



ICME2017

چهاردهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید ایران

۱۳۹۶ آبان



انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

بررسی تجربی برگشت فنری ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/پی‌وی‌سی در

فرآیند کشش-خمش U شکل

محمد پاکدامن^۱، عبدالرحمن جامی الاحمدی^{۲*}

^۱ایران، مشهد، نبش میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، استادیار *

jaami-a@um.ac.ir

چکیده

نسبت استحکام به وزن بالا برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه با زمینه تقویت شده پلیمری از جمله مشخصه مهمی است که باعث مورد استفاده قرار گرفتن آن‌ها در صنعت حمل و نقل و فضاوردی شده است. از طرفی برگشت فنری پدیده‌ای است که در بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی ورق رخ می‌دهد و بخشی از دقت ابعادی قطعات تولیدی از برگشت فنری تاثیر می‌پذیرند. پیش‌بینی برگشت فنری می‌تواند در طراحی قالب لحاظ شده و لذا هزینه‌های مواد و تولید برای محصول نهایی بدون نقص را کاهش دهد. هدف از انجام این تحقیق بررسی میزان برگشت فنری در فرآیند کشش-خمش U شکل برای ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی بوده است. برای این منظور، نمونه ورق‌های کامپوزیتی با لایه‌چینی $[0/90]_4$ و $[30/-30]_4$ به روش انباشت لایه‌ها تولید شدند. سپس ورق‌های تولید شده به شکل مستطیل و با عرض ثابت آماده شده و با دستگاه پرس تحت فرآیند کشش-خمش U شکل قرار گرفته و قطعه نهایی تولید گردید. در این تحقیق اثر پارامترهایی مانند دما، نوع لایه‌چینی و نیروی نگهدارنده ورق در بر روی میزان برگشت فنری برای ورق‌های مذکور در این نوع فرآیند شکل دهی مد نظر بوده‌اند. پس از انجام آزمایش، نتایج نشان می‌دهند که دما و نیروی نگهدارنده ورق بیشترین تاثیر را روی برگشت فنری و انحنای دیواره ورق دارند که با افزایش دما و نیروی نگهدارنده ورق میزان برگشت فنری و انحنای دیواره ورق کم می‌شوند.

کلمات کلیدی: ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/ پی‌وی‌سی؛ فرآیند کشش-خمش U شکل؛ برگشت فنری؛ انحنای دیواره

ورق.

۱. مقدمه

کامپوزیت‌ها بنا به مزایایی نظیر استحکام به وزن بالا و عمر خستگی زیادی که در مقایسه با فلزات دارا می‌باشند، کاربردهای بسیار گسترده‌ای پیدا کرده‌اند؛ از جمله در صنایعی نظیر هوافضا و صنایع خودروبی که در آنها سبکی قطعات از اهمیت بالایی برخوردار است. امروزه محصولات کامپوزیتی زمینه پلیمری جایگزین بسیاری از قطعات فلزی شده‌اند [۱ و ۲]. دو دسته عمده از کامپوزیت‌های زمینه

پلیمری شامل گرمانرم و گرماسخت است که نوع اول بنا به مزایایی از قبیل مقاومت محیطی و مقاومت به ضربه خوب، قابلیت شکل-دهی مجدد، چقرمگی شکست بالا، قابلیت بازیابی مجدد و زمان نگهداری بالایی که در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه گرماسخت دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴۳]. پی‌وی‌سی یکی از گرمانرم‌های پرکاربرد با مزایای اقتصادی بالاست که با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار خوبش در صنایع مختلف کاربرد داشته و در حجم بالایی تولید می‌شود [۵]. از جمله این خواص می‌توان به مقاومت بالا به شرایط نامناسب جوی، مقاومت سایشی بالا، هزینه تولید پایین و عمر بالا اشاره نمود. همچنین پی‌وی‌سی دارای گروه-های عاملی قطبی است که موجب بالا بودن خاصیت چسبندگی آن می‌شود. در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم، اتصال بین الیاف تقویتی و زمینه در آن بسیار بهتر بوده و این سبب تولید قطعات مستحکم‌تری می‌شود. به دلیل ساختار بی‌شکل پی‌وی‌سی، این کامپوزیت‌ها با حرارت‌دهی نرم می‌شوند و نقطه ذوب مشخصی ندارند. بنابراین کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی می‌توانند با سهولت با گرمایش کمی شکل‌دهی شده که این مزیت آنها را برای تولید قطعات پیچیده و بزرگ مناسب می‌سازد. پایداری ابعادی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی در مقایسه با سایر کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم ویژگی دیگری است که موجب افزایش کاربرد این کامپوزیت‌ها می‌شود [۶].

شکل‌دهی ورق‌ها یکی از پروسه‌های مهم تولید محصولات صنعتی است. به عنوان نمونه‌های از این فرآیندهای پرکاربرد می‌توان به برش، خمکاری، کشش عمیق و کشش کم‌عمق^۱ اشاره کرد. در بین این فرآیندها کشش کم‌عمق به سبب تولید محصولات متنوع توسط آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. از جمله این محصولات می‌توان به ساخت بدنه اتومبیل، ظروف مختلف و قسمت‌های بدنه وسایل پرنده اشاره کرد [۷]. یکی از عیوب مهم در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌ها برگشت فنری می‌باشد. برگشت‌پذیری ناشی از بخش الاستیک کرنش‌های قطعه‌کار پس از فرآیند باربرداری می‌تواند به طور نامناسبی شکل قطعه را تحت تاثیر قرار دهد. به منظور رسیدن به ابعاد مورد نظر طراح در محصول نهایی و سادگی در مونتاژ، راهکارهایی را جهت کاهش این پدیده در فرآیندهای شکل‌دهی باید مورد توجه قرار داد. ورق در فرآیند شکل‌دهی تحت تاثیر ترکیبی از بارگذاری خمشی، کششی و باربرداری می‌باشد. بنابراین این پدیده از پیچیدگی خاصی برخوردار است. در گذشته از تجربه طراح و روش سعی و خطا به منظور کاهش میزان برگشت‌پذیری و بالا بردن دقت ابعادی محصول استفاده می‌شد که باعث انجام آزمایشات وقت‌گیر و پرهزینه می‌گردید. در دهه‌های گذشته پیش‌بینی برگشت‌پذیری از تئوری ساده مبتنی بر اصول خمش خالص یک تیر ساده استفاده می‌شد. اوياکدی و همکاران [۸] به بررسی برگشت-فنری در فرآیند کشش-خمکاری U شکل پرداختند. آن‌ها با استفاده از آزمایشات عملی و شبیه‌سازی این فرآیند برای ورق آلومینیومی، اثر پارامترهای مختلف از جمله شعاع ماتریس و نیروی نگهدارنده ورق و عمق کشش را بر روی درصد برگشت‌فنری مورد سنجش قرار دادند. کدخدایان و دیگر همکاران [۹] به بررسی پدیده برگشت فنری مواد چندلایه در فرآیند خمکاری V-شکل پرداختند. ایشان تاثیر عواملی هم‌چون شعاع قالب، نیروی بارگذاری و تغییر ضخامت نسبی لایه‌ها بر روی پدیده برگشت فنری را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که علی‌رغم افزایش انحنا و وارد شدن به ناحیه پلاستیک کماکان یک هسته الاستیک در ورقه به وجود می‌آید که همین امر، پدیده برگشت فنری را تشدید می‌کند. شاه‌حیدری [۱۰] در تحقیقی دیگر به بررسی اثر سنبه نیم‌کروی در فرآیند اتساع ورق‌های دولایه از جنس فولاد و آلومینیوم توسط نرم‌افزار آباکوس^۲ پرداخت و جهت تایید نتایج شبیه‌سازی از آزمایش‌های تجربی استفاده کرد. سپس اثر پارامترهای حد تسلیم، مدول یانگ، عمق کشش و ضریب اصطکاک را در برگشت فنری بررسی نمود. وی نشان داد که اختلاف نتایج تجربی و مدل‌سازی کم‌تر از ۱۰ درصد بوده و افزایش نسبت مدول یانگ به حد تسلیم و عمق کشش سبب کاهش برگشت فنری به دلیل کاهش ناحیه نواری الاستیک شده در حالیکه ضریب اصطکاک اثر محسوسی در برگشت فنری نشان نداده است. ژبانی و دیگر همکاران [۱۱] تغییرات برگشت فنری آلیاژ تیتانیوم در فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق کروی را با توجه به پارامتر دما مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که همواره شکل‌پذیری آلیاژهای تیتانیوم در

¹Stamping²Abaqus(software)

دماهای بسیار بالا افزایش بسیار زیادی داشته و از طرفی اثرات برگشت فنی نیز کاهش یافته است. پانسیست [۱۲] و جیانگ [۱۳] و موری [۱۴] با انجام پژوهش‌هایی برای ورق‌های با جنس مختلف نتیجه گرفتند که برگشت فنی ورق‌ها با افزایش تنش تسلیم افزایش می‌یابد و همچنین نشان دادند که افزایش مدول الاستیک و کرنش سختی باعث افزایش برگشت فنی می‌گردد. سایدنی [۱۵] با استفاده از آموزش خمش نشان داد که شعاع کوچکتر ماتریس باعث کاهش برگشت فنی می‌شود. لی و یانگ [۱۶] روی فولاد آلیاژ آلومینیوم نشان دادند که با افزایش نیروی نگهدارنده ورق، برگشت فنی کاهش می‌یابد ولی بعد از آن با هر چه بیشتر شدن نیروی نگهدارنده به علت افزایش کرنش سخت شوندگی، برگشت فنی افزایش می‌یابد. در مورد اثر ناهمسان‌گردی مواد، ورما [۱۷] نشان داد که مواد همسان‌گردی ($\nu=1$) برگشت فنی کمتری نسبت به مواد ناهمسان‌گردی دارد.

در این پژوهش به شکل‌دهی کشش-خمش U شکل ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و پی‌وی‌سی و مطالعه اثرات پارامترهای مختلف بر روی میزان برگشت فنی پرداخته شده است. با وجود اینکه تحقیقاتی در مورد شیوه ساخت این کامپوزیت‌ها انجام شده است اما هنوز در مورد فرآیندهای شکل‌دهی کامپوزیت‌ها و بررسی عیوب شکل‌دهی از جمله برگشت فنی تحقیقات کافی گزارش نشده است. در بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی، قطعه پس از باربرداری تحت بازگشت فنی و تغییر شکل قرار می‌گیرد. بنابراین پیش‌بینی دقیق میزان برگشت فنی برای طراحی فرآیند شکل‌دهی امری ضروری است. در این تحقیق ابتدا ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی در آزمایشگاه ساخته شد و سپس این ورق‌ها تحت فرآیند کشش-خمش U شکل قرار گرفت. دمای کاری فرآیند، نوع لایه‌چینی و میزان نیروی نگهدارنده عواملی هستند که تاثیر آن‌ها بر روی میزان برگشت‌پذیری ورق‌های کامپوزیتی در فرآیند مذکور، با انجام آزمایش‌های متعدد بررسی شده است.

۲. ساخت ورق اولیه

ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده متشکل از فاز زمینه و فاز تقویتی می‌باشند. برای تولید این نوع ورق‌ها لایه‌های فاز زمینه و فاز تقویتی به صورت چندلایه و در دمای بالا روی هم قرار گرفتند (روش انباشت لایه‌ها) و از الیاف شیشه تک‌جهته به عنوان فاز تقویتی استفاده گردید. مشخصات این الیاف شیشه مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده [۱۸] در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات و خواص الیاف شیشه [۱۸]

چگالی سطحی (g/m^2)	ضریب انبساط حرارتی عرضی ($m/m/^\circ C$)	ضریب انبساط حرارتی محوری ($m/m/^\circ C$)	نسبت پواسون عرضی	نسبت پواسون محوری	مدول عرضی (Gpa)	مدول محوری (Gpa)
236	5×10^{-6}	5×10^{-6}	0.20	0.20	85	85

به منظور تولید ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی (مشخصات پی‌وی‌سی در جدول (۲) آورده شده است) دو نوع لایه‌چینی به صورت ۴[۳۰/-۳۰] و ۴[۰/۹۰] طراحی شد. برای ساخت ورق کامپوزیتی با زمینه گرم‌انرم از جنس پی‌وی‌سی نیاز به دمای بالا جهت نرم شدن پی‌وی‌سی و ایجاد اتصال بین الیاف تقویتی می‌باشد. بدین منظور از قالب پرس گرم با قابلیت کنترل دمایی استفاده شده است. سپس لایه‌های الیاف شیشه و ماده پی‌وی‌سی به صورت لایه‌ای روی هم قرار گرفته و در دستگاه پرس گرم قرار داده شد. پس از گذشت مدت زمان مشخصی ماده پی‌وی‌سی در اثر حرارت ۲۳۰ درجه سانتیگراد نرم شده و لایه‌های الیاف شیشه را کامل در بر می‌گیرد. زال و همکارانش [۱۹] نشان دادند که بهترین دما برای تولید این نوع ورق کامپوزیتی ۲۳۰ درجه سانتیگراد است. در این دما ورق از لحاظ خواص مکانیکی بهترین عملکرد را خواهد داشت که مهمترین دلیل آن کیفیت مطلوب آغشته‌سازی الیاف شیشه در زمینه پی‌وی‌سی است. این امر علاوه بر ایجاد خواص مکانیکی مطلوب، باعث یکنواختی خواص در تمامی سطوح ورق خواهد بود. پس از انجام مراحل گرمکاری و تولید، ورق در دمای محیط خنک شده است. به منظور آماده‌سازی برای آزمایش کشش-خمش U

شکل ورق به ابعاد $22\text{mm} \times 2\text{mm}$ برش داده شد. نمونه ورق اولیه تولید شده در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از آن توسط کولیس ضخامت هر ورق اندازه‌گیری شد که به طور تقریبی ضخامت هر ورق به میزان 2mm بدست آمد. با توجه به اینکه تولید این ورق‌ها با ضخامت کاملاً یکسان مشکل است، ورق‌های تولیدی عمدتاً با رواداری ± 0.1 تولید شدند.



شکل ۱. ورق (نوار) کامپوزیتی

جدول ۲. مشخصات و خواص ماده پی‌وی‌سی

ساختار پی‌وی‌سی (پلی وینیل کلراید)	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	دمای شیشه‌ای ($^{\circ}\text{C}$)	ضریب انبساط حرارتی ($\text{m/m}/^{\circ}\text{C}$)	مدول یانگ (Gpa)	ضریب ضربه پواسون	ضخامت (mm)
آمورف	-	90	5×10^{-5}	1.398	0.4	0.15

۲,۱ خواص مکانیکی ورق

به منظور بدست آوردن خواص کششی کامپوزیت به ویژه مدول الاستیسیته از آموزش کشش استفاده شد. کلیه آزمایش‌های تست کشش با سرعت $2\text{mm}/\text{min}$ مطابق با استاندارد ASTM:D3039 انجام گردید و نتایج به صورت جدول (۳) استخراج شد.

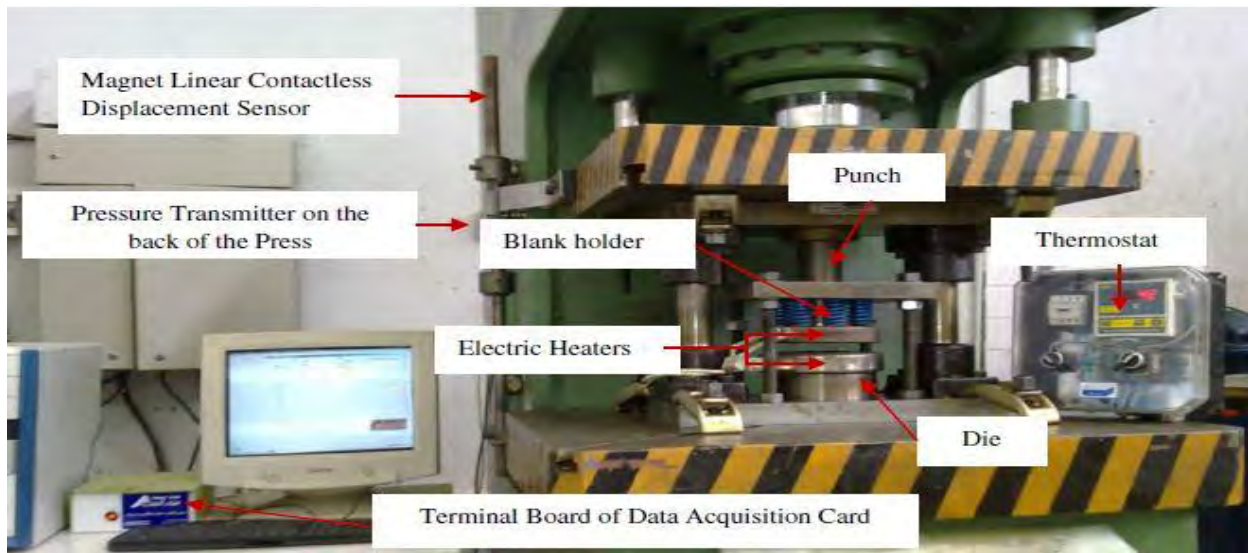
جدول ۳. مشخصات ورق کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی

E_{11} (Gpa)	E_{22} (Gpa)	ν_{12}	G_{12} (Gpa)	G_{13} (Gpa)	G_{23} (Gpa)
19	1.7	0.35	0.63	0.76	0.76

۳. تجهیزات آزمایش کشش_خمش U شکل در دمای بالا

فرآیند کشش_خمش U شکل ورق‌های کامپوزیتی توسط دستگاه پرس هیدرولیک 60 تنی انجام شده است. ماتریس و سنبه استوانه‌ای شکل از فولاد SPK و نگهدارنده ورق از فولاد MO40 ساخته شده‌اند. دیگر قطعات قالب از جنس فولاد CK45 می‌باشند. نیروی نگهدارنده ورق به وسیله هشت فنر یکسان B/32/051 با طول اولیه 51mm و ضریب سفتی $k=134\text{n}/\text{mm}$ که بر روی نگهدارنده ورق نصب شده‌اند، اعمال می‌شوند. هیچ گونه روانکاری در آزمایش استفاده نشده و ضریب اصطکاک به طور میانگین بین ورق و اجزای قالب به میزان 0.17 اندازه‌گیری شد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است سنبه، ماتریس و ورق توسط یک

گرمکن قابل کنترل (Thermostat) در حین آزمایش در حد دلخواه گرم شده و دمای آنها ثابت نگه داشته می‌شود. در جدول (۴) ابعاد قالب آزمایش کشش-خمش U بیان شده است.



شکل ۲. تجهیزات آزمایش فرآیند کشش-خمش U شکل

جدول ۴. ابعاد قالب آموزش کشش-خمش U شکل

اجزای قالب	شعاع لبه ماتریس	قطر داخلی نیروی نگهدارنده ورق	قطر بیرونی نگهدارنده ورق	قطر سنبه	قطر ماتریس	شعاع سنبه
مقدار به میلیمتر	9	75	160	64.5	70	6

۴. شرح آزمایش

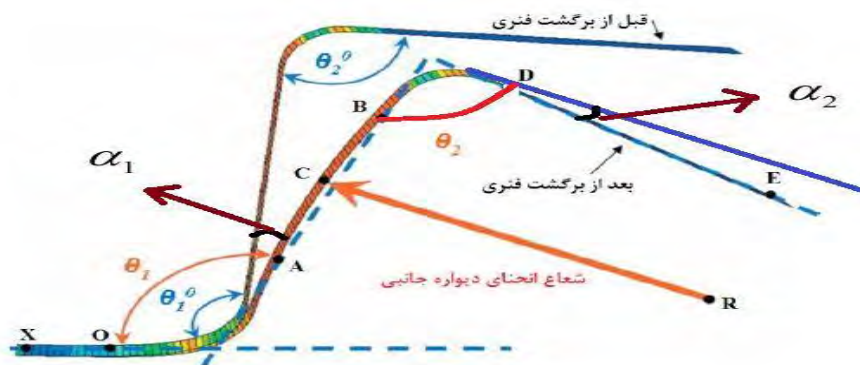
هدف از انجام آزمایش بررسی اثر پارامترهای مختلف از جمله دما، نیروی نگهدارنده ورق و نوع لایه‌چینی بر میزان برگشت‌پذیری ورق کامپوزیتی در فرآیند کشش-خمش U شکل برای ورق‌های تولید شده است. به منظور مقایسه بهتر اثرات هر پارامتر بر میزان برگشت‌پذیری ۱۲ آزمایش طراحی شد که در جدول (۵) آورده شده‌اند. در انجام هر آزمایش پس از قرارگیری ورق در قالب، نیروی نگهدارنده ورق با تنظیم نیروی فنرها به کمک پیچ‌های تعبیه شده بر روی آنها تنظیم می‌شوند. با روشن کردن گرم‌کن الکتریکی تعبیه شده در اطراف ماتریس و نگهدارنده ورق و پس از مطمئن شدن از تثبیت دمای طراحی شده در نمایشگر با قطع جریان توسط ترموستات، فرآیند کشش-خمش انجام می‌گردد (عمق کشش برای تمامی آزمایشات برابر ۶۰ میلیمتر بوده است). سپس با خاموش کردن گرم‌کن الکتریکی و با گذشت زمان دمای مجموعه قالب و ورق به دمای محیط می‌رسد که پس از در آوردن نمونه از قالب برگشت فنری در قطعه اتفاق می‌افتاد. سپس قطعات با یکدیگر مقایسه شده و میزان برگشت فنری آنها اندازه‌گیری شد.

جدول ۵. آزمایش های طراحی شده

شماره آزمایش	نیروی نگهدارنده ورق (KN)	دما (°C)	لایه چینی
1	0	30	[0/90] ₄
2	8.5	30	[0/90] ₄
3	12.8	30	[0/90] ₄
4	0	100	[0/90] ₄
5	8.5	100	[0/90] ₄
6	12.8	100	[0/90] ₄
7	0	30	[30/-30] ₄
8	8.5	30	[30/-30] ₄
9	12.8	30	[30/-30] ₄
10	0	100	[30/-30] ₄
11	8.5	100	[30/-30] ₄
12	12.8	100	[30/-30] ₄

۵. بررسی نتایج و تحلیل داده‌ها

در بررسی برگشت فنری قطعات تولید شده، توجه به این نکته ضروری است که دو نوع برگشت فنری در این قطعات رخ داد. اول میزان انحنای دیواره جانبی و زاویه‌ای که از راستای اولیه خود پیدا می‌کند. نوع دوم میزان زاویه‌ای که لبه بیرونی ورق یا فلانج^۱ از راستای اولیه خود گرفت که این دو مورد به صورت شماتیک در شکل (۳) این زوایا نشان داده شده‌اند. زاویه α_1 بیانگر میزان برگشت فنری دیواره (انحنای دیواره جانبی) و زاویه α_2 بیانگر زاویه برگشت فنری لبه بیرونی ورق می‌باشد. دیواره جانبی قطعه U شکل تحت ترکیبی از بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. میزان برگشت فنری در یک قطعه تحت تغییر شکل الاستیک - پلاستیک رابطه مستقیمی با محدوده منطقه پلاستیک دارد. بدین ترتیب که هر چه این منطقه گسترش یافته و سطح تنش‌ها بالاتر باشد مقدار بازگشت فنری در قطعه کاهش خواهد یافت.

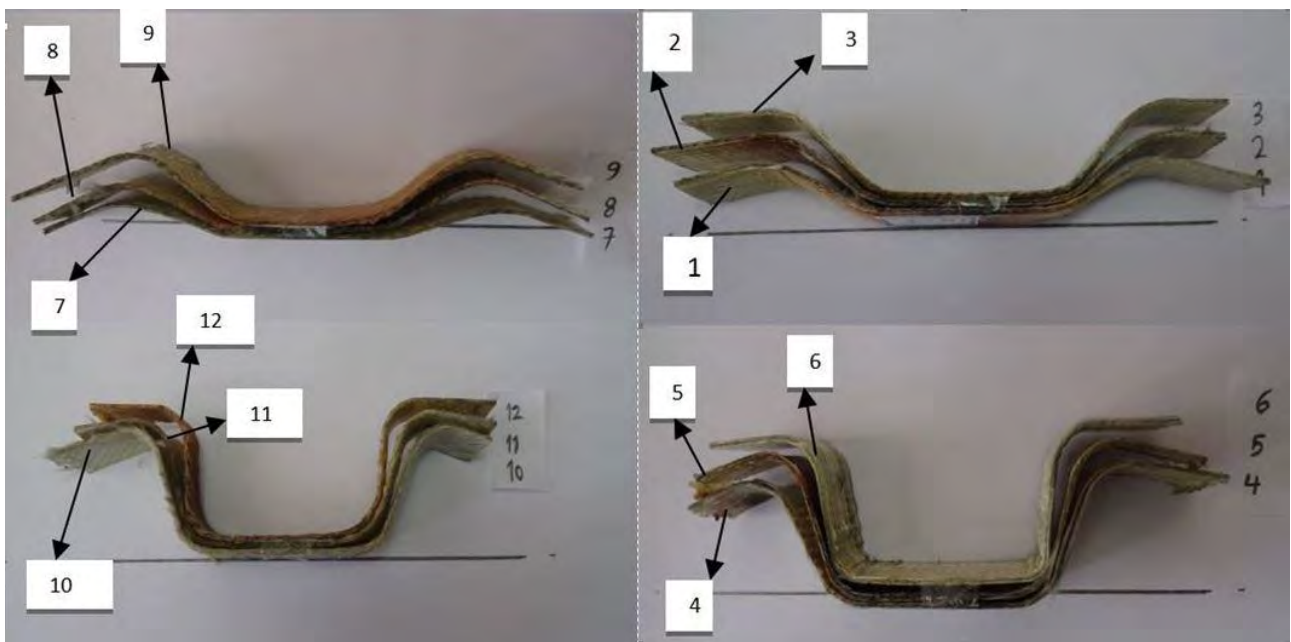


شکل ۳. شماتیک عیب برگشت فنری

¹Flange

توزیع تنش در دیواره نزدیک به قالب به صورت تنش کششی و در دیواره نزدیک به سنبه به صورت تنش فشاری است و این توزیع غیر یکنواخت تنش موجب بروز پدیده انحنای دیواره جانبی قطعه می‌شود. موضوع مهم دیگر سازوکار تغییر شکل ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی می‌باشد. سازوکار شکل‌دهی این ورق‌ها مبتنی بر تغییر موقعیت الیاف در داخل زمینه گرم‌انرم (پی‌وی‌سی) با توجه به عدم امکان تغییر شکل پلاستیک خود الیاف تقویتی است. با توجه به این اثر افزایش دما شرط لازم برای شکل‌پذیری بیشتر ورق‌های کامپوزیتی است. چون با افزایش دما زمینه پی‌وی‌سی به حالت خمیری نزدیک‌تر شده و در اثر تنش‌ها و کرنش‌های برشی الیاف شیشه راحت‌تر دچار تغییر شکل می‌شود (تغییر زاویه بین الیاف شیشه). سازوکار دیگر تغییر شکل این ورق‌ها لغزش لایه‌های کامپوزیتی بر روی هم است.

پس از انجام آزمایش‌ها میزان انحنای دیواره ورق و میزان برگشت فنری قطعات تولید شده که در شکل (۴) نشان داده شده است، بر طبق طراحی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. با دو روش این اندازه‌گیری صورت پذیرفت. اول با زاویه‌سنج مرکب و روش دوم توسط نرم افزار دیجیتایزر^۱ زاویه‌های مدنظر اندازه‌گیری شد. به منظور مقایسه بهتر اثر پارامترهای طراحی شده بر روی برگشت فنری و انحنای دیواره ورق، نتایج اندازه‌گیری شده بصورت نمودار نیز استخراج گردید که در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است.



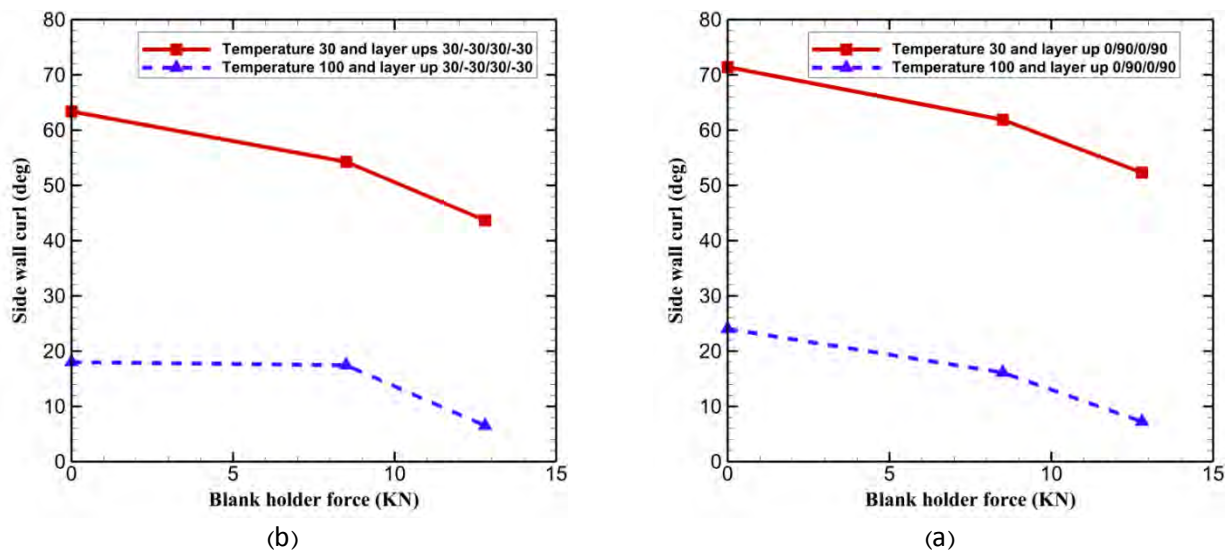
شکل ۴. اثر نیروی نگهدارنده ورق و دما بر روی شکل هندسی نهایی پس از برگشت فنری بر اساس طراحی آزمایش انجام شده

۵.۱ اثر دما

همانطور که از نتایج (شکل‌های (۵) و (۶)) مشهود است، قطعه تولید شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای ۳۰ درجه سانتیگراد دچار برگشت فنری و انحنای دیواره جانبی کمتری است. پس از پایین آمدن سنبه و ایجاد تغییر شکل در عمق مورد نظر، سنبه در همان موقعیت ساکن باقی می‌ماند، گرم‌کن خاموش می‌شود تا قطعه تولید شده در زیر پانچ سرد شود. با بالا آمدن سنبه به محض خارج کردن از قالب، قطعه دچار برگشت‌پذیری می‌شود. در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد ورق کامپوزیتی رفتار نرم از خود نشان می‌دهد و راحت به درون قالب سیلان می‌یابد و همچنین با فرار گرفتن تحت تنش‌های کششی، مناطق بیشتری از ورق وارد ناحیه پلاستیک شده و لذا پس از سرد شدن و خارج شدن از زیر قالب قطعه دچار برگشت فنری ناچیزی می‌شود. در حین شکل‌دهی

¹ Digitizer

ورق در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد به دلیل استحکام بالاتر آن نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، نواحی کمتری از ورق وارد منطقه پلاستیک شده و به دلیل بیشتر بودن ناحیه الاستیک، پس از خارج شدن قطعه از قالب برگشت پذیری شدیدتری نسبت به حالت قبل رخ می‌دهد. دلیل این نوع رفتار ورق در این است که در دمای بالا مکانیزم لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و همچنین لغزش الیاف شیشه در درون زمینه پی‌وی‌سی بیشتر فعال شده و بنابراین شکل‌پذیری پلاستیک ماده افزایش پیدا کرده است.



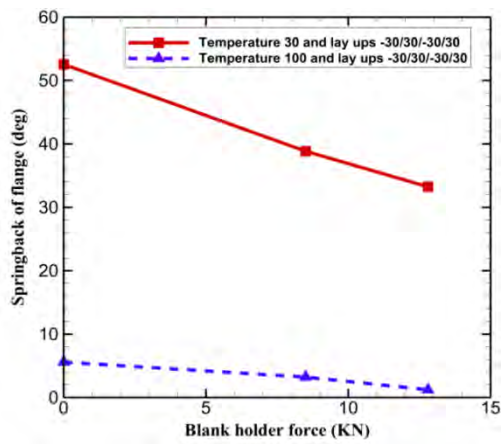
شکل ۵. (a) و (b) اثر دما و نیروی نگهدارنده ورق بر روی انحنای دیواره جانبی

۵,۲ اثر نیروی نگهدارنده ورق

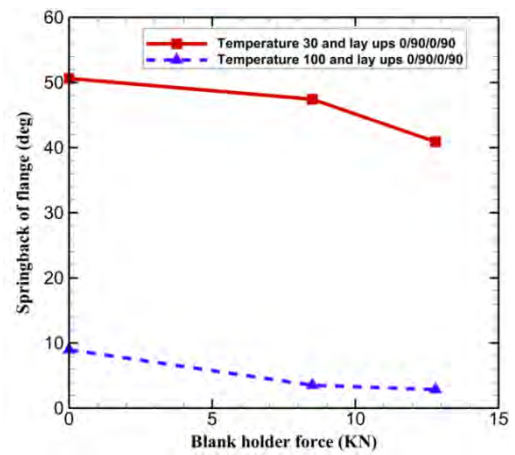
با بررسی نتایج حاصل از تغییرات نیروی نگهدارنده ورق بر روی میزان برگشت‌پذیری ورق کامپوزیتی (شکل‌های (۵) و (۶)) مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی نگهدارنده ورق میزان برگشت‌پذیری لبه ورق و انحنای دیواره جانبی کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر این است که در خلال کشیده شدن ماده به داخل قالب رویه بالایی تحت تنش کششی و رویه پایینی تحت تنش فشاری قرار دارند و برعکس در تماس با سنبه، رویه بالای ورق تحت تنش فشاری و رویه دیگر که در طرف قالب است تحت تنش کششی قرار می‌گیرند. افزایش نیروی نگهدارنده ورق سبب می‌شود و تنش‌ها در مقطع بیشتر از نوع کششی باشند در حالی که در مقابل جریان ماده مقاومت بیشتری ایجاد می‌شود سیلان ماده در تنش بزرگتری رخ دهد، بنابراین برگشت فنری کم می‌شود. در نیروی نگهدارنده کوچک تنش‌های خمشی و فشاری کمتر بوده و سیلان ماده در تنش کمتری اتفاق می‌افتد که در نتیجه کاهش برگشت فنری را به دنبال دارد. البته باید به این نکته هم توجه کرد که با افزایش نیروی نگهدارنده ورق میزان لهیدگی سطحی ورق در ناحیه فلانچ و در ناحیه خم افزایش یافته که باعث ازدیاد تنش‌های پسماند پلاستیک در قطعه شده که به تبع آن نیز برگشت فنری کاهش می‌یابد.

۵,۳ اثر نوع لایه چینی

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر میزان برگشت فنری در این مواد کامپوزیتی چندلایه، نوع لایه‌چینی الیاف است. نوع لایه چینی الیاف باعث تغییر مدول الاستیک و استحکام تسلیم ورق در جهت کشش می‌شود. همانطور که از نتایج آزمایش (شکل (۷)) مشهود است، میزان برگشت فنری برای لایه‌چینی ۴ [۰/۹۰] بیشتر از میزان برگشت فنری برای لایه‌چینی ۴ [۳۰/-۳۰] می‌باشد. در تحلیل این موضوع می‌توان گفت که در نوع لایه‌چینی ۴ [۰/۹۰] به دلیل استحکام تسلیم بالاتر ورق نسبت به لایه چینی ۴ [۳۰/-۳۰]،

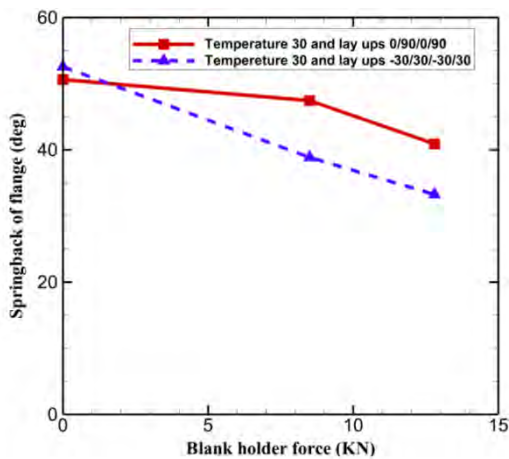


(b)

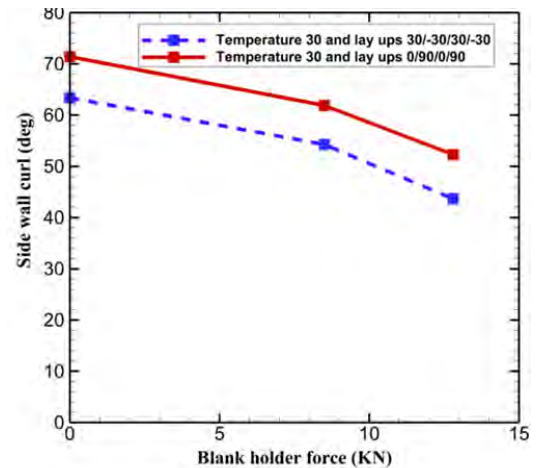


(a)

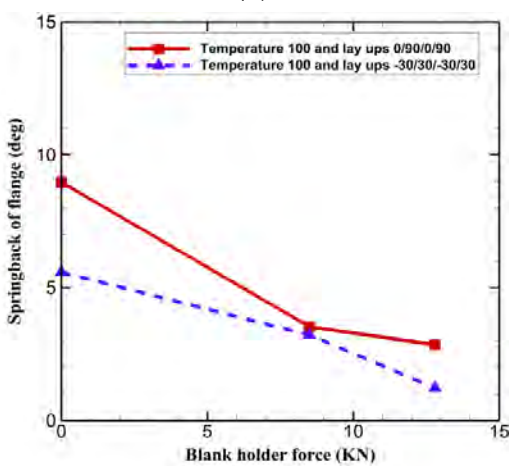
شکل ۶. (a) و (b) اثر دما و نیروی نگهدارنده ورق بر روی بازگشت فنری فلانج



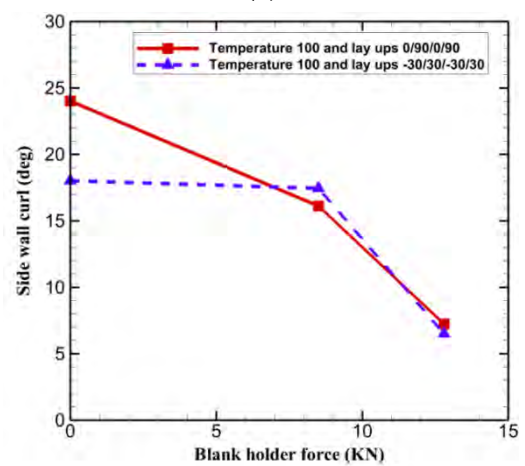
(b)



(a)



(d)



(c)

شکل ۷. (a) ، (b) ، (c) و (d) اثر نوع لایه چینی بر روی برگشت فنری و انحنای دیواره داخلی ورق

مناطق کمتری از ورق وارد ناحیه پلاستیک شده و میزان برگشت فنری بیشتر خواهد بود. سازوکار اصلی تغییر شکل در لایه‌چینی [۰/۹۰]، کرنش‌های برشی درون هر لایه است. در حالی که در لایه‌چینی [۳۰/-۳۰] سازوکار تغییر شکل علاوه بر کرنش‌های برشی شامل لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر نیز می‌باشد [۲۰]. در ورق با لایه‌چینی [۳۰/۳۰] نیروی کمتری برای تغییر شکل لازم است و مناطق بیشتری وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند که سبب می‌شود برگشت فنری در مقایسه با لایه‌چینی [۰/۹۰] کاهش پیدا کند.

مراجع

- [1] S. Hoseini, A. Pol, Investigation Of the Tensile and the Flexural Properties of the Glass/Epoxy Composites Reinforces with Nanocaly Particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, (2014).
- [2] W. Wu, L. Xie, B. Jiang, G. Ziegmann, Simultaneous Binding and Manufacturing Concept for Textile Reinforced Pcbt Composites: *Manufacturing And Flexural Properties, Composite Structures*, Vol. 105, pp. 279- 287, (2013).
- [3] H. Hwang, K. Hwang, Stamp Forming Of Locally Heated Thermoplastic Composites, *Composites: Part A*, Vol. 33, No.5, pp. 669-676, (2002).
- [4] K. Endo, Synthesis and Structure of Poly (Vinyl Chloride), *Progress In Polymer Science*, Vol. 27, No .10, pp. 2021-2054, (2002).
- [5] H. Parton, I. Verpoest, In Situ Polymerization of Thermoplastic Composites Based On Cyclic Oligomers, *Polymer Composites*, Vol. 26, No. 1, pp. 60- 65, (2005).
- [6] A. Rajabi, M. Kadkhodayan, M. Manoochehri, R. Farjadfar, Deep Drawing of Thermoplastic Metal – Composite Structures: Experimental Investigation, Statistical Analyses and Finite Element Modeling, *J. Mater. Process. Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 152-170, (2015).
- [7] S. Leg, D. Yani, An Assessment of Numerical Parameters Influencing Springback In Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process. *J Mater Process Technology*, Vol. 60, No. 5, pp. 80-81, (1998).
- [8] H. Ouakdi, V. Louahdi, D. Khirani, R. Taboue, "Evaluation of Springback under the Effect of Holding Force and Die Radius in a Strength Bending Test". *Materials and design*, Vol. 35, pp. 106-112, (2012).
- [9] M. Shahheydari, B. Molayi, An Investigation of Springback on Stamping Process, *Iran manufacturing engineering conference*, Iran, IMEC 2009, Tehran, Iran, Vol. 7, pp. 404, (2009).
- [10] M. kadkhodayan, R. Akbari, An Investigation into the Effect of Friction and Blank Holder Force on the Springback of U-bending of an Isotropic Plate, *Journal of applied and computational sciences in mechanics*, vol.14, NO 7, pp.103-108, (2014).
- [11] N. Jiani, A. Meraati, An FE Simulation of Titanium Sheets on Deep Drawing Process, *Iran international mechanics engineering*, IMEC, Tehran, Iran, Vol. 2, pp. 27-29, (2011).
- [12] S. Pantxi, N. Ramakrishnan, A. Meraj, S. Shambhavi, Finite Element Analysis of Sheet metal Bending Process to Predict the Springback. *Miter Des*, Vol. 2, No. 2, pp. 31–62, (2010).
- [13] Z. Jiang, H. sang, M. Zian, G. Li, Coupling Effects of Material Properties and Bending Angle on the Springback Angle of Titanium Alloy Tube during Numerically Controlled Bending. *Mater Des*, Vol. 2, No. 3, pp. 71–73, (2010).
- [14] K. Mori, M. Akita, Springback Behaviour in Bending of Ultra High Strength Steel Sheets Using CNC Servo Press. *Int J Mach Tools Manuf*, Vol. 12, No. 4, pp. 212-214, (2014).
- [15] A, Saidane D. Experimental Approach and RSM Procedure on the Examination of Springback in Wiping-Die Bending Processes. *J Mater Process Technology*, Vol. 33, pp. 323–325, (2007).
- [16] S. Leg, D. Yani, An assessment of Numerical Parameters Influencing Springback in Explicit Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process. *J Mater Process Technology*, Vol 7, No. 8, pp. 60–7, (1998).
- [17] R. Verma, A. Haldar, Effect of Normal Anisotropy on Springback. *J Mater Process Technology*, Vol. 33, pp. 218–225, (2007).
- [18] Sonmez Holding Company, Iran, Tehran, (1395).
- [19] V. Zal, H. Moslemi, A. Bahramian, J. Shahbazi, Experimental investigation on the roll forming of PVC/Aluminum/Glass Fabric FMLs into Channel Section Profiles, *Modares mechanical engineering*, Vol. 16, N09, pp. 207-215, (2016).
- [20] V. Zal, H. Moslemi, A. Bahramian, J. Sinke, Investigation of the Effect of Temperature and Layup on the Press Forming of Polyvinyl Chloride-based Composite Laminates, *international Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, No. 09, pp. 218–225, (2016).