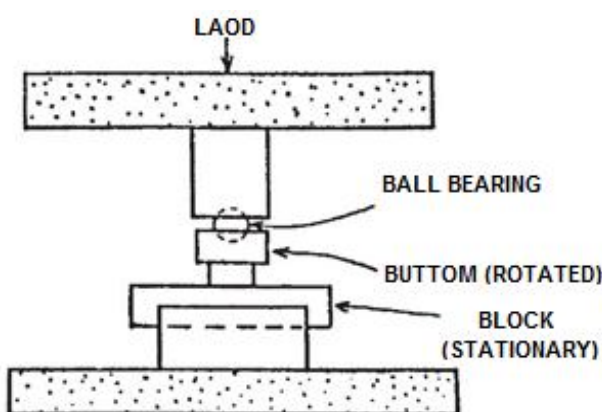
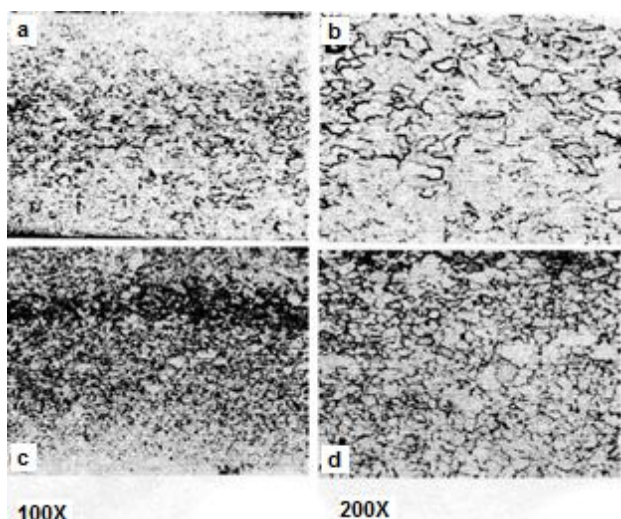


Fig. 1 G98 Standard Setup [17]

شکل 1 چیدمان آزمون استاندارد G98 [17]

<sup>1</sup> ASTM G40

<sup>2</sup> IF: Interstitial Free



**Fig. 2** Results of metallography for each sample: (a) IF sample with 100X magnification (b) IF sample with 200X magnification (c) AHSS sample with 100X magnification (d) AHSS sample with 200X magnification

شکل 2 نتیجه متالوگرافی ریزساختار هر یک از نمونه‌ها (a) ورق IF با بزرگنمایی 100X (b) ورق IF با بزرگنمایی 200X (c) ورق AHSS با بزرگنمایی 100X (d) ورق AHSS با بزرگنمایی 200X

**جدول 5** آنالیز عناصر نمونه ورق IF و ورق AHSS

**Table 5** Composition of IF and AHSS sheets

Ni	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	نمونه
0.007	0.001	0.001	0.09	0.011	0.007	0.014	0.004	IF
0.02	0.02	0.001	0.16	0.009	0.004	0.006	0.002	AHSS

Sn	Al	Co	Cu	Ti	V	W	نمونه
0.005	0.03	0.001	0.02	0.04	0.002	0.02	IF
0.004	0.037	0.004	0.01	0.001	0.002	0.01	AHSS

شکل 3، چیدمان آزمایش شامل نیروسنج به همراه نمایشگر ساخته شده برای اطمینان از مقدار و ثابت بودن نیروی اعمالی در طول آزمون، نشیمنگاه ورق، و همچنین پین ساخته شده همراه نگهدارنده آن بر روی کلگی دستگاه را نشان می‌دهد. بنابر پیشنهاد استاندارد، نیروی اعمالی از 90 کیلوگرم آغاز شده و با دوره‌های 10 کیلوگرم افزایش پیدا کرد. قبل از هر بار آزمایش، سطح پین برای تامین صافی مورد نیاز سنگ‌زنی و با مایع تری‌کلرواتان شسته شده است. اندازه نیروی اعمالی تا پیدایش آثار گالینگ در هر دو نمونه ورق فولادی تا نیروی 180 کیلوگرم ادامه پیدا کرده است.

**3-1- نتایج حاصل از مقایسه مقاومت به گالینگ**

آثار حاصل از دوران پین روی ورق در زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی 4 برابر در شکل 4 برای دو نمونه ورق نشان داده شده است.

شرایط موجود در اجرای آزمایش، در جدول‌های 2 و 3 ارائه شده است. مقایسه شرایط موجود در حین اجرای آزمایش و شرایط استاندارد، مطلوب بودن شرایط اجرای آزمایش را به خوبی نشان می‌دهد.

در این آزمایش از ورق DC04 بر اساس استاندارد انگلیسی 10130<sup>1</sup> به‌عنوان نمونه AHSS استفاده شده که مقدار ضخامت، سختی و زبری سطح هر نمونه در جدول 4 و همچنین آنالیز عناصر موجود در دو نوع ورق با سطح اطمینان 95% در جدول 5 ارائه داده شده است. ساختار زمینه هر کدام از نمونه‌ها بعد از اچ کردن با بزرگنمایی 100 و 200 برابر در شکل 2 نمایش داده شده است. متالوگرافی سطح هر دو نمونه نشان می‌دهد ساختار زمینه هر دو نمونه، فریتی می‌باشد.

برای اعمال نیروی عمودی کنترل شده و ثابت در طول اجرای آزمایش از یک دستگاه فرز دکل<sup>2</sup> ساخت ماشین‌سازی تبریز استفاده شده است. از مزایای استفاده از این دستگاه، نگهداشتن مجموعه اعمال نیرو در کلگی دستگاه فرز است که عمود بودن نیروی وارده بر پین و ورق در طول آزمایش را تضمین می‌کند.

**جدول 2** الزامات و شرایط موجود در اجرای آزمایش استاندارد G98

**Table 2** Requirements of G98 Test

ویژگی‌ها	شرایط استاندارد	شرایط آزمایش
زبری سطح ورق	0.25-1.1 micron	0.9-1.1 micron
زبری سطح پین	0.25-1.1 micron	0.26-1.26 micron
قطر پین	12.7 ± 0.08 mm	12.7 ± 0.04 mm
ارتفاع پین	10 mm	12 mm
زمان اجرای تست	3-20 sec.	4-6 sec.

**جدول 3** سایر شرایط موجود در اجرای آزمایش استاندارد G98

**Table 3** Conditions required for G98 test

شرایط	توضیحات
جنس پین	چدن GGG60
سختی پین	46 RC
تماس سطوح	خشک و بدون روان کار
عملیات حرارتی روی پین	سخت‌کاری شعله‌ای با گاز استیلن
اعمال نیرو	مکانیکی

**جدول 4** مشخصات نمونه ورق IF و AHSS

**Table 4** Specifications of IF and AHSS samples

نمونه	زبری سطح (R <sub>a</sub> , μm)	ضخامت (mm)	سختی HV (0.5 kgf)
AHSS	(0.81, 1.41)	0.7	183.6
IF	(1.03, 1.44)	0.7	144.4

<sup>1</sup> EN 10 130 DC04

<sup>2</sup> Machine Sazi Tabriz Deckel FP4M



تنش اعمالی روی ورق بصورت نری و مادگی بر روی ماتریس و ورق‌گیر قرار می‌گیرند و همچنین بلوک‌های فاصله انداز<sup>4</sup> که جهت کنترل کورس حرکتی ورق‌گیر و کنترل موضعی جریان و تنش در نقاط مختلف قالب مورد استفاده قرار می‌گیرند، در نظر گرفته شده است. در شکل 5، اجزای مدل‌سازی شده قالب مشاهده می‌شود.

در این شبیه‌سازی، کورس حرکتی ماتریس و ورق‌گیر به ترتیب برابر با 1050 و 170 میلی‌متر و در جهت پایین می‌باشد. سنبه در این فرایند ثابت است. همچنین کل زمان فرایند بر اساس تنظیمات موجود در کارخانه 4 ثانیه در نظر گرفته شده که 2 ثانیه آن مربوط به حرکت ماتریس از شروع حرکت تا درگیری ورق‌گیر و 2 ثانیه دیگر آن مربوط به حرکت هم‌زمان ماتریس و ورق‌گیر و انجام عملیات کشش می‌باشد. به این ترتیب، سرعت حرکت ماتریس قبل از درگیری با ورق‌گیر برابر با 440 میلی‌متر بر ثانیه و سرعت حرکت هم‌زمان ماتریس و ورق‌گیر برابر با 85 میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد.

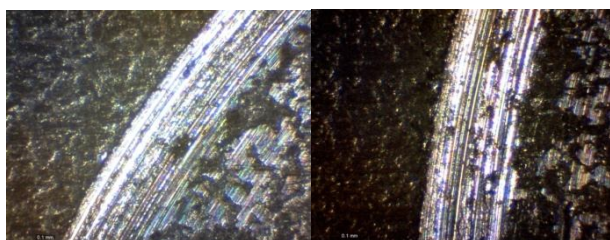


Fig. 4 Microscopic photo of wear area in samples, left picture shows the IF sample and right picture AHSS sample

شکل 4 تصویر میکروسکوپی مقاطع سایش یافته در ورق‌ها، شکل سمت چپ برای ورق IF و شکل سمت راست برای ورق AHSS است

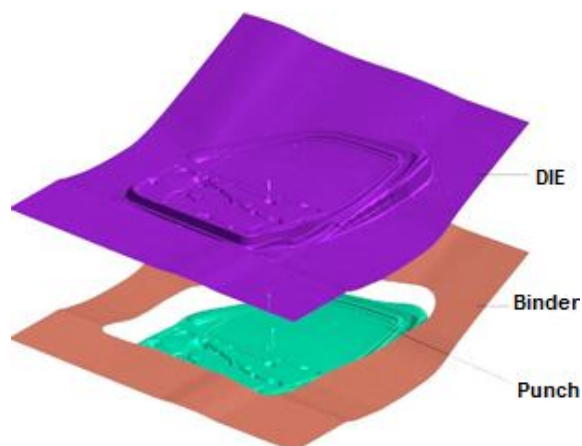


Fig. 5 Finite element model of die in deep drawing simulation.

شکل 5 مدل المان محدود اجزای مختلف قالب جهت شبیه‌سازی فرایند کشش

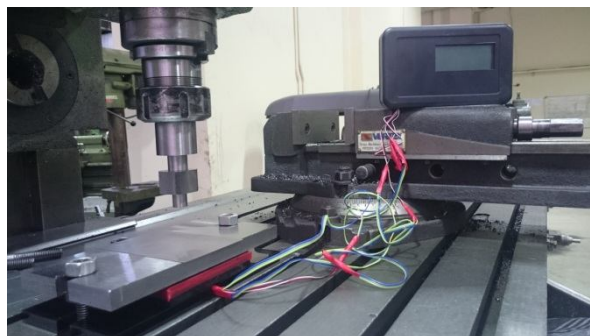


Fig. 3 Setup for G98 Test

شکل 3 چیدمان تهیه شده برای اجرای آزمون استاندارد G98

با توجه به افزایش باند سایش و افزایش میزان پارگی و شخم خوردگی سطح سایش یافته، آستانه پیدایش گالینگ در دو نمونه ورق تعیین شده است. ورق IF در 180 کیلوگرم یا 13/94 مگاپاسکال آثار گالینگ را از خود نشان داده، درحالی‌که ورق AHSS در 130 کیلوگرم یا 10/07 مگاپاسکال آثار گالینگ را از خود نشان داده است.

با مقایسه تنش ایجاد گالینگ در دو نمونه می‌توان نتیجه گرفت ورق AHSS نسبت به ورق IF مورد آزمایش، استعداد بیشتری برای رخداد گالینگ دارد. بنابراین، می‌توان سایش قالب‌های شکل‌دهی ورق در مرحله فرمینگ، را به این موضوع نسبت داد. تماس ورق و قالب در این مرحله، بر اساس فرایند مکث و لغزش، با اصطکاک بالا ضمن حرکت سطوح روی یکدیگر همراه است. هرچه استعداد گالینگ ورق بیشتر باشد، احتمال جدا شدن ذراتی از سطح ورق و تحمیل سایش به قالب، بیشتر می‌شود.

#### 4- بررسی نرم‌افزاری قالب شکل‌دهی

پس از مطالعه گالینگ و به منظور بررسی اثر پارامترهای کاری قالب شکل‌دهی لازم است تا با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود، میزان تنش و احتمال پارگی در قالب شکل‌دهی ارزیابی گردد. این بررسی در پاسخ به این پرسش که "آیا تنش به وجود آمده در سطوح قالب به میزان بحرانی برای پارگی ورق یا سایش قالب می‌رسد؟"، کاربرد دارد.

در این مطالعه، قالب مورد نظر، قالب تولید درب خودروی پژو 405، با استفاده از نرم افزار کتیا<sup>1</sup> مدل‌سازی شده و فرایند شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار اتوفرم<sup>2</sup> شبیه‌سازی شده است. تمامی جزئیات اجزای قالب شامل سنبه، ماتریس، ورق‌گیر، بیدهای<sup>3</sup> بکار رفته که به منظور کنترل سرعت کشیده شدن و

<sup>1</sup> Dassault Systems, CATIA Version 5.20

<sup>2</sup> AUTOFORM Plus R3

<sup>3</sup> Die Beads

<sup>4</sup> Distance Block

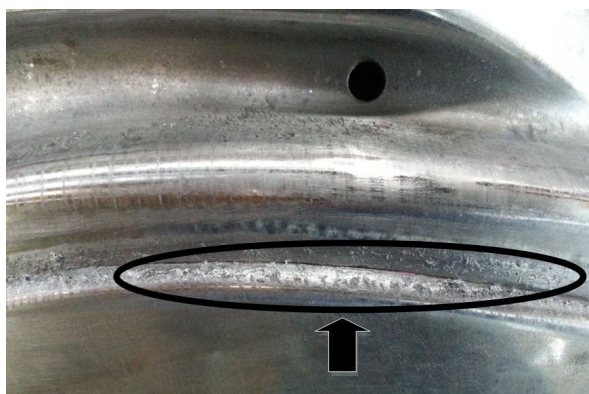


Fig. 7 Results of galling wear on die

شکل 7 اثرات سایشی ناشی از گالینگ در قالب شکل‌دهی

### 5- نتیجه‌گیری

همان‌طور که عنوان شد عوامل بسیار متعددی در سایش قالب‌های شکل‌دهی مؤثر هستند. از یک طرف مباحث مربوط به متالورژی ورق و مقاومت ورق در برابر گالینگ و همچنین ویژگی‌های اصطکاکی مطرح هستند و از طرفی دیگر مسائل مربوط به پارامترهای شکل‌دهی اهمیت دارند.

در تحقیق انجام شده مباحث مربوط به متالورژی ورق در راستای استعداد به گالینگ ورق‌های فولادی، بعنوان مکانیزم اصلی سایش در این قالب‌ها، مورد استفاده در صنایع خودروسازی مطرح و نشان داده شد که با تغییر در ترکیب شیمیایی ورق مورد استفاده می‌توان در جلوگیری از وقوع گالینگ تأثیر گذاشت. در ادامه و با اجرای آزمایش استاندارد G98، همین مسأله در بین دو نوع ورق مورد استفاده در صنایع خودروسازی، مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که یکی از علل سایش بیشتر قالب حین استفاده از ورق AHSS، استعداد به گالینگ بیشتر این ورق نسبت به ورق IF است. همچنین از آنجا که مکانیزم سایش در ارتباط مستقیم با اصطکاک بین ورق و قالب می‌باشد، تمامی مباحث تأثیرگذار در مقدار اصطکاک از جمله جهت نورد ورق مورد استفاده، روانکار و پوشش سطحی قالب در میزان سایش مؤثر است. هرچند که سخت‌کاری قالب و پوشش‌دهی سطحی آن همانند رسوب بخار شیمیایی<sup>1</sup> و رسوب بخار فیزیکی<sup>2</sup> ترکیبات تیتانیم و کروم در تحمل تنش‌های وارده به آن نیز اثرگذار است.

از جنبه‌های دیگر و با بررسی نرم‌افزاری قالب شکل‌دهی نشان داده شد که طی فرایند کشش عمیق، با افزایش تنش‌های نرمال و برشی وارده بر ورق، احتمال بروز سایش گالینگ بیشتر می‌شود. این مسأله، به خوبی خود را در لبه‌های قالب که تحت

روان‌کار مورد استفاده بصورت ثابت بر روی سطوح سنبه و ماتریس و بصورت استاندارد کشش عمیق بگونه‌ای تعیین شده تا ضریب اصطکاک برابر با 0/15 شود. البته در واقعیت، این مقدار با توجه به فشار پرس متغیر بوده و برای نزدیکی بیشتر به واقعیت و بر اساس میزان فشار اعمالی در نقاط مختلف قالب، نرم افزار تغییرات لازم را به صورت خودکار انجام می‌دهد. با توجه به تنظیمات موجود در کارخانه، مقدار نیروی ورق‌گیر برابر با 70 تن نیرو قرار داده شده است. هرچند که متغیر کردن آن بر اساس زمان و کورس حرکتی تغییراتی را به همراه خواهد داشت که موجب کنترل بیشتر روی چین‌خوردگی‌ها و پارگی‌ها خواهد شد.

### 4-1- نتایج حاصل از بررسی نرم‌افزاری

شکل 6، تحلیل المان محدود نرم‌افزار در مورد تنش‌های عمودی اعمال شده در فرایند شکل‌دهی را نمایش می‌دهد. این بررسی نشان می‌دهد مقدار تنش در مناطق تمرکز تنش، یعنی در لبه‌ها به بیش از 100 مگاپاسکال می‌رسد. مطابق شکل 6، لبه بالا سمت راست تودری (منظور قطعه تولیدی قالب است)، منطقه خطرناک از لحاظ توزیع تنش با مقادیر بالای 100 مگاپاسکال است. از این رو هنگام کار قالب با ورق پر استحکام پیشرفته انتظار می‌رفت تا علائم سایش و خرابی در این بخش زودتر از سایر بخش‌های قالب، بروز پیدا کند. مطابق شکل 7، اثرات سایشی استفاده از ورق AHSS روی قالب در بخش مورد انتظار به مقدار بیشتر و وسیع‌تر ایجاد شد که بدین ترتیب انتظارات حاصل از بررسی نرم‌افزاری، تطبیق خوبی با واقعیت نشان داد. به عبارت دیگر، مناطق پر تنش در بررسی نرم‌افزاری، دقیقاً همان مناطقی هستند که در قالب و بصورت واقعی دچار سایش شدید شده‌اند.

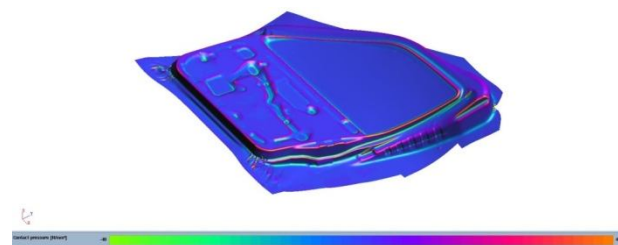


Fig. 6 Normal stresses in the final stage of drawing process (MPa)

شکل 6 تنش‌های عمودی اعمالی در انتهای فرایند شکل‌دهی بر حسب مگاپاسکال

<sup>1</sup> Chemical Vapor Deposition (CVD)

<sup>2</sup> Physical Vapor Deposition (PVD)

- processing of advanced high strength steels, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1118-1128, 2011.
- [8] H. Ocken, The galling wear resistance of new iron-base hardfacing alloys: a comparison with established Cobalt- and Nickel-base alloys, *Surface and Coating Technology*, Vol. 76-77, pp. 456-461, 1995.
- [9] K. J. Bhansali, A. E. Miller, The role of stacking fault energy on galling and wear behavior, *Wear*, Vol. 75, pp. 241-252, 1982.
- [10] Wang, Wurong, et al. Influence of surface modification on galling resistance of DC53 tool steel against galvanized advanced high strength steel sheet. *Wear* 360, pp. 1-13, 2016.
- [11] Podgornik, B., et al. Friction and anti-galling properties of hexagonal boron nitride (h-BN) in aluminium forming. *Wear*, 2017, In Press.
- [12] Bhattacharya, Sandeep, et al. *Wear of D2 Tool Steel Dies during Trimming DP980-type Advanced High Strength Steel (AHSS) for Automotive Parts*. No. 2017-01-1706. SAE Technical Paper, 2017, In Press.
- [13] O. N. Cora, A. Agcayazi, K. Namiki, H. Sofuoglu, M. Koc, Die wear in stamping of advanced high strength steels Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings, *Tribology International*, Vol. 52, pp. 50-60, 2012.
- [14] O. N. Cora, M. Koc, Experimental investigations on wear resistance characteristics of alternative die materials for stamping of Advanced High Strength Steels (AHSS), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 897-905, 2009.
- [15] E. Schedin, B. Lehtinen, Galling mechanisms in lubricated systems: A study of sheet metal forming, *Wear*, Vol. 170, pp. 119-130, 1993.
- [16] J. A. Venables, The electron microscopy of deformation twinning, *Journal of physics and chemistry solids*, Vol. 25, pp. 685-690, 1964.
- [17] ASTM, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. *G40* 2013.
- بیشترین تنش هستند، نشان داد. مقایسه تنش نرمال بدست آمده در تست G98 و تنش پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار المان محدود و مطابقت خوب آنها با یکدیگر، صحت شبیه‌سازی را صحت‌گذاری نمود. بنابراین می‌توان با تغییر در پارامترهای کاری شکل‌دهی از جمله تناژ دستگاه، محل و اندازه بیدها و بلوک‌های فاصله‌انداز به کار رفته و سرعت حرکت اجزای قالب حین اجرای فرایند، تا حدود زیادی از سایش قالب جلوگیری کرد.

## 6- مراجع

- [1] D. Attaf, L. Penazzi, C. Boher, C. Levaillant, Mechanical study of a sheet metal forming dies wear, *6th International Tooling Conference*, Karlstad, Sweden, 10–13 September 2002.
- [2] M. P. Pereira, M. Weiss, B. F. Rolfe, T. B. Hilditch, The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 66, pp. 44-53, 2013.
- [3] X. Z. Wang, S. H. Masood, M. E. Dingle, An investigation on tool wear prediction in automotive sheet metal stamping die using numerical simulation, *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, March 18-20, 2009.
- [4] [Kirkhorn, Lanny, et al. The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming. *Wear* 302.1 , pp.1268-1278 , 2013.
- [5] Flosky, H., and F. Vollertsen. Wear behaviour in a combined micro blanking and deep drawing process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 63.1, pp. 281-284, 2014.
- [6] A. K. Singh, B. W. Rooks, S. A. Tobias, Factors affecting die wear, *Wear*, Vol. 25, pp. 271-279, 1973.
- [7] X. Z. Wang, S. H. Masood, Investigation of die radius arc profile on wear behaviour in sheet metal