

۹ جولای ۲۰۱۴
نوشته: استیو بنسون

چرا و چگونگی‌های برگشت فنری ورق پس از خم کاری

دانستن این که چگونه این متغیرهای خم کاری که همواره وجود دارند، رخ می‌دهند نیمی از راه است.

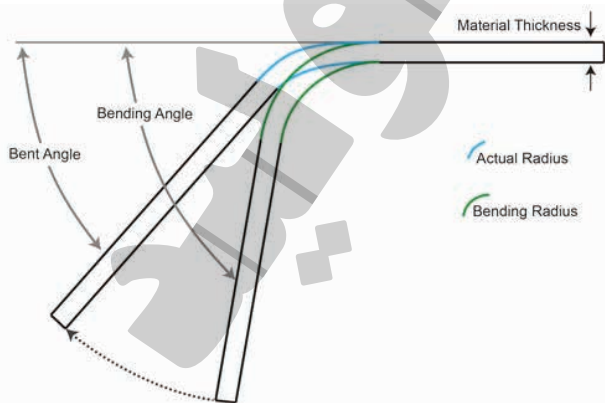
The hows and whys of springback and springforward

Knowing how these ever-present bending variables occur is half the battle

THE FABRICATOR®

July 9, 2014

By: Steve Benson



دقیقا چرا ورق برگشت می‌کند و تکنسین چگونه می‌تواند آن را پیش‌بینی کند؟

شکل ۱: پدیده برگشت فنری ورق هموار در شکل‌دهی فلزات وجود داشته است. زاویه خم همان زاویه آغازین خم کاری است که اپراتور از آن فراتر می‌رود تا قطعه پس از برگشت، به زاویه خم مطلوب برسد.

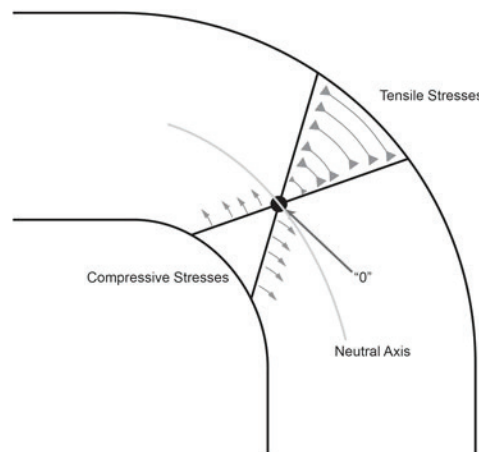
برای یک اپراتور دستگاه پرس برک، زاویه خم چیزی متفاوت از زاویه‌ای که خم کاری با آن صورت می‌گیرد، و علت آن متغیر همیشه حاضر در شکل دهی با نام برگشت فنری است.

برگشت ورق زمانی رخ می‌دهد که ماده پس از خم شدن سعی دارد تا از لحاظ زاویه‌ای به شکل اولیه بازگردد. هنگام تولید با دستگاه پرس برک، اپراتور ورق را بیش از اندازه زاویه مورد نیاز، خم می‌کند تا برگشت ورق را جبران کند. خم کردن بیش از اندازه باعث می‌شود که قطعه پس از بیرون آمدن از زیر بار، به زاویه مطلوب خم برسد (شکل ۱).

استحکام کششی و ضخامت ماده، نوع ابزار و نوع خم کاری، همگی تاثیر زیادی بر برگشت الاستیک ورق دارد. محاسبه و پیش‌بینی کارآمد برگشت ورق بسیار ضروری است، مخصوصاً هنگامی که با خم‌هایی سر و کار داریم که شعاع عمیقی دارند و همچنین قطعاتی که از مواد ضخیم و با استحکام بالا ساخته می‌شوند.

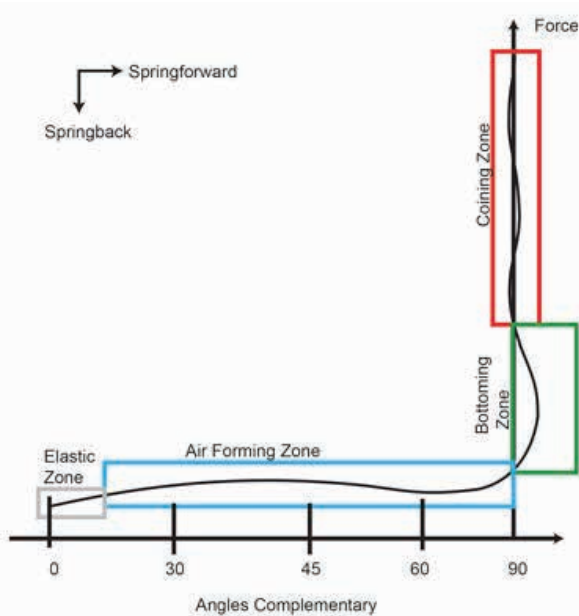
علم حاکم بر پدیده برگشت ورق

دقیقاً به چه علت این پدیده رخ می‌دهد؟ دو علت وجود دارد. دلیل اول مربوط به جابه‌جایی مولکول‌ها درون ماده می‌شود و دلیل دوم مربوط به تنش و کرنش است. هنگامی که ماده خم می‌شود، قسمت داخلی آن تحت فشار و قسمت بیرون انحنا تحت کشش قرار می‌گیرد به طوری که چگالی مولکولی در قسمت داخلی بزرگ‌تر از قسمت خارجی آن می‌گردد. نیروهای فشاری کمتر از نیروهای کششی در قسمت بیرونی هستند که باعث می‌شود ماده سعی داشته باشد به وضعیت صاف خود برگردد (شکل ۲).



شکل ۲: در هر خم ترکیبی از نیروهای کششی و فشاری ایجاد می‌شود.

در شکل ۳ چگونگی تحت تاثیر قرار گرفتن خواص تنش-کرنشی به وسیله سه روش متفاوت خم کاری، **air bending** یا خم کاری آزاد، **bottom bending** و روش منگنه یا **coining** نشان داده شده است.



شکل ۳: هر کدام از روش‌های خم کاری

(air bending, bottom bending, coining)

خواص تنش کرنشی ماده را به صورت متفاوتی تحت تاثیر قرار می‌دهد. خط منحنی در منطقه مربوط به **air forming** نشان می‌دهد که برگشت ورق چگونه در زاویه‌های مختلف تغییر می‌کند. در **coining** و **bottoming**، روش‌هایی که معمولاً زاویه خم ۹۰ درجه را با آن‌ها اجرا می‌کنند، منحنی به سمت راست محور قائم می‌رود که نشان دهنده چگونگی برگشت ورق و مطابق شدن آن با زاویه قالب است. در منطقه **coining**، برگشت ورق به سمت عقب و جلو با هم خنثی می‌شوند و یک خم بدون برگشت ایجاد می‌کند.

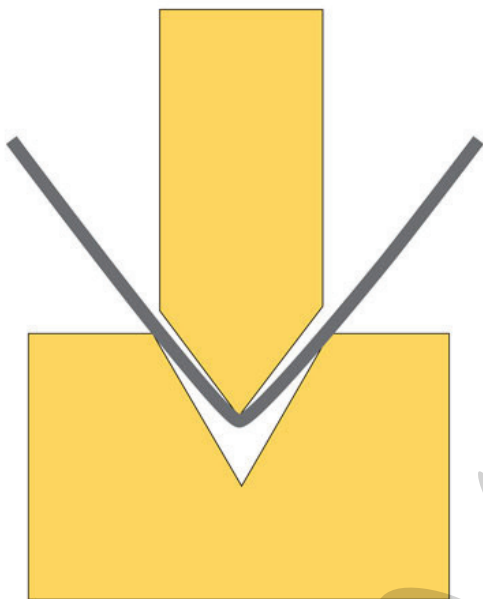
در شکل روش **air bending** نشان داده شده است که هنگامی که پرس برک بار را بر روی ورق وارد می‌آورد، فلز شروع به خم شدن می‌نماید. حین خم کاری به این روش، قطعه کار هنگامی که از زیر فشار بیرون می‌آید، مقداری برگشت می‌کند و سعی می‌کند به شکل اولیه خود بازگردد. مقدار برگشت مربوط به خاصیت ماده و شعاع خم می‌شود. در مواد رایج، اگر ضخامت ماده و شعاع داخلی خم برابر باشد، برگشت ورق معمولاً ۲ درجه یا کمتر است. با این وجود، با افزایش مقاومت ورق برگشت فنری بیشتر می‌شود.

در روش **bottoming**، ورق با انتهای ماتریس تماس پیدا می‌کند و با افزایش مقدار فشار، به اندازه مقدار برگشت، بیش از حد خم می‌شود و سپس ورق مقداری در جهت عکس برگشت می‌کند.

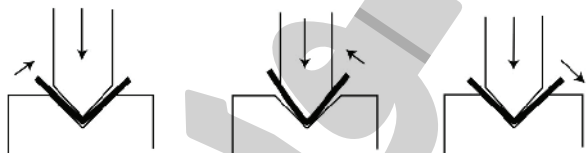
با افزایش بیشتر نیرو، فرآیند خم وارد نوع **Coining** یا منگنه می‌شود که در آن خم کردن بیشتر ورق در یک لحظه کوتاه پیش از برگشت انجام می‌شود. نهایتاً نیروهای برگشت به عقب و جلو همدیگر را خنثی کرده و فرآیند منگنه کردن حاصل می‌شود (ورق به مدت کوتاهی بین سنبه و قالب تحت فشار قرار می‌گیرد و دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود). پس از این فرآیند محصول نهایی دیگر دچار برگشت فنری نمی‌شود (به علت تغییر شکل پلاستیک).

در خم‌هایی با شعاع بزرگ که در قالب‌های برجستگی‌دار شکل‌دهی می‌شود، سنبه‌ها معمولاً برجستگی با زاویه ۸۸ تا ۸۵ درجه دارند. یک سنبه با زاویه ۸۵ درجه به شما این اجازه را می‌دهد تا ورق را تا ۵ درجه بیش از حد خم نمایید.

البته این مطالب تنها در مورد شکل‌دهی به روش **air forming** (شکل ۵) صادق است. اگر از روش **bottom bending** یا **coining** استفاده می‌کنید، برگشت فنری با اعمال فشار جبران می‌شود. در **bottom bending** برگشت ورق به سمت جلو به ماده نیرو وارد می‌آورد تا زاویه خم مطابق زاویه قالب شود. در روش **coining** زاویه ابزارآلات (ماتریس و سنبه) با هم برابر است و برگشت ورق در این زاویه لحاظ نشده است زیرا برگشت فنری با ایجاد تغییر شکل پلاستیک در قطعه، حذف می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۵: حین فرآیند **air forming** شعاع خارجی خم با قالب تماس ندارد. شعاع داخلی خمی که شکل‌دهی می‌شود وابسته به عرض دهانه قالب است.



شکل ۶: در فرآیند **bottoming**، سنبه فشار را وارد می‌آورد (تصویر سمت چپ) و قطعه کار حول نوک سنبه می‌پیچد (تصویر وسط) که برگشت فنری ورق را با فشار جبران می‌سازد. با افزایش فشار، نیروهای برگشت ورق به سمت جلو، ماده را به سمت بازگشت به زاویه مطلوب که مطابق زاویه قالب است، می‌برد (تصویر سمت راست).

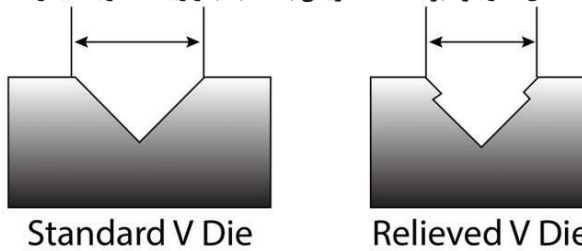
علت این پدیده این است که در فرآیند **coining** ورق بین نوک سنبه و قالب منگنه می‌شود و نوک سنبه به داخل محور خنثی نفوذ می‌کند و ماده را در محل خمیدگی نازک می‌کند که با این کار، ساختار مولکولی مجدداً شکل می‌گیرد. در این نقطه یک پارچگی به مقدار زیادی از بین می‌رود.

ارتباط برگشت فنری ورق با انتخاب ابزار

زوایای سنبه و ماتریس بر اساس میزان بازگشت ورق طراحی می‌شود. با افزایش عرض دهانه ماتریس، زاویه آن کوچک می‌شود. قالب‌های V-شکل معمولی، با زاویه ۹۰ درجه و دهانه‌ای به عرض ۰.۵ اینچ ساخته شده‌اند که در آن‌ها شعاع خم کوچک، ضخامت ماده نازک و برگشت فنری ورق کم در نظر گرفته شده است. قالب‌هایی با عرض دهانه ۰.۵ تا ۱ اینچ دارای زاویه داخلی ۸۸ درجه هستند. علت آن اینست که اگر شما از قالب‌های بزرگتری استفاده می‌کنید، شعاع انحنا بزرگ‌تر و بنابراین برگشت فنری ورق بیشتری خواهید داشت (با فرض اینکه از فرآیند **air forming** استفاده شود).

کاهش زاویه داخلی ماتریس کمک می‌کند که ماده به دور سنبه فشار داده شود و افزایش برگشت ورق را جبران کند. این الگو با افزایش دهانه ماتریس تا جایی ادامه می‌یابد که به ماتریس‌های برجستگی‌دار (**relieved die style**) می‌رسیم (شکل ۴). وجوه ماتریس برجستگی‌دار، طوری ماشین‌کاری شده است که به سنبه با زاویه ۹۰ درجه اجازه می‌دهد تا به داخل قالبی با زاویه داخلی کوچک-مثلاً ۷۳ درجه-وارد شود بدون اینکه سنبه و قالب با هم برخورد داشته باشند. این موضوع ما را قادر می‌سازد تا خم‌هایی با شعاع انحنا بزرگ با ۳۰ تا ۶۰ درجه برگشت فنری را بتوانیم بدون اشکال، ایجاد نماییم.

شکل ۴: وجوه برجسته ماتریس به سنبه با زاویه ۹۰ درجه اجازه



می‌دهد تا به زوایای کوچک‌تر به ماتریس وارد شود، بدون اینکه سنبه با قالب تماس پیدا کند. این قابلیت اجازه می‌دهد تا زوایای خم‌کاری کوچک‌تری (یا زاویه آغازین) را شکل‌دهی نماییم و سپس با برگشت ورق، به زاویه نهایی مطلوب برسیم.

شیوه مشابهی برای سنبه‌ها نیز اعمال می‌شود. با این استثنا که

متغیرهای مربوط به برگشت فنری بسیارند. هرچه ماده قوی تر (حد کششی بالاتر) باشد، برگشت فنری بیشتر خواهد بود. هرچه شعاع خم تیزتر باشد، برگشت فنری کمتر خواهد بود. هرچه دهانه قالب در فرآیند *air forming* عریض تر باشد، مقدار برگشت فنری ورق به واسطه شعاع خم بزرگ تر، بیشتر خواهد بود و هر چه شعاع خم نسبت به ضخامت ورق بزرگ تر باشد، برگشت فنری بیشتر است. میزان برگشت ورق که در زیر آورده شده است. اگر ارتباط یک به یک بین ضخامت و شعاع داخلی وجود داشته باشد این مقادیر به طور عمومی صحیح است:

- استنلس استیل ۳۰۴: ۲ تا ۳ درجه
- آلومینیوم نرم: ۱,۵ تا ۲ درجه
- فولاد نورد سرد: ۰,۷۵ تا ۱ درجه
- فولاد نورد گرم: ۰,۵ تا ۱ درجه
- مس و برنج: ۰ تا ۰,۵ درجه

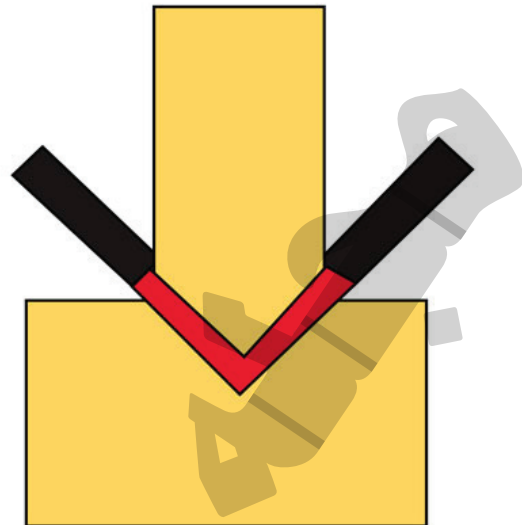
ارتباط یک به یک مابین ضخامت ماده و شعاع داخلی خم، باعث ایجاد برگشت فنری همسان با برگشت فنری طبیعی ماده در حال شکل دهی می شود. اما با افزایش زیاد شعاع داخلی خم، بزرگ تر یا برابر با هشت برابر ضخامت ماده، برگشت فنری به شدت افزایش می یابد.

برای مثال، فولاد نرم با ضخامت ۰,۳۱ اینچ با نسبت یک به یک بین شعاع خم و ضخامت ورق، برگشت فنری معادل ۰,۵ تا ۱ درجه خواهد داشت. همان ماده با همان ضخامت و شعاع خم ۲,۳۷۵ اینچ دارای برگشت فنری بزرگی تا ۳۰ درجه خواهد بود.

جبران سازی برگشت فنری ورق

در حالی که روش *coining* یکی از روش های جبران برگشت ورق است، اما معمولاً بهترین روش برای این کار نیست و به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد. روش *bottom bending* می تواند گزینه مناسبی باشد که کنترل خوبی بر روی زاویه دارد اما حتی این روش نیز می تواند چالش انگیز باشد زیرا این روش بار (تناز) زیادی برای اجرا نیاز دارد. ترکیب روش *air forming* با پرس برک CNC امروزه یک فرآیند معقول و پایدار است. کماکان تفاوت بین ورق ها حتی ورق های موجود در یک پارتی، می تواند سهمی در تغییرات زاویه خم داشته باشد. متغیرهای اصلی در این موضوع عبارتند از: ضخامت، راستای دانه بندی و استحکام کششی.

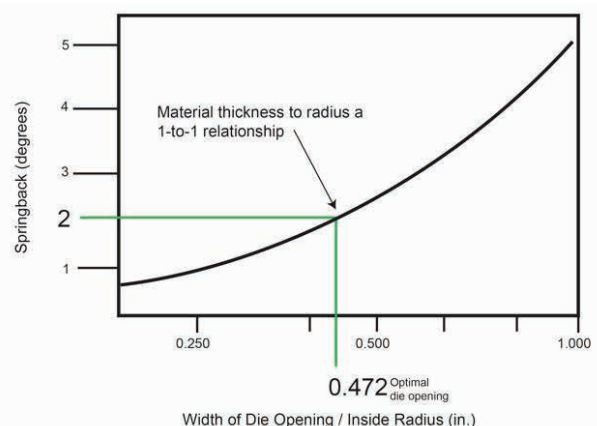
به منظور دست یابی به یک خم عالی در بعضی از کاربردها، ممکن است نیاز باشد تا از بعضی مکانیزم های جبران سازی زاویه با سیستم های کنترلی فیدبک دار استفاده شود. این سیستم ها از سنسورهای مکانیکی، دوربین ها و لیزرهای برای زیر نظر گرفتن برگشت فنری قطعه استفاده می کنند که به سرعت به اطلاعات



شکل ۷: در فرآیند *coining*، برگشت ورق حذف می شود. با اینکه *coining* یکی از روش های جبران برگشت ورق است اما معمولاً بهترین گزینه نیست و به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد.

متغیرهای برگشت فنری

برگشت فنری در ورق کاری یک عامل تقریباً قابل پیش بینی است. دانستن عوامل آن می تواند به شما اجازه دهد تا ابزارآلات بهتری انتخاب کنید، به خصوص برای شعاع خم های بزرگ که برگشت فنری در آن ها می تواند از ۴۰ درجه فراتر رود و اگر شما خم هایی با شعاع بزرگ بر روی ورق هایی از جنس فولاد مقاومت بالا (HSS) ایجاد می کنید، این مقدار بیشتر نیز می تواند باشد. استحکام تسلیم ماده تاثیر به سزایی بر مقدار برگشت فنری ورق دارد. هرچه استحکام تسلیم بالاتر باشد، مقدار برگشت فنری بیشتر است. همچنین توجه داشته باشید که مقدار برگشت فنری، چگونه متناسب با افزایش شعاع داخلی افزایش می یابد (شکل ۸).



شکل ۸: مقدار برگشت ورق متناسب با افزایش شعاع داخلی، افزایش می یابد. در *air forming* شعاع داخلی خم با عرض دهانه قالب تغییر می کند. استفاده از عرض دهانه بهینه برای قالب به تخمین دقیق تر برگشت ورق، کمک می کند.

خواهد شد. سپس در فرمول جاگذاری نمایید:

$$D = [0.914 / (0.914 \times 2.1)] \times \text{Material factor}$$

$$D = [0.914 / (1.919)] \times \text{Material factor}$$

$$D = 0.476 \times \text{Material factor}$$

Cold-rolled steel: $0.476 \times 1.0 = 0.476$, or about 0.5 degree of springback

H32 aluminum: $0.476 \times 3.0 = 1.428$, or about 1.5 degrees of springback

304 stainless steel: $0.476 \times 3.5 = 1.666$, or about 1.75 degrees of springback

با افزایش شعاع خم، برگشت فنری افزایش می‌یابد. مثال مشابهی را در نظر بگیرید، فقط این بار شعاع خم برابر ۱,۵۷۴ میلی‌متر باشد:

$$D = [1.574 / (0.914 \times 2.1)] \times \text{Material factor}$$

$$D = [1.574 / (1.919)] \times \text{Material factor}$$

$$D = 0.820 \times \text{Material factor}$$

Cold-rolled steel: $0.820 \times 1.0 = 0.820$, or about 0.75 degree of springback

H32 aluminum: $0.820 \times 3.0 = 2.46$, or about 2.5 degrees of springback

304 stainless steel: $0.820 \times 3.5 = 2.87$, or about 2.75 degrees of springback

البته توجه داشته باشید که این رابطه تنها در مورد air forming صادق است. اگر از روش خم کاری دیگری استفاده

دریافتی از فیدبک سنسورها واکنش نشان داده و زاویه خم را به مقدار مطلوب می‌رساند.

ممکن است شما به جداولی نظیر شکل ۹ دسترسی داشته باشید، که مقدار برگشت فنری را در فولاد نورد سرد شده، نشان می‌دهد. طبق جدول، اگر در حال خم کاری فولاد نورد سرد به ضخامت ۱ میلی‌متر با شعاع ۲۰ میلی‌متر هستید، لازم است ۹ درجه برگشت برای ورق در نظر بگیرید.

در روش air bending می‌توانید مقدار برگشت فنری ورق برحسب درجه (D) را با استفاده از شعاع داخلی خم (Ir) و ضخامت ماده (Mt) و ضریب جنس ماده تعریف کنید. ضریب پایه ۱ برای فولاد نورد سرد شده است. استیل ۳۰۴ دارای ضریب ۳,۵ است، آلومینیوم H32 ضریب ۳ دارد. برای کار کردن با فرمول زیر، لازم است شعاع داخلی خم و ضخامت ماده از اینج به میلی‌متر تبدیل شود. پس از انجام تبدیل واحد، مقادیر را در فرمول زیر قرار دهید:

$$D = [Ir / (Mt \times 2.1)] \times \text{Material factor}$$

این معادله به شما تخمینی از برگشت فنری ورق می‌دهد که به ازای شعاع داخلی خم، ضخامت و جنس مشخص رخ می‌دهد. در ذهن داشته باشید که این فرمول در بهترین شرایط تنها یک تخمین است. استحکام کششی ماده و نوع ابزار مورد استفاده تاثیر زیادی بر مقدار برگشت ورق دارد.

فرض کنید با ماده‌ای به ضخامت ۰,۳۶ اینچ سروکار دارید و نیاز دارید تا آن را با شعاع داخلی ۰,۳۶ اینچ خم نمایید (نسبت شعاع به ضخامت ۱ به ۱ است). ابتدا عددها را با ضرب در ۲۵,۴ به میلی‌متر تبدیل نمایید، که ضخامت و شعاع داخلی برابر با ۰,۹۱۴ میلی‌متر

		Inside Radius (mm)										
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Material Thickness (mm)	0.8	6	9	11	13	15	16	18	20	25	28	30
	1.0	5	7	9	11	13	15	16	18	20	22	25
	1.2	4	6	8	9	11	13	14	15	16	18	20
	1.6	3.5	4.5	6	7	9	10	11	12.5	14	15	15.5
	2.3	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7	8	9	10	11	12
	2.6	2	3	4	5	5.5	6.5	7.5	8	9.5	10	10.5
	3.2	2	2.5	3	4	4.5	5.5	6	7	7.5	8	9
		Springback (degrees)										

شکل ۹: جدول فوق مقدار برگشت برای فولاد نورد سرد شده را به ازای شعاع خم و ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.

(توجه کنید که مقدار شعاع برحسب اینچ است).

$$Sf = 90\text{-degree bending angle}/88\text{-degree bent angle} = 1.022$$

$$Ar = Sf \times \text{Original inside radius}$$

$$Ar = 1.022 \times 0.062 \text{ in.}$$

$$Ar = 0.0634 \text{ in.}$$

اگر از فرآیند bottom bending استفاده می کنید، فرمولی که ارائه گردید، مربوط به محاسبات کاهش شعاع خم می شود (BD) که در آن مقدار Ar برای محاسبه BD مورد استفاده قرار می گیرد، همان شعاع داخلی Lr در فرمول است. اگر از air forming استفاده می کنید، اثرات کماکان موجود و قابل پیش بینی است و با قانون ۲۰ درصد توضیح داده می شود. (یادداشت ویراستار: برای مرور فرمول های خم کاری و قانون ۲۰ درصد به مقاله " How the inside bend radius forms " مراجعه کنید)

نتیجه گیری

برگشت ورق همواره وجود دارد، موضوع چگونگی برخورد شما با آن است که حائز اهمیت است. چه با استفاده از فشار یا تنظیمات ابزار چه با استفاده از تجهیزات جبران زاویه برگشت اتوماتیک، شما می توانید به سادگی برگشت فنری ورق را کنترل نمایید-که زمانی امکان پذیر است که قوانین را بدانید.

می نمایید، مثلاً روش bottom bending، شما کماکان نیاز دارید تا زاویه برگشت فنری ورق را جبران کنید. همانگونه که ذکر شد، در روش bottoming، ماده با انتهای ماتریس تماس برقرار می کند و از لحاظ زاویه ای به میزان زاویه برگشت فنری، بیشتر خم می شود و نهایتاً پس از باربرداری، ورق مطابق زاویه قالب می شود (شکل ۶).

ضریب برگشت فنری، شعاع داخلی و کاهش یافتن شعاع خم هنگام محاسبه مقدار برگشت فنری ورق، می فهمیم که شعاع خم مقداری در جهت زاویه باز خواهد شد. این بدان معناست که اگر در حال انجام فرآیند coining نباشید (و البته امروزه این روش کمتر مورد استفاده قرار می گیرد) شعاع شکل دهی یا همان شعاعی که قطعه تحت بار دستگاه به خود می گیرد اندکی کوچک تر از شعاع واقعی است که حاصل می شود (شکل ۱).

این همان جایی است که ضریب برگشت فنری Sf به وسط می آید. Sf ارتباط بین زوایای آغازین و نهایی است و برابر است با نسبت زاویه خم کاری به زاویه خم شده. برای تعیین شعاع حقیقی (Ar) که پس از برگشت ورق حاصل می شود، Sf را در شعاع داخلی خم حقیقی ضرب نمایید که حاصل شعاع مطلوب و مورد انتظار پیش از برگشت ورق است. فرض کنید یک خم ۹۰ درجه دارید و برگشت ورق برابر ۲ درجه یعنی زاویه خم شده ۸۸ درجه باشد. شعاع داخلی اصلی ۰,۰۶۲ اینچ است

nahalsun.com



سیستم پله شهریار



فکس:

(۰۲۱)۶۵۵۳۳۲۰۳

تلفن:

(۰۲۱)۶۵۵۳۳۲۰۰۰۰۲

عرضه کننده انواع پله های پیش ساخته