



استفاده از میدان مغناطیسی جهت کاهش بازگشت فنری در خم کاری ورق آلومینیوم ۱۰۵۰

حسین عیدی^۱، ایمان زهورکاری^۲، مسعود رخس خورشید^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: rakshshkhorshid@birjandut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

خم کاری

بازگشت فنری

میدان مغناطیسی

آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰

بازگشت فنری یکی از عیوب رایج فرایندهای شکل‌دهی ورق مخصوصاً خم کاری است که به دلیل آزاد شدن کرنش‌های الاستیک پس از باربرداری روی می‌دهد. برای به حداقل رساندن و یا حذف این پدیده از روش‌های نوینی مانند جریان الکتریکی پالسی و شکل‌دهی الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. در این مقاله، برای اولین بار از میدان مغناطیسی برای کاهش بازگشت فنری استفاده شده است. مطالعه بر روی آلومینیوم ۱۰۵۰ انجام و مشاهده شد با اعمال میدان مغناطیسی از مقدار بازگشت فنری کاسته می‌شود. با انجام آزمایش کشش معین شد که اعمال میدان مغناطیسی در هنگام تغییر شکل موم‌سان منجر به افزایش استحکام می‌شود. بنابراین، وجود ناحیه پلاستیک با استحکام بالاتر در کنار ناحیه تغییر شکل الاستیک عامل کاهش بازگشت فنری شناخته شد. علاوه بر این، پارامترهای مؤثر بر بازگشت فنری شامل عرض ورق، سرعت سنبه و جهت نورد در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی استاتیکی بررسی شد. از روش سطح پاسخ برای بیان بازگشت فنری به‌عنوان تابعی درجه دوم از پارامترهای مؤثر استفاده و برای بررسی اثر پارامترها تحلیل واریانس انجام شد. با توجه به تحلیل واریانس انجام شده معین شد که میدان مغناطیسی می‌تواند باعث کاهش اثربخشی جهت نورد و سرعت سنبه بر بازگشت فنری در فرایند خم کاری ورق مورد مطالعه شود؛ درحالی‌که بر اثر بخشی عرض ورق اثری ندارد. در پایان، تغییر خواص مکانیکی در تغییر شکل پلاستیک با اثر مگنتو پلاستیسیته شرح داده شد.

The use of magnetic field to reduce the spring back in bending of aluminum sheet 1050

Hossein Eidi¹, Iman Zohourkari², Masoud Rakhshkhorshid^{3*}

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* Corresponding Author's Email: rakshshkhorshid@birjandut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 21 January 2024

Accepted: 21 March 2024

Keywords:

Bending

Spring Back

Magnetic Field

1050 aluminum alloy

Abstract

Spring back is one of the common defects in metal forming processes, especially in the bending process, which occurs due to the release of elastic strains after loading. To minimize or eliminate this phenomenon, new methods such as pulsed electric current and electromagnetic forming are used. In this study, the use of magnetic field to reduce the spring back is used for the first time. The research was conducted on 1050 aluminum alloy and it was observed that magnetic field causes the reduction of spring back. Performing the tensile testing, it was determined that exposing the magnetic field, during the plastic deformation, causes the increase in the strength (i.e. the flow stress). So, the existence of a plastic region with higher strength in the neighborhood of the elastic region was distinguished as the reason of the reduction in the spring back. Moreover, the effective parameters on spring back, including sheet width, mandrel speed and rolling direction were investigated for both cases of with and without exposing the static magnetic field. Response surface method was used to express the spring back as a function of these parameters and analysis of variance was used to investigate the effectiveness of these parameters. It was determined that the magnetic field can reduce the effectiveness of the rolling direction and spindle speed on the spring back of the studied sheet in bending; while, it has no effect on the effectiveness of the sheet. Finally, the change in the mechanical properties was described by magneto-plastic effect.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Eidi H, Zohourkari I, Rakhshkhorshid M. The use of magnetic field to reduce the spring back in bending of aluminum sheet 1050. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):15-27. doi: 10.22034/IJME.2024.434812.1912 [In Persian]

۱- مقدمه

خم کاری و شکل دهی ورق های فلزی در بسیاری از صنایع از جمله خودروسازی، هوافضا، پتروشیمی، نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. در فرایندهای شکل دهی و خم کاری فلزات، شکل پذیری مواد موضوعی کلیدی است که کارایی و موفقیت یک فرایند را می تواند تضمین کند. به روش سنتی، شکل پذیری مواد از طریق فرایندهای شکل دهی تدریجی و یا با اعمال حرارت مانند فرایندهای گرم کاری موضعی ممکن است بهبود یابد. در شکل دهی گرم، از پاسخ معمول مواد به دما، یعنی کاهش تنش سیلان و افزایش شکل پذیری استفاده می شود، اما اغلب ریزساختار مواد تحت تأثیر قرار می گیرد و عملیات حرارتی پس از شکل دهی مورد نیاز است [۲-۵]. به دلیل خاصیت الاستیک در فلزات و آزاد شدن بخشی از کرنش های الاستیک پس از باربرداری، یکی از عیوبی که در شکل دهی به ویژه خم کاری مشاهده می گردد، بازگشت فنی است که باعث تغییر زاویه خم نسبت به زاویه مطلوب می گردد. بازگشت فنی موجب عدم دقت ابعادی و هندسی می شود؛ بنابراین، بررسی و تحلیل پارامترهای تأثیرگذار در ایجاد، کنترل و مهار این پدیده دارای اهمیت است. با توجه به ارتباط مستقیم رفتار ماده حین تغییر شکل پلاستیک با بازگشت فنی، روش های مختلفی به منظور تأثیر بر رفتار پلاستیک ماده حین شکل دهی استفاده شده است [۷-۱۰]. وانگ و همکاران [۸] طی پژوهشی با عنوان مکانیسم شرایط میدان مغناطیسی بر رفتار تغییر شکل ورق فلزی با استفاده از قالب انعطاف پذیر قابل تنظیم به تأثیر میدان مغناطیسی بر منحنی بارگذاری، ارتفاع گنبد برآمدگی و توزیع کرنش در راستای ضخامت پرداخت. از سیال رئومغناطیسی به عنوان قالب انعطاف پذیر قابل تنظیم استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر نیروی برآمدگی با افزایش چگالی شار مغناطیسی افزایش می یابد. شرایط میدان مغناطیسی مناسب و محتوای ذرات مغناطیسی می تواند شکل پذیری را بهبود بخشد و اعمال میدان مغناطیسی تأثیر قابل توجهی بر منحنی بارگذاری، ارتفاع گنبد برآمدگی و توزیع کرنش نمونه های برآمده دارد. هر چه کسر حجمی ذرات مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی در سیال میدان مغناطیسی بزرگ تر باشد، نیروی برآمدگی در شرایط آزمایش مشابه بیشتر است. ارتفاع برآمدگی بالاتر و توزیع کرنش یکنواخت تر را می توان تحت ترکیب مناسبی از محتوای ذرات مغناطیسی و شرایط میدان مغناطیسی به دست آورد که عملکرد شکل دهی ورق را بهبود می بخشد [۷]. گیو و همکاران [۹] اثر میدان مغناطیسی را بر رفتار خستگی و پاسخ مکانیکی فولاد CrMo35 را بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد چرخه عمر خستگی حدود 10 تا 15 درصد تحت میدان مغناطیسی 1.2 تا 1.3 تسلا افزایش می یابد. همچنین افزایش ناچیز تنها 5 تا 8 مگا پاسکال در استحکام نمونه مورد مطالعه مشاهده گزارش شده است. در این مقاله کم بودن اثر میدان مغناطیسی به پایداری فاز و ریزساختار این ماده در دمای اتاق نسبت داده شده است و افزایش اندک چرخه های عمر خستگی و خواص مکانیکی اثر میدان مغناطیسی بر حرکت و توزیع نابجایی ها نسبت داده شده است [۹]. ناواز و همکاران [۱۰] اثر میدان مغناطیسی را بر ریزساختار بینیتی و خواص مکانیکی فولاد Si3MnCr70 بررسی کردند. مشاهده ریزساختار نشان داد که با اعمال میدان مغناطیسی در طول فرایند آستمپرینگ، ریزساختار به طور چشمگیری ریزدانه می شود و کسر حجمی فریت بینیتی افزایش می یابد. سرعت جوانه زنی بالای فریت بینیتی ناشی از انرژی بالای میدان مغناطیسی می تواند باعث این اثر مثبت باشد. فو و همکاران [۱۱] پژوهشی تحت عنوان ریزساختار انجمادی و خواص مکانیکی آلیاژ Mg-Al-Zn تحت میدان مغناطیسی پالسی کم ولتاژ انجام دادند. در این مقاله به این نتیجه رسیدند که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی تحت شرایط ریخته گری نیمه پیوسته با میدان مغناطیسی پالسی ولتاژ پایین افزایش می یابد. با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است آلیاژ تحت اعمال میدان مغناطیسی کم ولتاژ باعث کاهش اندازه دانه می شود [۱۱]. ریزساختار و خواص آلیاژ AlCoCrCuFeNi با آنتروپی بالا منجمد شده تحت میدان مغناطیسی شدت بالا توسط دنگ و همکاران [۱۲] مطالعه شده است. برای تنظیم ریزساختار و خواص آلیاژ AlCoCrCuFeNi از میدان مغناطیسی استاتیکی شدت بالا استفاده شد. نتایج نشان داد با اعمال میدان مغناطیسی شدت بالا ریزساختار را به وضوح تغییر نمی کند؛ اما می تواند مقدار فاز BCC غنی از FeCr را بهبود بخشد. تنش تسلیم و کرنش پلاستیک نیز هم زمان بهبود یافت و مقدار مغناطش اشباع هم افزایش یافت. لیو و همکاران [۱۳] اثر میدان مغناطیسی متناوب را بر ریزساختار و خواص مکانیکی را در پیرسختی آلومینیوم AA2219 بررسی کردند. اثر میدان مغناطیسی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA2219 رسوب سختی شده توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری، اندازه گیری سختی ویکرز و آزمون کشش مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی متناوب می تواند به طور قابل توجهی سختی و استحکام را افزایش دهد. با استفاده از نتایج میکروسکوپ الکترونی عبوری، مشخص شد که فاز رسوب Al2Cu کوچک تر و پراکنده تر می شود که مانع حرکت نابجایی ها می شود

[۱۳]. اثر اعمال میدان مغناطیسی طی فرایندهای جوشکاری و تراشکاری بر رفتار و خواص مکانیکی آلیاژها نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. در مطالعه لی و همکاران [۱۶] با انجام آزمون کشش تحت اعمال میدان مغناطیسی، اثر میدان مغناطیسی متناوب بر خواص مکانیکی استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی آلومینیوم 2024 بررسی شده است. نتایج نشان داده است خواص مورد بررسی در شرایط بهینه یک تسلا و دوره تناوب ۳۰ بر ثانیه به ترتیب ۹،۳ و ۳۰،۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. علت تغییر خواص مکانیکی با اعمال میدان مغناطیسی تحت عنوان اثر مگنتو پلاستیسیته^۱ معرفی شده است که با مشاهده ریزساختاری معین شده است که افزایش چگالی نایجایی‌ها و ریزدانه شدن ریزساختار باعث بهبود این خواص مکانیکی است. شکل‌دهی الکترومغناطیسی به وسیله یک پالس مغناطیسی قوی صورت می‌گیرد و در واقع استفاده از نیروی الکترومغناطیسی برای شکل دادن فلزات می‌باشد. در شکل‌دهی الکترومغناطیسی ابتدا با برقراری مدار الکتریکی جریان از مولد جاری شده و بانک خازن با ولتاژ مناسبی شارژ می‌شود سپس این بانک خازن وارد مداری شامل یک سیم‌پیچ می‌شود. با تخلیه خازن جریان بزرگی تولید می‌شود که از درون یک سیم‌پیچ که در نزدیکی قطعه کار قرار دارد عبور می‌کند و باعث تولید میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ و فاصله هوایی بین سیم‌پیچ و قطعه کار می‌شود. این میدان مغناطیسی یک جریان گردابی مخالف با جریان اولیه در قطعه کار هادی القا می‌کند. تأثیر متقابل جریان‌های گردابی با میدان مغناطیسی خارجی باعث ایجاد نیروی دافعه بین سیم‌پیچ و قطعه کار می‌شود. این نیرو باعث حرکت و تغییر شکل قطعه کار می‌گردد. برخورد سریع قطعه کار به قالب دز اثر اعمال نیروی زیاد به آن باعث تغییر شکل پلاستیک قطعه کار شده و قطعه شکل قالب را به خود می‌گیرد [۱۷]. در این مقاله، اثر میدان مغناطیسی بر خم کاری آلیاژ آلومینیوم 1050 بررسی شده است. در این مقاله نیروی لازم جهت خمکاری توسط حرکت سنبه تأمین می‌گردد و قطعه کار فقط تحت اعمال میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. در حقیقت هدف اصلی این مقاله بررسی اثر میدان مغناطیسی بر بازگشت فنری در فرایند خمکاری است. همچنین به منظور بررسی چگونگی اثر میدان مغناطیسی بر رفتار مکانیکی آلیاژ مورد مطالعه از آزمایش کشش استفاده شد. علاوه بر این، پارامترهای مؤثر بر بازگشت فنری شامل عرض ورق، سرعت سنبه و جهت نورد در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی استاتیکی بررسی شد. تأثیر میدان مغناطیسی بر اثربخشی پارامترهای مورد مطالعه نیز تعیین گردید.

۲- مواد و آزمایش‌ها

به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی بر بازگشت فنری در فرایند خم کاری ورق آلومینیوم 1050، آزمایش‌های خم کاری به کمک قالب نیم استوانه ساخته شده از پلی‌اتیلن و دستگاه فرز NC در دو حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی و با اعمال میدان مغناطیسی ثابت (حدود یک تسلا) انجام شد. پارامترهای مؤثر از جمله سرعت سنبه، عرض نمونه خم کاری و جهت نورد ورق به عنوان متغیرهای فرایند در نظر گرفته و مطالعه برای هر یک از پارامترها در سه سطح انجام شد. بدین منظور، نمونه‌های خم کاری مورد استفاده در سه عرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر و در جهت‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، توسط برش لیزر، برش داده شد. قالب خم کاری از پلی‌اتیلن با شعاع 15 میلی‌متر توسط دستگاه فرز کنترل عددی رایانه‌ای ساخته شد. لازم به ذکر است که زاویه قالب (زاویه نمونه بدون بازگشت فنری) برای قالب ۷۳ درجه بود که در محاسبه بازگشت فنری لحاظ شده است.

آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ضخامت ۱ میلی‌متر، طول ۹۰ میلی‌متر و عرض‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر انجام شد. برای اعمال میدان مغناطیسی، از دو عدد آهنربای نئودیمیوم گرید ۴۲ استفاده گردید. شدت میدان مغناطیسی آهنربای نئودیمیوم از شبیه‌سازی در نرم‌افزار تجاری ماکسول^۲ مطابق شکل ۱ به دست آمد. جزئیات این شبیه‌سازی موضوع این مقاله نیست و در مرجع [۱۸] ارائه شده است.

تجهیزات مورد استفاده برای انجام خم کاری با سرعت کنترل شده، شامل یک دستگاه فرز دکل کنترل عددی، قالب خم کاری و آهنربای نئودیمیوم گرید ۴۲ به ابعاد ۲۰ در ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر مطابق شکل ۲ استفاده شد.

با توجه به پارامترهای مشخص شده جهت خم کاری برای طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۳ برای پیاده‌سازی روش سطح پاسخ، تحلیل واریانس و ارتباط پارامترها استفاده گردید. در این مقاله، از طرح مرکب مرکزی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده

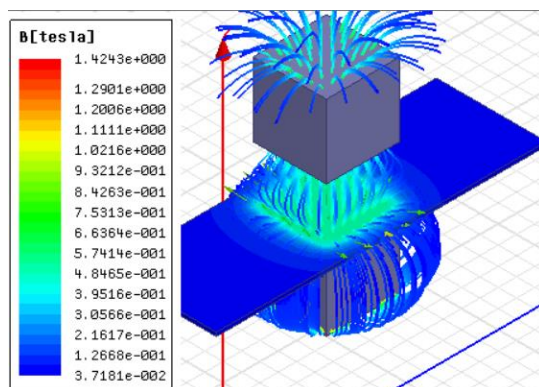
¹ Magnetoplasticity Effect

² MAXWELL

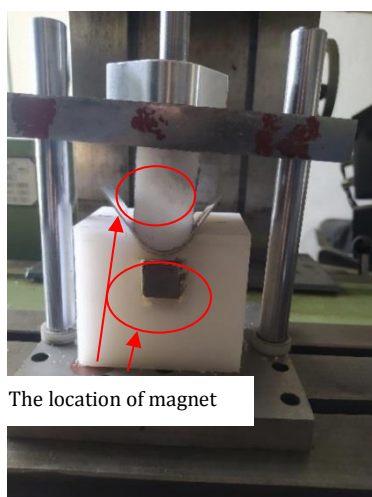
³ Design Expert

شد. در مجموع، ۲۰ آزمایش بدون میدان مغناطیسی و ۲۰ آزمایش با میدان مغناطیسی انجام شد. آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ به همراه پاسخ بازگشت فنری محاسبه شده ارائه شده است.

لازم به ذکر است؛ به منظور اندازه‌گیری زاویه نهایی خم و بازگشت فنری در این مقاله، طبق شکل ۳-الف سطح مقطع نمونه‌های خم کاری شده قبل از باربرداری توسط اسکرن کائن^۱، اسکن و با استفاده از نرم‌افزار ایمیج متر^۲، زاویه خم محاسبه و سپس طبق شکل ۳-ب زاویه بعد از باربرداری توسط زاویه‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۰٫۱ درجه اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ماکسول [۱۸]



(ب)

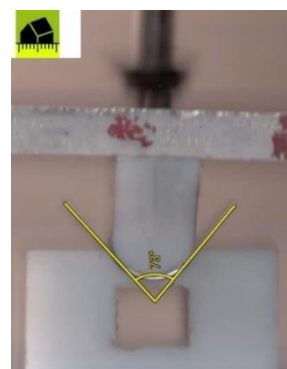


(الف)

شکل ۲ تجهیزات انجام آزمایش شامل الف) یک دستگاه فرز دکل و ب) قالب مورد استفاده به همراه مغنت



(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) نمونه اسکن شده و اندازه‌گیری زاویه قبل باربرداری و ب) اندازه‌گیری زاویه نمونه خم بعد از باربرداری توسط زاویه‌سنج

¹ Canon

² Imagemeter

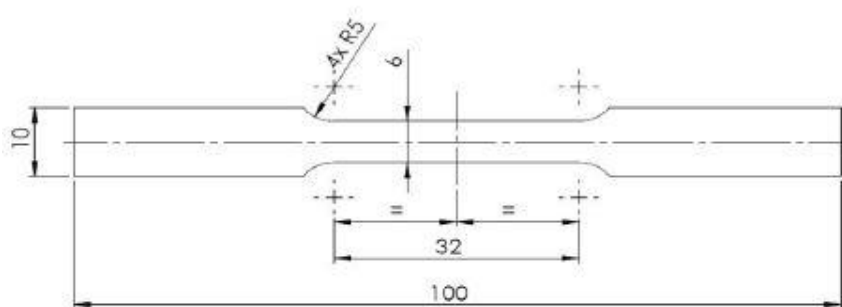
جدول ۱ جدول آزمایش‌های طراحی‌شده به همراه پاسخ بازگشت فنری

شماره آزمایش	جهت نورد (درجه)	عرض نمونه (میلی‌متر)	سرعت (میلی‌متر بر دقیقه)	بازگشت فنری با میدان مغناطیسی (درجه)	بازگشت فنری بدون میدان مغناطیسی (درجه)
1	0	10	100	2.3	6.3
2	0	10	500	3.3	5.3
3	0	30	100	10	12
4	0	30	500	9.2	11.25
5	90	10	100	5.3	7.4
6	90	10	500	4.3	7.4
7	90	30	100	12	14.3
8	90	30	500	11.3	14.3
9	45	20	100	9.2	12
10	45	20	500	9	11.3
11	45	10	300	5	8.5
12	45	30	300	11.2	13.3
13	0	20	300	7	9.2
14	90	20	300	9.3	12
15	45	20	300	5.3	11.4
16	45	20	300	5.3	11.4
17	45	20	300	5.3	11.4
18	45	20	300	5.3	11.4
19	45	20	300	5.3	11.4
20	45	20	300	5.3	11.4

دو آهنربا نئودیمیوم در سنبه و ماتریس جاسازی و آزمایش‌ها طراحی‌شده توسط دیزاین اکسپرت انجام شد و سپس آزمایش‌ها بدون اعمال میدان مغناطیسی نیز گرفته شد و نتایج آن به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت داده و خروجی‌های آن در ادامه مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله مقدار بازگشت فنری به صورت تفاضل زاویه نمونه خم‌شده در آخرین مراحل بارگذاری و زاویه نهایی نمونهی خم‌شده پس از باربرداری محاسبه شد. همچنین، باهدف بررسی اثر میدان مغناطیسی بر رفتار مکانیکی (استحکام و شکل‌پذیری) آلیاژ آلومینیوم 1050 آزمایش کشش تک‌محوره انجام شد. برای انجام آزمایش، از نمونه‌های کوچک اندازه مطابق استاندارد ATSM E8 استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ و شکل ۴ بیان شده است.

جدول ۲ مشخصات اولیه آزمون کشش و نمونه‌های کوچک اندازه مورد استفاده.

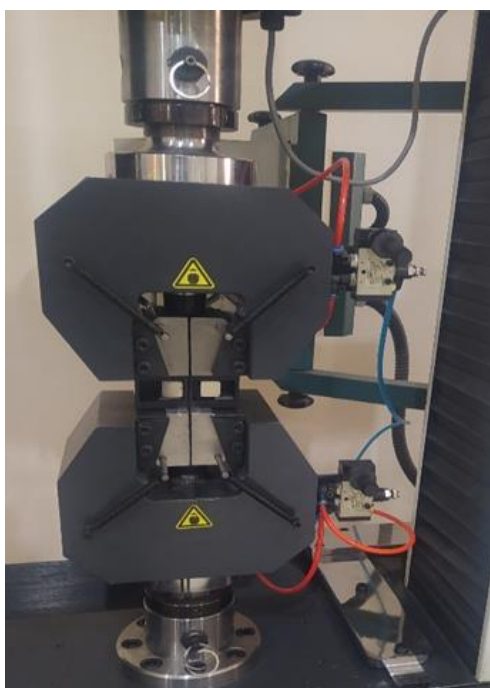
ضخامت (میلی‌متر)	عرض گیج (میلی‌متر)	طول گیج (میلی‌متر)	سرعت آزمون (میلی‌متر بر دقیقه)
1	6	32	1



شکل ۴ طرح‌واره نمونه آزمون کشش

میدان مغناطیسی ایجادشده توسط دو آهنربا نئودیمیوم گرید ۴۲ مطابق با شکل ۵ در دستگاه آزمون کشش جایگذاری شد. جهت میدان مغناطیسی اعمالی به نمونه آزمون کشش همانند جهت میدان در قالب خم کاری می‌باشد (جهت میدان مغناطیسی عمود بر

سطح عرض نمونه). نتایج به صورت نمودارهای تنش کرنش حقیقی در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی در بخش بعدی مقاله ارائه و بحث شده است.



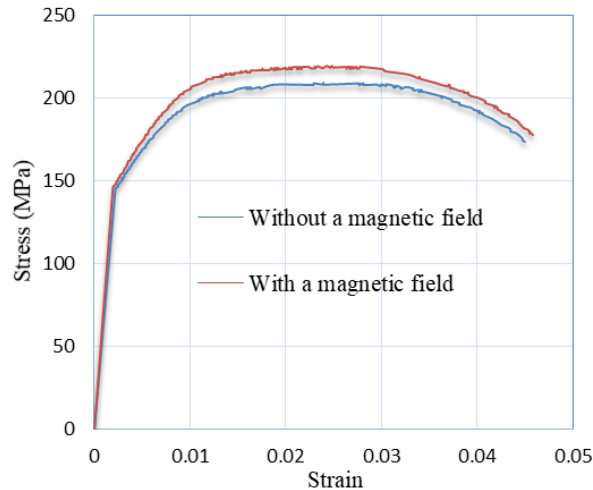
شکل ۵ اعمال میدان مغناطیسی به نمونه آزمایش آزمون کشش

۳- نتایج و بحث

در این بخش از مقاله ابتدا، به طور کلی در مورد اثر اعمال میدان مغناطیسی بر بازگشت فنری بیان خواهد شد. در ادامه، نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های خم کاری انجام شده مطابق جدول ۲ به شکل آماری و همچنین نتایج تحلیل واریانس ارائه می‌شود. در ادامه اثر متقابل پارامترهای مورد بررسی فرایند خم کاری در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به شکل رویه‌های پاسخ ارائه و با یکدیگر مقایسه خواهد گردید. در پایان این بخش از مقاله نتایج آزمایش آزمون کشش بر روی نمونه‌های استاندارد باهدف بررسی رفتار مکانیک ورق در دو حالت با و بدون میدان مغناطیسی مورد مطالعه خواهد شد.

۳-۱- کاهش بازگشت فنری با اعمال میدان مغناطیسی

به طور کلی با نگاه اجمالی به نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان دهنده کاهش بازگشت فنری با اعمال میدان مغناطیسی است. به منظور فراهم آوردن درکی از چگونگی اثر اعمال میدان مغناطیسی بر نتایج خم کاری، از آزمایش کشش استفاده شد. استحکام و شکل پذیری آلیاژ آلومینیوم 1050 در دو حالت با و بدون میدان مغناطیسی در جهت نورد صفر درجه در شکل ۶ نشان داده شده است، مقایسه تغییرات استحکام و ازدیاد طول نسبی تا شکست نشان می‌دهد به طور کلی در شرایط اعمال میدان مغناطیسی در ناحیه پلاستیک استحکام ماده حدود ده درصد افزایش می‌یابد؛ اما از طرفی، میزان ازدیاد طول نسبی تا شکست تغییری نداشته است. این نتایج با نتایج ارائه شده در مراجع [۸، ۱۵، ۱۶] مطابقت دارد. بنابراین، می‌توان گفت وجود ناحیه پلاستیک با استحکام بالاتر در کنار ناحیه تغییر شکل الاستیک عامل کاهش بازگشت فنری در شرایط اعمال میدان مغناطیسی است. همان طور که در مقاله‌ی اکبرزاده و همکاران [۱۹] از فرایند جدیدی جهت بهبود خواص مکانیکی بهره برده شد روش اعمال میدان مغناطیسی نیز باعث بهبود خواص مکانیکی آلومینیوم 1050 گردید.



شکل ۶ اثر میدان مغناطیسی بر تغییرات نمودار تنش کرنش نمونه آزمون کشش

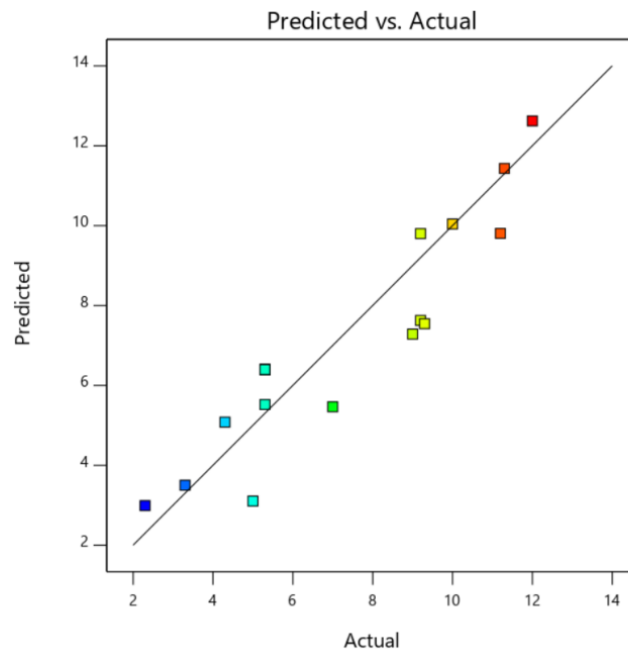
۲-۲- تحلیل آماری

رگرسیون مرتبه ۲ بر روی داده‌های آزمایش در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی برای متغیر پاسخ بازگشت فنری انجام شد. نتایج آنالیز واریانس مربوطه به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، مدل‌های ریاضی بازگشت فنری با و بدون میدان مغناطیسی به ترتیب به صورت معادله‌های ۱ و ۲ به دست آمد (عرض نمونه = W ، جهت نورد = R و سرعت = V).

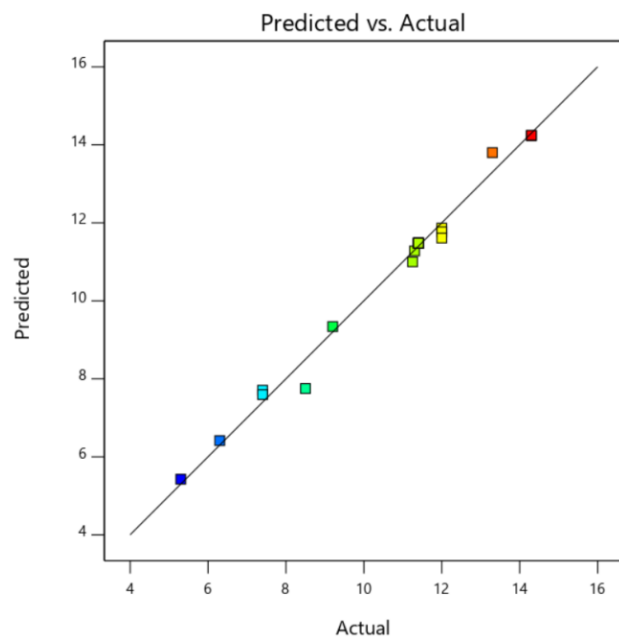
$$\text{by magnet} = 0.746 - 0.01367V + 0.0256R + 0.3382W - 0.000094VW - 0.000026VR + 0.000028WR + 0.000026V^2 + 0.000591W^2 + 0.000054R^2 \quad (1)$$

$$\text{no magnet} = 1.88767 - 0.00327V + 0.0553665W - 0.05R + 0.000016VW + 0.000024VR + 0.000597WR - 0.00706W^2 - 0.000497R^2 \quad (2)$$

ضریب همبستگی R^2 برای مدل‌های رگرسیون در حالت بدون و با اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب برابر ۹۸.۸۸٪ و ۸۳.۶۷٪ به دست آمد که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل‌های رگرسیونی مطابق تحلیل انجام شده است. نمودار داده‌های واقعی در مقابل نمونه‌های پیش‌بینی شده در شکل ۷ و ۸ به ترتیب برای شرایط آزمایش خم کاری با و بدون اعمال میدان مغناطیسی آورده شده است.



شکل ۷ نمودار داده‌های واقعی در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده با شرایط اعمال میدان مغناطیسی



شکل ۸ نمودار داده‌های واقعی در مقابل داده‌های پیش‌بینی‌شده تحت شرایط بدون اعمال میدان مغناطیسی

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس برای خم کاری بدون میدان مغناطیسی

منبع	مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات
مدل	0.0001	98.14	13.04	117.36
سرعت-A	0.0595	4.52	0.6002	0.6002
عرض ورق-B	0.0001	688.71	91.51	91.51
جهت نورد-C	0.0001	96.96	12.88	12.88
AB	0.8133	0.0588	0.0078	0.0078
AC	0.1205	2.88	0.3828	0.3828
BC	0.0636	4.35	0.5778	0.5778
A ²	0.8482	0.0386	0.0051	0.0051
B ²	0.0092	10.34	1.37	1.37
C ²	0.0010	20.98	2.79	2.79
باقیمانده			0.1329	1.33

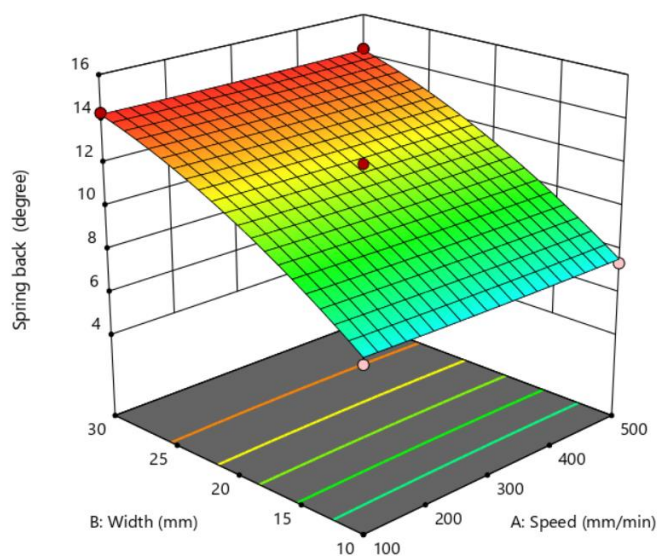
جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس برای خم کاری با میدان مغناطیسی

منبع	مقدار P	مقدار F	میانگین مربع	مجموع مربعات
مدل	0.006	5.69	14.54	130.86
سرعت-A	0.7435	0.1131	0.2890	0.2890
عرض ورق-B	0.0001	43.94	112.22	112.22
جهت نورد-C	0.0666	4.23	10.82	10.82
AB	0.7469	0.1101	0.2812	0.2812
AC	0.6831	0.1767	0.4512	0.4512
BC	0.9828	0.0005	0.0012	0.0012
A ²	0.2975	1.21	3.08	3.08
B ²	0.9523	0.0038	0.0096	0.0096
C ²	0.9121	0.0128	0.0327	0.0327
باقیمانده			2.55	25.54

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در فرایند خم کاری بدون میدان مغناطیسی در بازه تغییرات انتخاب‌شده، سرعت، عرض ورق و جهت نورد پارامترهای مؤثری شناسایی شدند. در شرایط با اعمال میدان مغناطیسی تنها پارامتر مؤثر عرض ورق شناسایی شد (جدول ۴). تعیین‌کننده میزان استحکام ورق نسبت به جهت خم، جهت نورد می‌باشد. کمترین استحکام ورق هنگامی می‌باشد که جهت نورد و محور خم موازی باشند زیرا تحت کرنش‌های اعمالی، کرنش پلاستیک بیشتری را نسبت به جهت‌های ۹۰ و ۴۵ درجه تجربه می‌کند. پارامتر سرعت سنبه و جهت نورد در حالت بدون میدان مغناطیسی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در فرایند خم کاری شناسایی شدند درحالی‌که مطابق جدول ۴ سرعت سنبه و جهت نورد تحت میدان مغناطیسی اثر خود را از دست دادند. وجود میدان مغناطیسی کم اثر بودن سرعت سنبه با مقدار P برابر $۰,۷۴۳۵$ و جهت نورد $۰,۰۶۶۶$ نشان از عدم حساس بودن فرایند خم کاری در شرایط با میدان مغناطیسی به نرخ کرنش در بازه تغییرات در نظر گرفته شده برای پارامترها دارد. با مقایسه خم کاری با میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود اعمال میدان مغناطیسی در خم کاری، باعث افزایش تأثیر عرض ورق و غیرمؤثر کردن سرعت سنبه و جهت نورد ورق روی بازگشت فنری شده است. علت این امر می‌تواند ناشی از تأثیرات میدان مغناطیسی روی حرکت نابجایی‌ها و تأثیر مستقیم روی استحکام باشد. میدان مغناطیسی حرکت نابجایی‌ها را تسهیل می‌کند و می‌تواند موجب کم شدن اثر جهت دانه‌ها حین تغییر شکل پلاستیک ماده شود [۷-۱۰]. همچنین، شرایط بهینه (کمترین بازگشت فنری)، برای هر دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب در سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عرض ۱۰ میلی‌متر و جهت نورد صفر درجه به دست آمد و مقدار بازگشت فنری کمینه برای حالت با و بدون میدان مغناطیسی به ترتیب برابر $۳,۵$ و $۵,۴$ درجه محاسبه شد.

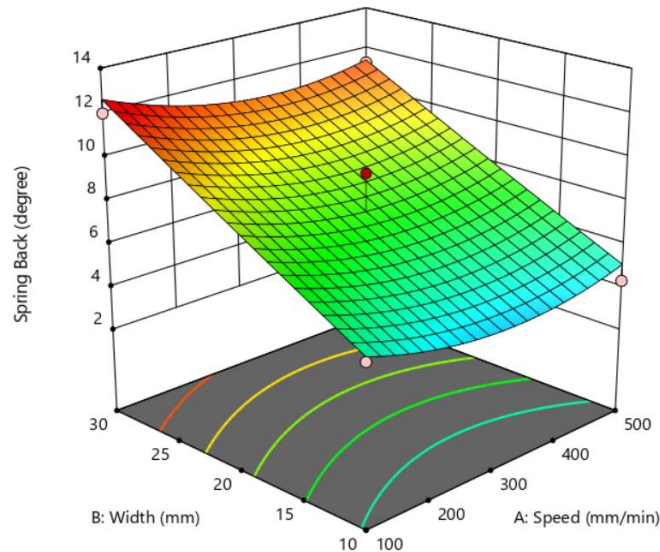
۳-۳- اثر متقابل پارامترهای مورد بررسی فرایند خم کاری در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی

رویه پاسخ تغییرات هم‌زمان سرعت سنبه و عرض ورق روی بازگشت فنری در خم کاری بدون میدان مغناطیسی در شکل ۹ نشان داده شده است. بیشترین مقدار بازگشت فنری در سرعت‌های پایین و عرض ورق‌های بالا و کمترین مقدار بازگشت فنری در سرعت‌های بالا و عرض ورق‌های پایین نشان داده شده است.



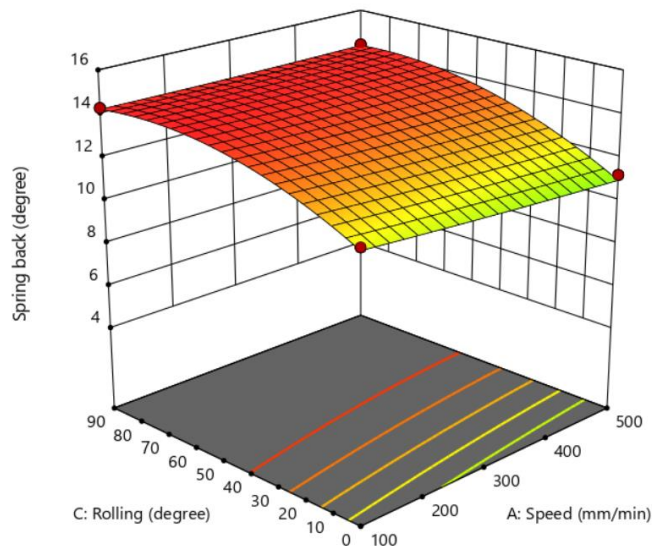
شکل ۹ رویه پاسخ تأثیر هم‌زمان دو عامل عرض ورق و سرعت سنبه در خم کاری بدون میدان مغناطیسی

رویه پاسخ تغییرات هم‌زمان سرعت سنبه و عرض ورق روی بازگشت فنری در خم کاری با اعمال میدان مغناطیسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین مقدار بازگشت فنری در سرعت‌های پایین و عرض ورق‌های بالا و کمترین مقدار بازگشت فنری در سرعت‌های بالا و عرض ورق‌های پایین نشان داده شده است. با مقایسه دو نمودار در شکل ۹ و ۱۰ استنتاج می‌شود که میدان مغناطیسی باعث کاهش بازگشت فنری نسبت به حالت معمول می‌گردد علت این امر اثر مگنتو پلاستیسیته می‌باشد که باعث تغییرات خواص مکانیکی ماده در حین تغییر شکل پلاستیک می‌شود [۱۶].



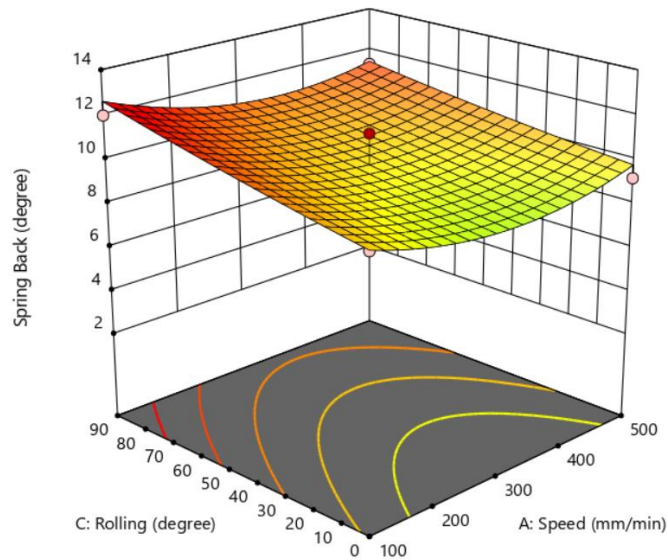
شکل ۱۰ رویه پاسخ تأثیر هم‌زمان دو عامل عرض ورق و سرعت سنبه در خم کاری با میدان مغناطیسی

تأثیر هم‌زمان سرعت سنبه و جهت نورد ورق روی بازگشت فنری در بازه تغییرات انتخاب شده برای خم کاری بدون میدان مغناطیسی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین مقادیر بازگشت فنری در جهت نورد ۹۰ درجه به دلیل استحکام بالاتر ورق در این راستا اتفاق می‌افتد. بازگشت فنری کمتر در جهت نورد نزدیک به صفر درجه در سرعت‌های بالا مشاهده می‌شود. تغییر جهت نورد به همراه تغییر سرعت سنبه در بازه آزمایش‌های انجام شده، تغییر بازگشت فنری حدود ۳ درجه را نشان می‌دهد که نتیجه می‌دهد جهت نورد تأثیر بااهمیتی در حالت بدون میدان مغناطیسی دارد.



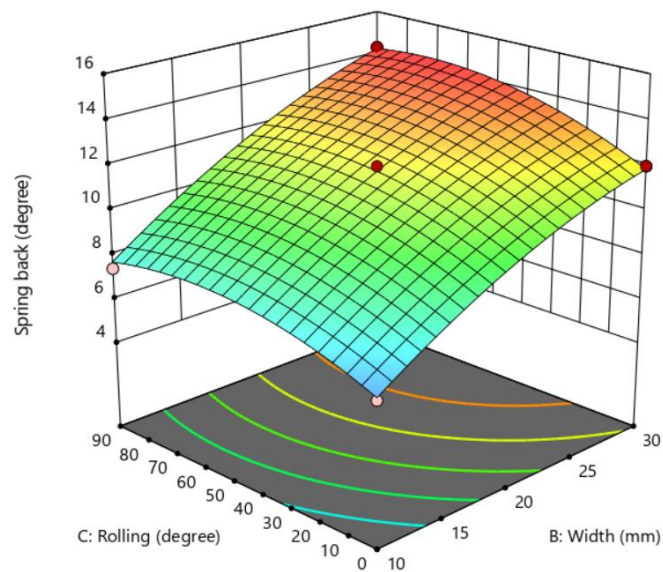
شکل ۱۱ رویه پاسخ تأثیر هم‌زمان دو عامل جهت نورد و سرعت سنبه در خم کاری بدون میدان مغناطیسی

تأثیر میدان مغناطیسی روی تغییر هم‌زمان سرعت سنبه و جهت نورد ورق بر بازگشت فنری در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برخلاف حالت بدون میدان مغناطیسی، در حالت خم کاری با میدان مغناطیسی، مقدار بازگشت فنری بسیار کمتر می‌شود و اثر جهت نورد و سرعت سنبه کمتر مشاهده می‌شود. از بررسی تغییرات بازگشت فنری این‌طور نتیجه می‌شود که اثر میدان مغناطیسی می‌تواند باعث کاهش اثربخشی سرعت سنبه و جهت نورد در خم کاری شود. در مطالعه‌ی محمودی [۲۰] پارامتر سرعت یکی از عوامل کاهش بازگشت فنری شناخته شد که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ این اثر مشهود است.



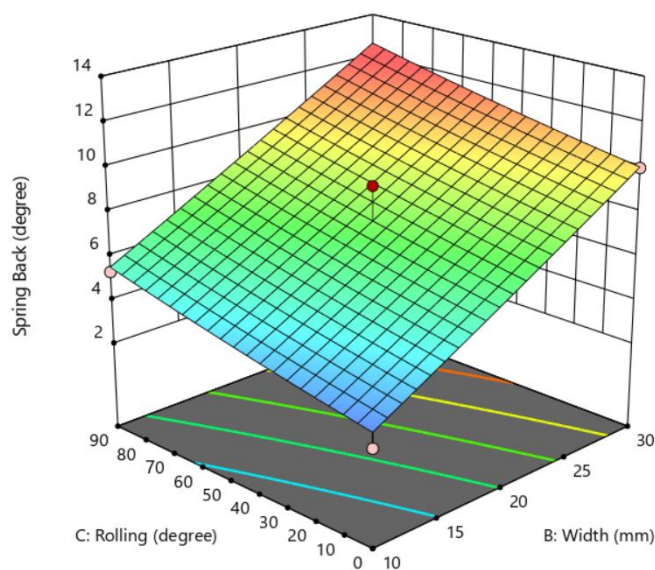
شکل ۱۲ رویه پاسخ از تأثیر هم‌زمان دو عامل جهت نورد و سرعت سنبه در خم کاری با میدان مغناطیسی

تأثیر هم‌زمان عرض و جهت نورد ورق روی بازگشت فنری در بازه تغییرات انتخاب شده برای خم کاری بدون میدان مغناطیسی، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۳ در جهت نوردهای مختلف ورق با افزایش عرض ورق، بازگشت فنری افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳ رویه پاسخ تأثیر هم‌زمان دو عامل جهت نورد و عرض ورق در خم کاری بدون میدان مغناطیسی

تأثیر میدان مغناطیسی روی تغییر هم‌زمان عرض و جهت نورد ورق بر بازگشت فنری در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد روند رشد بازگشت فنری نسبت به شکل ۱۳ به مراتب کمتر شده است (کاهش تا دو درجه) علت این امر تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص مکانیکی آلومینیوم می‌باشد [۱۶]. طبق شکل ۱۳ در جهت نوردهای مختلف با افزایش عرض ورق، بازگشت فنری افزایش چشمگیری دارد (بازه‌ی ۸,۵ تا ۱۳,۳) اما در شکل ۱۴ بازگشت فنری نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی کاهش بیشتری دارا می‌باشد.



شکل ۱۴ رویه پاسخ از تأثیر هم‌زمان دو عامل جهت نورد و عرض ورق در خم کاری با میدان مغناطیسی

۴- نتیجه‌گیری

اثرگذاری اعمال میدان مغناطیسی بر فرایند خم کاری آلومینیوم ۱۰۵۰ و همچنین رفتار سه پارامتر شعاع قالب، سرعت سنبه و ناهمسانگردی (جهت نورد) روی بازگشت فنری در فرایند خم کاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به‌طور خلاصه به‌دست آمد.

۱- به‌طور کلی نتایج نشان داد اعمال میدان مغناطیسی سبب کاهش بازگشت فنری در فرایند خم کاری آلومینیوم مورد مطالعه می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش کشش معین شد وجود ناحیه پلاستیک با استحکام بالاتر در کنار ناحیه تغییر شکل الاستیک عامل کاهش بازگشت فنری در شرایط اعمال میدان مغناطیسی است.

۲- از روش سطح پاسخ برای بیان بازگشت فنری به‌عنوان تابعی درجه دوم از پارامترهای مؤثر عرض ورق، سرعت سنبه و جهت نورد در دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی استاتیکی استفاده شد. ضریب همبستگی R^2 برای مدل‌های رگرسیون در حالت بدون و با اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب برابر ۹۸.۸۸٪ و ۸۳.۶۷٪ به‌دست آمد که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل‌های رگرسیونی است.

۳- با توجه به نتایج تحلیل واریانس، معین شد اعمال میدان مغناطیسی باعث بی‌اثر کردن پارامتر جهت نورد و کم اثر کردن سرعت سنبه در خم کاری می‌شود.

۴- کمترین بازگشت فنری برای هر دو حالت با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب در سرعت ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عرض ۱۰ میلی‌متر و جهت نورد صفر درجه به دست آمد و مقدار بازگشت فنری کمینه برای حالت با و بدون میدان مغناطیسی به ترتیب برابر ۳،۵ و ۵،۴ درجه محاسبه شد.

۵- با توجه به نتایج بدست آمده معین شد در شرایط سرعت حرکت سنبه ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عرض ورق ۲۰ میلی‌متر و جهت نورد ۴۵ درجه مقدار بازگشت فنری در شرایط بدون اعمال میدان مغناطیسی ۱۱،۴ درجه است؛ که با اعمال میدان مغناطیسی بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و به ۵،۳ درجه می‌رسد. در این شرایط اعمال میدان مغناطیسی بیشترین تأثیر را بر بازگشت فنری داشته است.

References

- [1] Karajibani E, Hashemi R, Sedighi M. Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: Numerical simulations and experimental verifications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 Jun;90:2713-22. doi: 10.1007/s00170-016-9585-1
- [2] Bruschi S, Altan T, Banabic D, Bariani PF, Brosius A, Cao J, Ghiotti A, Khraisheh M, Merklein M, Tekkaya AE. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals*. 2014 Jan 1;63(2):727-49. doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.005
- [3] Mori KI, Bariani PF, Behrens BA, Brosius A, Bruschi S, Maeno T, Merklein M, Yanagimoto JJ. Hot stamping of ultra-high strength steel parts. *Cirp Annals*. 2017 Jan 1;66(2):755-77. doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.007

- [4] Cinar Z, Asmael M, Zeeshan Q, Safaei B. Effect of springback on A6061 sheet metal bending: a review. *Jurnal Kejuruteraan*. 2021;33(1):13-26. doi: 10.17576/jkukm-2020-33(1)-02
- [5] John Panicker G. Study on Sheet Metal Bending. *ScienceOpen Preprints*. 2022 Jul 31. doi: 10.14293/S2199-1006.1.SOR-PP0XUZU.v1
- [6] Ikumapayi OM, Akinlabi ET, Madushele N, Fatoba SO. A brief overview of bending operation in sheet metal forming. *Advances in Manufacturing Engineering: Selected articles from ICMMPPE 2019*. 2020:149-59.
- [7] Liu YZ, Zhan LH, Ma QQ, Ma ZY, Huang MH. Effects of alternating magnetic field aged on microstructure and mechanical properties of AA2219 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015 Oct 25;647:644-7. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.05.183
- [8] Wang PY, Wang ZJ, Xiang N, Cai SP, Li ZX. Mechanism of magnetic field condition on deformation behavior of sheet metal using a property-adjustable flexible-die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Jul;109:629-44. doi: 10.1007/s00170-020-05712-0
- [9] Gu Q, Huang X, Xi J, Gao Z. The influence of magnetic field on fatigue and mechanical properties of a 35CrMo steel. *Metals*. 2021 Mar 26;11(4):542. doi: 10.3390/met11040542
- [10] Nawaz B, Long X, Yang Z, Zhao J, Zhang F. Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of austempered 70Si3MnCr steel. *Materials science and engineering: A*. 2019 Jun 24;759:11-8. doi: 10.1016/j.msea.2019.05.023
- [11] Fu JW, Yang YS. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Zn alloy under a low-voltage pulsed magnetic field. *Materials Letters*. 2012 Jan 15;67(1):252-5. doi: 10.1016/j.matlet.2011.09.021
- [12] Deng N, Wang J, Wang J, He Y, Lan Z, Zhao R, Beaugon E, Li J. Microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy solidified under high magnetic field. *Materials Letters*. 2021 Feb 15;285:129182. doi: 10.1016/j.matlet.2020.129182
- [13] Liu Y, Sun Q, Liu J, Wang S, Feng J. Effect of axial external magnetic field on cold metal transfer welds of aluminum alloy and stainless steel. *Materials Letters*. 2015 Aug 1;152:29-31. doi: 10.1016/j.matlet.2015.03.077
- [14] Yip WS, To S. Control of the ductile and brittle behavior of titanium alloys in diamond cutting by applying a magnetic field. *Scientific Reports*. 2019 Mar 11;9(1):4056. doi: 10.1038/s41598-019-40702-7
- [15] Çadırılı E, Kaya H, Râbiger D, Eckert S, Gündüz M. Effect of rotating magnetic field on the microstructures and physical properties of Al-Cu-Co ternary eutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015 Oct 25;647:471-80. doi: 10.1016/j.jallcom.2015.05.162
- [16] Li GR, Xue F, Wang HM, Zheng R, Zhu Y, Chu QZ, Cheng JF. Tensile properties and microstructure of 2024 aluminum alloy subjected to the high magnetic field and external stress. *Chinese Physics B*. 2016 Aug 25;25(10):106201. doi: 10.1088/1674-1056/25/10/106201
- [17] Fang J, Mo J, Li J, Cui X, Fan S. Electromagnetic pulse assisted progressive deep drawing. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;81:801-7. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.079
- [18] Brief A. ANSYS Maxwell Magnetic Field Formulation.
- [19] Akbarzadeh B, Gorji H, Bakhshi M, Jamaati R, Mirnia MJ. Development of a new process for the severe plastic deformation of AA 1050 to improve the mechanical properties. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):19-29. [In Persian]
- [20] Mahmoodi M, Karkeabadi M, Hajighorbani R. Investigating the Effective Parameters in the Spring Back of Two Layers Sheet Copper-Austenitic Stainless Steel in the Incremental Sheet Forming. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jan 21;6(8):10-20. [In Persian]