مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 129-138

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی فرآیند کشش عمیق ورق کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی در دماهای مختلف

محمد پاکدامن[1]، عبدالرحمن جامی الاحمدی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948974، jaami-a@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 مرداد 1396

پذیرش: 10 شهریور 1396

ارائه در سایت: 13 مهر 1396

کلید واژگان:

ورق الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی

کشش عمیق

چروکیدگی

دما

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، بررسی فرآیند کشش عمیق و اثر پارامترهای آن بر روی ورق کامپوزیتی ساخته شده از جنس الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی بوده است. ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پلیمری(پی‌وی‌سی) مواد جدیدی هستند که کاربردهای گسترده‌ای دارند. این کامپوزیت‌ها نسبت استحکام به وزن بالایی را در قیاس با آلومینیوم و فولاد دارا می‌باشند. برای انجام آزمایش‌ها نمونه‌های کامپوزیتی با لایه‌چینی $[0/90]_2$ ، $[0/90]_4$ ، $[30/-30]_2$ و $[30/-30]_4$ به روش انباشت لایه‌ها تولید شدند. برای بررسی اثر هر یک از پارامترها روی متغیر خروجی به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایشات برمبنای الگوی تاگوچی استفاده شد. ورق‌های کامپوزیتی تولید شده، در قالب کشش عمیق به‌شکل قطعات فنجانی شکل، شکل‌دهی شدند. نتایج نشان می‌دهند که دو عامل دما و نیروی نگهدارنده ورق روی متغیرهای خروجی بیشترین تاثیر را دارند. هر چه نیروی نگهدارنده ورق افزایش می‌یابد، میزان حداکثر نیروی سنبه (نیروی شکل‌دهی) افزایش یافته و میزان چروکیدگی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش دما، حداکثر نیروی شکل‌دهی به صورت کاملا محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در حالی‌که افزایش دما باعث افزایش میزان چروکیدگی لبه ورق می‌شود. علاوه‌بر این نشان داده می‌شود که با تنظیم اثر متقابل دما و نیروی نگهدارنده ورق می‌توان چروکیدگی را تا حد زیادی کنترل نمود.

An experimental investigation into warm deep drawing process on PVC/fiberglass composite laminates

Mohammad Pakdaman, Abdolrahman Jaamialahmadi*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, jaami-a@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 July 2017
Accepted 01 September 2017
Available Online 05 October 2017

Keywords:
PVC/fiberglass laminate
Deep drawing
Wrinkling
Temperature

ABSTRACT

In this work, the influence of process parameters on warm deep drawing of PVC/fiberglass composite laminates is investigated through the experimental tests. Fiberglass reinforced polymer composite laminate sheets are new emerging materials that have many potential applications. These composites provide high strength to weight ratios exceeding those of aluminum or steel. For the experimental tests, composite samples with $[0/90]_2$, $[0/90]_4$, $[-30/30]_2$, $[-30/30]_4$ lay ups were produced in using film stacking procedure. To investigate the effects of each parameter on the output results, and to decrease the number of experiments, statistical analyses based on Taguchi's method are used. Initially, the composite laminates were produced. Then, these laminates underwent deep drawing deformations and cup-shaped specimen were produced. The results of the study showed that the two variables, temperature and blank holder force, have the most influence on output parameters. By increasing the blank holder force, the required maximum forming force increases and the wrinkling decreases. Whereas, increasing the temperature reduces the maximum forming force and increases the wrinkling phenomenon in the flange of cup. In addition, it is demonstrated that by maintaining an interaction between the forming temperature and blank-holder force, the wrinkling phenomenon can be controlled.

1- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها بنا به مزایایی نظیر استحکام به وزن بالا و عمر خستگی زیاد در مقایسه با فلزات، کاربردهای بسیار گسترده‌ای پیدا کرده‌اند ازجمله در صنایعی نظیر هوافضا و حتی صنایع خودرویی که در آن‌ها سبکی قطعات از اهمیت بالایی برخوردار است. در مواردی محصولات کامپوزیتی زمینه پلیمری جایگزین بسیاری از قطعات فلزی شده‌اند [2,1]. دو دسته عمده کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، شامل گرمانرم و گرماسخت می‌باشند که کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم بنا به مزایایی از قبیل مقاومت محیطی و مقاومت به ضربه خوب، قابلیت شکل‌دهی مجدد، چقرمگی شکست بالا، قابلیت بازیابی مجدد و عمر مفید بالایی که در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Pakdaman, A. Jaamialahmadi, An experimental investigation into warm deep drawing process on PVC/fiberglass composite laminates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 128-138, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

گرماسخت دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [4,3]. 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. از جمله این خواص می‌توان به مقاومت بالا به شرایط نامناسب جوی، مقاومت سایشی بالا، عمر طولانی و هزینه تولید پایین اشاره نمود. همچنین پی‌وی‌سی دارای گروه‌های عاملی قطبی[1] 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. به‌دلیل 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 [5].

شکل‌دهی ورق‌ها یکی از پروسه‌های مهم تولید محصولات صنعتی است. به عنوان نمونه‌هایی از این فرآیندهای پرکاربرد می‌توان به خم‌کاری، کشش عمیق و کشش کم‌عمق یا مهرش[2] اشاره کرد. در بین این فرآیندها به سبب تولید محصولات متنوع، کشش کم‌عمق از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. ازجمله این محصولات می‌توان به ساخت بدنه اتومبیل، ظروف مختلف و قسمت‌های بدنه وسایل پرنده اشاره کرد. رجبی و همکاران [6] به بررسی کشش عمیق مواد چندلایه فلز-کامپوزیت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نیروی نگهدارنده ورق و دما مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی پارامترهای خروجی از جمله چروکیدگی بوده که با تنظیم اثر متقابل بین این دو پارامتر می‌توان چروکیدگی لبه ورق را تا حد زیادی کاهش داده و قطعه سالم‌تری را تولید نمود. ژانگ و همکاران [7] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی کشش کم عمق و خم‌کاریV شکل در دمای بالا برای ورق‌های کامپوزیتی با الیاف کربن پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که شکل‌دهی تحت تاثیر مکانیزم برش الیاف است و با افزایش عمق کشش، زوایای بین الیاف بیشتر تغییر می‌کند. در ادامه ایشان دو متغیر دما و سرعت پایین آمدن سنبه را عوامل موثر بر نیروی لازم برای خم‌کاری V شکل معرفی کرده و نشان دادند که با افزایش دمای فرآیند و کاهش سرعت پایین آمدن سنبه، نیروی لازم برای خم‌کاری V شکل ورق کامپوزیتی کاهش می‌یابد. از دستاوردهای دیگر ژانگ [8] در بررسی تجربی و شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق در دمای بالا برای کامپوزیت‌های الیافی بافته شده می‌توان به کاهش میزان نیروی شکل‌دهی موردنیاز در اثر افزایش دمای کاری فرآیند و کاهش عمق کشش اشاره نمود. سوکلوا و دیگر همکاران [9] به بررسی قابلیت شکل‌پذیری مواد چندلایه ساندویچی کامپوزیتی با لایه میانی پلی‌پروپیلن پرداخته و اثرات ضخامت لایه میانی را بر متغیرهای خروجی فرآیند کشش عمیق سنجیدند. نیروی شکل‌دهی کشش عمیق با افزایش ضخامت لایه‌میانی و کاهش لایه‌های بیرونی کاهش یافته است. همچنین ایشان نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه میانی می‌توان اثر پارگی در قطعه نهایی را از بین برد. پنگ و دیگر همکاران [10] به تحلیل رفتار مکانیکی ورق کامپوزیتی الیافی بافته شده تحت فرآیند شکل‌دهی ورق پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که سازوکارهای شکل‌دهی کامپوزیت‌های الیافی بافته شده با ورق‌های فلزی تفاوت بارزی دارد. در ورق‌های فلزی تغییر شکل پلاستیک و در ورق‌های کامپوزیتی تغییر شکل برشی (تغییر زوایای بین الیاف) عامل تغییرشکل می‌باشند. ژو و دیگر همکاران [11] در بررسی تجربی قابلیت شکل‌پذیری و چروکیدگی کامپوزیت الیافی بافته شده نشان دادند که چروکیدگی در برخی نواحی فلانچ به دلیل عبور تنش‌های برشی از حد بحرانی رخ داده است. از دیگر یافته‌های ایشان می‌توان به معرفی سازوکار تغییر شکل‌برشی به‌عنوان معیار مناسب برای بررسی چروکیدگی کامپوزیت‌ها اشاره نمود. پارسا و دیگر همکاران [12] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی (توسط نرم‌افزار آباکوس) پدیده برگشت فنری برای ماده چندلایه آلومینیوم-کامپوزیت با زمینه پلیمری پلی‌پروپیلن پرداختند. افزایش برگشت فنری در اثر کاهش شعاع داخلی انحنا قالب و افزایش ضخامت چندلایه آلومینیوم-کامپوزیت از یافته‌های پژوهش ایشان بود. موس و همکاران [13] در تحلیل فرآیند کشش کم‌عمق در دمای بالا برای ورق‌های کامپوزیتی الیافی با زمینه پلی‌پروپیلن دریافتند که با افزایش نرخ شکل‌دهی، خطاهای هندسی قطعات تولیدی از جمله برگشت فنری و همچنین عیب جدایش لایه‌ها کاهش می‌یابد. هوی و فردریش [14] برخی از قطعات کامپوزیتی پرکاربرد در استخوان‌پزشکی را توسط فرآیند مهرش در دمای بالا تولید نمودند. ژو [15] به اندازه‌گیری میزان کرنش در فرآیند کشش کم‌عمق ورق‌های کامپوزیتی الیافی در دمای بالا پرداخت. نتایج آزمایشات وی نشان داد که تغییر شکل‌های برشی در فرآیند کشش کم‌عمق سازوکار حاکم بر شکل‌دهی بوده است.

در مورد کشش عمیق ورق‌های (یک یا چندلایه) فلزی قطعاً تحقیقات زیادی صورت گرفته و مقالات متعددی موجود می‌باشد. اما در مورد این ماده صرفاً کامپوزیتی جدید (ورق کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی)، کار پژوهشی در فرآیند کشش عمیق گرم انجام نشده است. در این پژوهش ابتدا شیوه ساخت ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی شرح داده شده و سپس با انجام آزمایش‌های تجربی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دمای کاری فرآیند، نیروی نگهدارنده ورق و نوع لایه‌چینی الیاف بر روی نیروی شکل‌دهی و میزان چروکیدگی بال ورق در فرآیند کشش عمیق پرداخته شده است.

2- ساخت ورق اولیه

ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده متشکل از فاز زمینه و فاز تقویتی می‌باشند. برای تولید این نوع ورق‌ها مطابق "شکل 1" لایه‌های فاز زمینه و فاز تقویتی به صورت چندلایه و در دمای بالا روی هم قرار گرفتند (روش انباشت لایه‌ها). از الیاف شیشه تک جهته به عنوان فاز تقویتی استفاده گردید. مشخصات این الیاف شیشه مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده در جدول 1 آورده شده است.

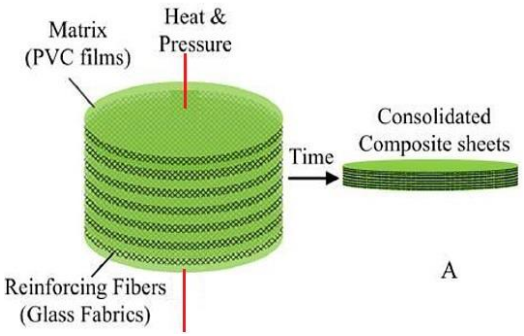

Fig. 1 Schematic of the film stacking procedure

شکل 1 شماتیک تولید لمینت‌های کامپوزیتی به روش انباشت لایه‌ها

[1] Polar Functional Groups
[2] Stamping

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

جدول 1 مشخصات و خواص الیاف شیشه[16]

Table 1 Mechanical properties of fiber glass [16]

مدول محوری (GPa)	مدول عرضی (GPa)	نسبت پواسون محوری	نسبت پواسون عرضی	ضریب انبساط حرارتی محوری (m/m/°C)	ضریب انبساط حرارتی عرضی (m/m/°C)	چگالی سطحی (g/m^2)
85	85	0.2	0.2	5×10^{-6}	5×10^{-6}	236

جدول 2 مشخصات و خواص ماده پی‌وی‌سی

Table 2 Mechanical properties of the PVC (Polyvinyl Chloride)

ساختار پی‌وی‌سی (پلی ونیل کلراید) آمورف	دمای ذوب (^{0}C)	دمای شیشه‌ای (°C)	ضریب انبساط حرارتی (m/m/°C)	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	ضخامت (mm)
	-	90	5×10^{-5}	1.398	0.4	0.15

جدول 3 ابعاد قالب تست کشش عمیق

Table 3 Dimensions of die parts

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

به‌منظور تولید ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی از چهار نوع لایه‌چینی به‌صورت $_2$[0/90]، $_4$[0/90]، $_2$[30/-30] و $_4$[30/-30] استفاده شد.

برای ساخت ورق کامپوزیتی با زمینه گرمانرم از جنس پی‌وی‌سی (جدول 2) نیاز به دمای بالا جهت نرم شدن پی‌وی‌سی و ایجاد اتصال بین الیاف تقویتی می‌باشد. بدین منظور از قالب پرس گرم (شکل 2) که قابلیت کنترل دما را دارد استفاده شده است. 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 در اثر حرارت 230 درجه سانتی‌گراد ماده پی‌وی‌سی نرم شده و لایه‌های الیاف شیشه را کامل در بر می‌گیرد.

زال و همکارانش [17] نشان دادند که مناسب‌ترین دما برای تولید این نوع ورق کامپوزیتی 230 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 سطح ورق خواهد شد. پس از انجام مراحل گرم‌کاری و تولید، ورق در دمای محیط خنک شده است. به منظور تهیه نمونه برای آزمایش کشش عمیق، ورق‌های اولیه به صورت دایره‌ای شکل و با قطرهای 110 mm و 120 mm برش خورده و آماده انجام آزمایش شد. نمونه ورق اولیه تولید شده در "شکل 3" نشان داده شده است.

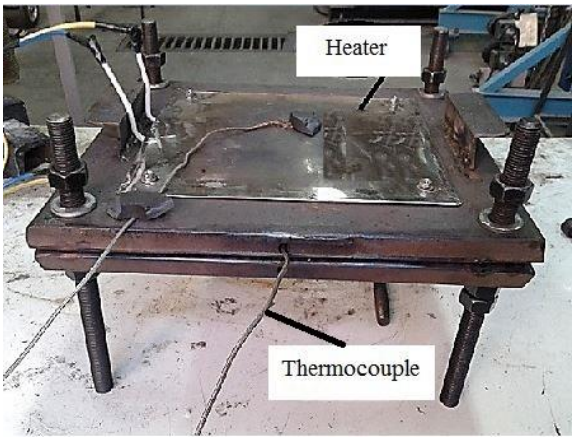

Fig. 2 Laminate production setup (the hot press set)

شکل 2 پرس گرم جهت ساخت ورق کامپوزیتی

ضخامت هریک از ورق‌ها توسط کولیس اندازه‌گیری شد که ضخامت ورق‌های $_2$[30/-30] و $_2$[0/90] به اندازه 1 میلی‌متر و ضخامت ورق‌های $_4$[30/-30] و $_4$[0/90] به اندازه 2 میلی‌متر به‌دست آمد. با توجه به این‌که تولید این ورق‌ها با ضخامت کاملاً یکسان مشکل است، ورق‌های تولیدی عمدتاً با رواداری[1] ± 0.1 mm تولید شدند. ابعاد قالب آزمایش کشش عمیق در جدول 3 نشان داده شده است.

2-1- خواص مکانیکی ورق

به‌منظور به‌دست آوردن خواص کششی کامپوزیت به ویژه مدول الاستیسیته در جهت‌های طولی و عرضی از آزمون کشش استفاده شد. کلیه آزمایش‌های کشش با سرعت 2 mm/min مطابق با استاندارد ASTM:D3039 انجام گرفت.

E_{11} مدول الاستیک در جهت قرارگیری الیاف ، E_{22} مدول الاستیک در جهت عمود بر قرارگیری الیاف (در جهت عرضی) ، G_{12} مدول برشی در جهت عمود بر قرارگیری الیاف واقع در صفحه‌ای که عمود بر جهت قرارگیری الیاف هست، G_{13} مدول برشی در جهت ضخامت ورق واقع در صفحه‌ای که عمود بر جهت قرارگیری الیاف هست، G_{23} مدول برشی در جهت ضخامت ورق

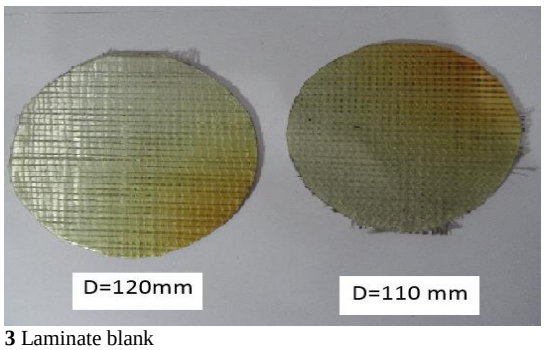

Fig. 3 Laminate blank

شکل 3 ورق اولیه

[1] Tolerance

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

واقع در صفحه‌ای که شامل راستای الیاف است و ν_{12} بیانگر نسبت پواسون (نسبت کرنش در جهت عمود بر الیاف بر کرنش در جهت الیاف می‌باشد.

3- تجهیزات آزمایش کشش عمیق در دمای بالا

فرآیند کشش عمیق ورق‌های کامپوزیتی توسط دستگاه پرس هیدرولیک 60 تنی انجام شده است (شکل 4). ماتریس و سنبه استوانه‌ای شکل از جنس فولاد SPK و نگهدارنده ورق از جنس فولاد MO40 ساخته شده‌اند. دیگر قطعات قالب از جنس فولاد CK45 می‌باشند. که بر روی نگهدارنده ورق نصب شده‌اند، اعمال می‌شوند. به منظور کنترل نیروی ورق‌گیر مکانیزمی طراحی شده است که در آن به وسیله هشت فنر یکسان B/32/051 با طول اولیه 51 mm و ضریب سفتی K=134 kN/mm نیروی ورق‌گیر به ورق اعمال و به طور مستقل از حرکت سنبه قابل تنظیم باشد. این تنظیم توسط 4 عدد مهره که فشردگی فنرها را به کمک ورنیه اندازه‌گیری کنترل می‌کنند، انجام می‌شود. با اندازه‌گیری میزان فشردگی فنرها (توسط ورنیه تعبیه شده) و سپس ضرب عدد به‌دست آمده در میزان سختی فنر مقدار نیروی هر فنر به‌دست می‌آید. با 8 برابر کردن نیروی یک فنر، مقدار نیروی کلی ورق‌گیر به‌دست می‌آید. در حین فرآیند کشش عمیق از هیچ روان‌کاری استفاده نشده و میانگین ضریب اصطکاک بین ورق و اجزای قالب به میزان 0.17 اندازه‌گیری شد. نحوه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک برای ورق کامپوزیتی مطابق آنچه در "شکل 5" برای ورق آلومینیومی نشان داده شده است، می‌باشد. مطابق "شکل 4" سنبه، ماتریس و ورق در حین آزمایش با گرم‌کن قابل کنترل دمای آن‌ها تا حد دلخواه گرم و ثابت نگه‌داشته می‌شود. برای اندازه‌گیری نیروی شکل‌دهی و نیز جابجایی فک پرس، نیاز به حسگرهای مناسب می‌باشد. برای اندازه‌گیری نیروی فرآیند، از یک حسگر فشار[1] با خروجی آنالوگ که فشار پشت پیستون پرس را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند استفاده می‌شود.

جابجایی فک بالایی دستگاه پرس، توسط حسگر جابجایی خطی با هد مغناطیسی[2] اندازه‌گیری می‌شود. این حسگر دارای خروجی دیجیتال بوده و دقت اندازه‌گیری آن در حد میکرون می‌باشد. برای انتقال داده‌های حسگرها به رایانه و تحلیل آن‌ها از یک کارت جمع‌آوری داده[3] مدل PCI[4] استفاده می‌شود. به‌منظور تحلیل داده‌ها و ترسیم نمودار نیرو-جابجایی، از نرم‌افزار متلب[5] استفاده شد. پس از کالیبراسیون داده‌ها، نمودار نیروی سنبه برحسب جابجایی سنبه برای تمامی آزمایش‌ها بدست آمد.

4- شرح آزمایش

قطعه تولید شده در این آزمایش فنجانی شکل و دارای عمق نهایی 25 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود قطعه مطلوب قطعه‌ای است که پس از انجام آزمایش دارای کمترین میزان چروکیدگی بوده و در آن پارگی رخ ندهد. میزان نیروهای مورد استفاده در شکل‌دهی بسیار حائز اهمیت است، زیرا هرقدر میزان نیروهای لازم برای تولید قطعات کمتر باشد هزینه-های تولید نیز پایین‌تر می‌آید. دمای فرآیند در این آزمایش از این نظر مهم است که با تغییر دمای انجام فرآیند خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی و به تبع آن نتایج خروجی تغییر می‌کنند. هم‌چنین جریان ماده ورق به داخل ماتریس توسط نگهدارنده ورق کنترل می‌شود، از این‌رو تغییرات نیروی نگهدارنده ورق نیز در این آزمایش با اهمیت می‌باشد.

پارامترهای قطر و ضخامت ورق، نوع لایه‌چینی، دمای انجام آزمایش و نیروی نگهدارنده ورق به عنوان متغیرهای مهمی که روی رفتار شکل‌پذیری ورق کامپوزیتی تأثیر می‌گذارند، شناخته شده‌اند. سطوح عوامل کنترلی برای ورق‌های ساخته شده عبارتند از:

1- قطر نمونه‌ها (110 mm و 120 mm)

2- ضخامت نمونه‌ها (2 mm و 1 mm)

3- نوع لایه‌چینی ($[0/90]_2$, $[0/90]_4$, $[30/-30]_2$, $[30/-30]_4$)

4- دمای ورق (120, 80, 40, 20 ℃)

5- نیروی نگهدارنده ورق (16.5, 13, 7.5, 2.7 kN)

میزان عمق کشش برای تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر 25 mm در نظر گرفته شد. اگر طبق عوامل و سطوح کنترلی که در بالا آمده است براساس فاکتوریل کامل تعداد آزمایش‌ها محاسبه شوند، باید تعداد 256 آزمایش انجام می‌شد ($4 \times 4 \times 4 \times 2 \times 2 = 256$). اما با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی این تعداد به 16 آزمایش کاهش داده شد. این طراحی براساس آرایه عمودی تاگوچی L16 انجام شده که در جدول 5 آورده شده‌اند.

در انجام هر آزمایش برای تنظیم نیروی ورق‌گیر، پیچ‌های فنرهای ورق‌گیر به اندازه لازم سفت شدند تا نیروی فشاری موردنیاز را به نمونه اعمال کنند. دمای قالب نیز در هر آزمایش توسط یک مجموعه شامل ترموست و المنت پیچیده شده دور قالب کشش عمیق مطابق "شکل 4" تنظیم شد. گرم‌کن به گونه‌ای طراحی شده است تا بتواند یکنواختی توزیع دما در ورق، سنبه، ماتریس و نگهدارنده ورق که در تماس مستقیم با ورق کامپوزیتی هستند را تأمین کند. شماتیک نحوه انتقال حرارت در گرم‌کن و مجموعه قالب در "شکل 6" نشان داده شده است. برای انجام هر آزمایش، نمونه مورد نظر در محل ورق‌گیر قرار گرفته و سپس با روشن کردن گرم‌کن کل مجموعه به دمای مورد نظر رسانده می‌شود. پیچ‌های تنظیم نیروی ورق‌گیر محکم می‌شوند و با زدن کلید استارت پرس، فرآیند کشش عمیق انجام می‌شود. با پایین آمدن سنبه و انجام فرآیند کشش عمیق، به‌کمک حسگرهای تعبیه شده و نرم‌افزار موجود در دستگاه، نمودارهای نیرو-جابجایی با برداشت 10 داده در هر ثانیه ترسیم می‌شود. این نمودار در حافظه دستگاه در قالب یک فایل متنی ذخیره شده تا در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

5- بررسی نتایج و تحلیل داده‌ها

یکی از نکات مهم و قابل ذکر قبل از بررسی نتایج، سازوکارهای تغییر شکل ورق کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه گرمانرم (پی‌وی‌سی) می‌باشد. تغییر شکل ورق‌های کامپوزیتی مشتمل بر دو سازوکار؛ لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و کرنش‌های برشی داخل صفحه‌ای است. این دو سازوکار در "شکل 7" نشان داده شده‌اند. از آن‌جا که ورق کامپوزیتی از چند لایه روی هم با چیدمان مختلف تشکیل می‌شود (روش انباشت لایه‌ها)، خاصیت مکانیکی هر لایه با لایه دیگر متفاوت است. درضمن هر لایه با لایه زیرین و زبرین خود دارای فصل مشترک می‌باشد. هنگامی که کل ورق کامپوزیتی تحت تنش

جدول 4 ثوابت مکانیکی ورق کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی

Table 4 Mechanical properties constants of the PVC/ fiber glass laminate

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

[1] Pressure Transmitter
[2] Magnet linear Contactless Displacement Sensor
[3] Data Acquisition Card
[4] Peripheral Component Interconnect
[5] MATLAB

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

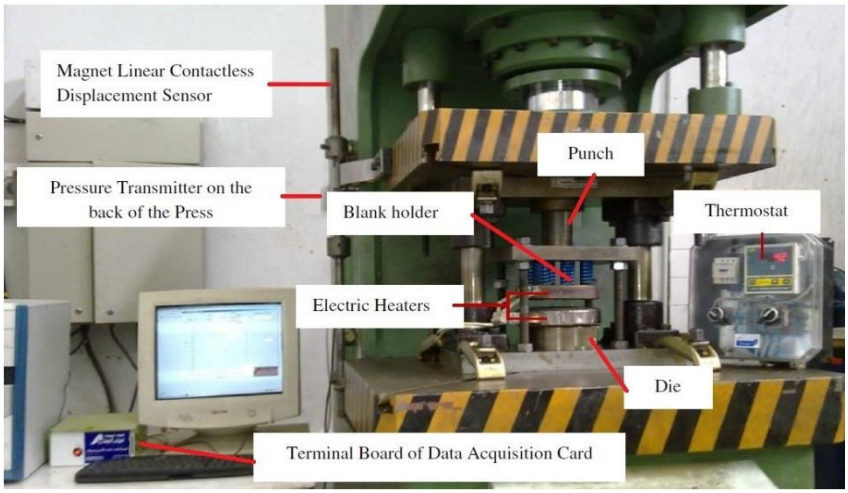

Fig. 4 Experimental test (deep drawing process) equipment

شکل 4 تجهیزات آزمایش فرآیند کشش عمیق

جدول 5 طراحی آزمایشات انجام شده براساس روش تاگوچی

Table 5 Design of experiments based on Taghuchi L16 orthogonal array

شماره آزمایش (N)	دما (°C)	نیروی نگهدارنده ورق (kN)	لایه چینی	ضخامت ورق (mm)	قطر ورق (mm)
1	20	2.7	$[0/90]_2$	1	110
2	20	7.5	$[0/90]_2$	1	110
3	20	13	$[30/-30]_4$	2	120
4	20	16.5	$[30/-30]_4$	2	120
5	40	2.7	$[0/90]_4$	2	120
6	40	7.5	$[0/90]_4$	2	120
7	40	13	$[30/-30]_2$	1	110
8	40	16.5	$[30/-30]_2$	1	110
9	80	2.7	$[30/-30]_2$	1	120
10	80	7.5	$[30/-30]_2$	1	120
11	80	13	$[0/90]_4$	2	110
12	80	16.5	$[0/90]_4$	2	110
13	120	2.7	$[30/-30]_4$	2	110
14	120	7.5	$[30/-30]_4$	2	110
15	120	13	$[0/90]_2$	1	120
16	120	16.5	$[0/90]_2$	1	120

(مثلا تنش کششی) قرار می‌گیرد، این لایه‌ها در فصل مشترک می‌توانند بر روی هم بلغزند و این لغزش باعث تغییر شکل می‌گردد (لغزش لایه‌ها بر روی هم[1]). در حین شکل‌دهی، به‌سبب این‌که لایه‌های الیاف در داخل زمینه قرار دارند و زمینه هم مدول الاستیک کوچکتری نسبت به الیاف دارد کرنش طولی در زمینه بیشتر از الیاف است. این اختلاف بین کرنش‌های طولی زمینه و الیاف باعث تولید تنش برشی در وجه مشترک الیاف با زمینه می‌شود.

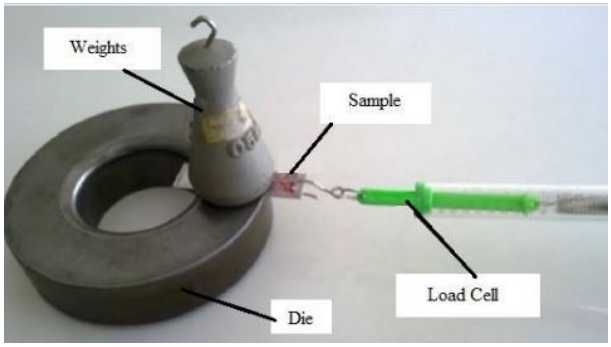

Fig. 5 Friction test apparatus

شکل 5 لوازم مربوط به نحوه اندازه‌گیری اصطکاک

[1] PLY Slipping

بنابراین در دمای بالا به دلیل نرم‌شدن زمینه، الیاف در هر لایه می‌توانند در کنار هم و در درون زمینه جابجایی داشته باشند که این جابجایی‌ها هم در جهت طولی الیاف و هم در جهت عرضی الیاف رخ می‌دهد (برش داخل لایه طولی یا عرضی[2]).

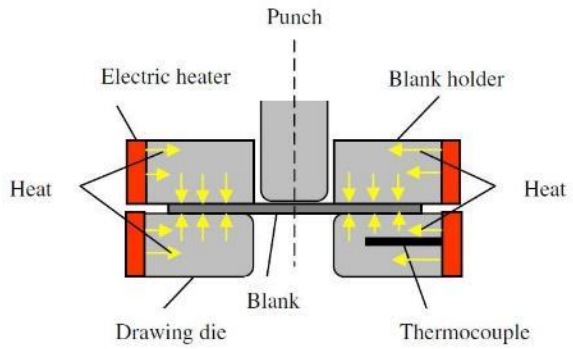

Fig. 6 Schematic representation of the equipment for the deep drawing process

شکل 6 شماتیک تجهیزات مربوط به آزمایش فرآیند کشش عمیق

[2] Longitudinal (or Transverse) intra-PLY shearing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

در فرآیند کشش عمیق، ورق در اثر نیروهای تغییر شکل دهنده در معرض تنش فشاری محیطی و تنش کششی شعاعی قرار دارد که تنش فشاری محیطی می‌تواند باعث بروز چروکیدگی شود. زمانی که تفاوت بین قطر خارجی قطعه خام و قطعه نهایی آن زیاد باشد و هم‌چنین در مواردی که ضخامت صفحه کم باشد، احتمال وقوع پدیده چروکیدگی بالا می‌رود. معیار مناسب برای مقایسه میزان چروکیدگی نمونه‌های تولید شده، با اندازه‌گیری ارتفاع چروک‌ها و پیدا کردن میانگین آن‌ها و سپس ضرب تعداد چروک‌ها در میانگین ارتفاع آن‌ها برای هر نمونه به‌دست می‌آید. پارامتر خروجی دیگر در طراحی آزمایشات نیروی بیشینه سنبه است که هنگام انجام آزمایش فرآیند کشش عمیق توسط دستگاه اندازه‌گیری شده است و به‌عنوان نمونه نمودار تغییرات نیروی بیشینه سنبه براساس تغییرات جابه‌جایی سنبه برای آزمایش‌های شماره 1 تا 4 در "شکل 8" آورده شده‌اند. قطعات نهایی تولید شده نیز در "شکل 9" آورده شده‌اند.

پس از انجام هر آزمایش و تحلیل واریانس در نرم‌افزار مینی‌تب[1] براساس روش انووا[2] میزان تغییرات نیروی سنبه و چروکیدگی برحسب متغیرهای فرآیند به‌دست آمدند که در "شکل‌های 10 و 12" نشان داده شدند.

5-1- اثر نیروی نگهدارنده ورق

همان‌طور که از نتایج آزمایش "شکل 9" مشخص است با افزایش نیروی نگهدارنده ورق، میزان نیروی بیشینه سنبه یا همان نیروی بیشینه شکل‌دهی افزایش یافته است. با افزایش نیروی ورق‌گیر حرکت ورق به داخل سنبه محدودتر می‌شود زیرا که تنش‌های فشاری اعمالی توسط ورق‌گیر به نمونه کامپوزیتی افزایش یافته و سیلان ورق را محدود می‌کند و از این‌رو برای رسیدن به عمق مورد نظر به نیروی سنبه بزرگتری نیاز است. لازم به ذکر است در نیروهای ورق‌گیر بالا (16.5 kN) به دلیل ازدیاد تنش‌های فشاری در محل تماس نمونه با ورق‌گیر و ماتریس (قالب) در ناحیه لبه نمونه، لهیدگی سطحی رخ می‌دهد. این لهیدگی با افزودن بر ضریب اصطکاک، نیروی مقاوم در برابر حرکت ورق را با شدت بیشتری افزایش می‌دهد. نمودار حداکثر نیروی شکل‌دهی برحسب تغییرات نیروی نگهدارنده ورق تا نیروی ورق‌گیر معادل 13 kN شیب ملایمی دارد ولی با افزایش نیروی نگهدارنده ورق تا میزان 16.5 kN شیب منحنی به یک‌باره افزایش یافته است. افزایش نیروی

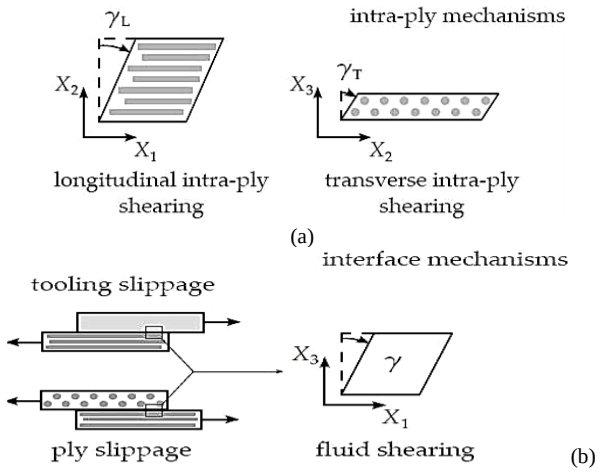

Fig. 7 (a) and (b) schematic of local forming mechanisms a laminate [18]

شکل 7 شماتیک مکانیزم‌های شکل‌دهی برای یک ورق کامپوزیتی [18]

ورق‌گیر باعث ایجاد تنش‌های فشاری بالا در جهت ضخامت و در ناحیه لبه نمونه می‌شود. این تنش‌های فشاری همراه با تنش‌های کششی در جهت شعاعی ناشی از حرکت سنبه، تنش فشاری محیطی در ناحیه لبه ورق را که باعث ایجاد و رشد چروکیدگی می‌شود تقلیل می‌دهد. بنابراین با افزایش نیروی نگهدارنده ورق میزان چروکیدگی لبه ورق کاهش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد (شکل 11). چند نمونه قطعه تولید شده با میزان چروکیدگی متفاوت در "شکل 12" نشان داده شده است.

5-2- اثر دما

با افزایش دما، حداکثر نیروی شکل‌دهی به‌صورت کاملاً محسوسی مطابق "شکل 10" کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، پی‌وی‌سی یک ماده بی‌شکل بوده که خواص آن در دماهای مختلف تغییر می‌کند. در آزمایش‌های طراحی شده در دمای بالا، پس از این‌که ورق بر روی قالب قرار می‌گیرد و مجموعه تا دمای موردنظر گرم می‌شود، ماده پی‌وی‌سی به صورت خمیری شکل در می‌آید. بنابراین افزایش دما باعث کاهش استحکام کششی پی‌وی‌سی و در نتیجه کاهش استحکام کششی ورق شده و لذا نمونه راحت‌تر به درون قالب جریان پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی شکل‌دهی موردنیاز کمتر می‌شود. به بیان دیگر در دمای بالا به‌دلیل این‌که فاز زمینه یا همان پی‌وی‌سی نرم‌تر می‌شود، مکانیزم لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و هم‌چنین مکانیزم ایجاد کرنش‌های برشی پلاستیک درون هر لایه (کرنش‌های زاویه‌ای میان الیاف) راحت‌تر انجام پذیرفته، لذا نیروی موردنیاز برای تغییر شکل با افزایش دما کاهش پیدا کرده است. برخلاف اثر دما در کاهش نیروی حداکثر شکل‌دهی، با افزایش دما از 20 درجه سانتی‌گراد تا 120 درجه سانتی‌گراد میزان چروکیدگی افزایش پیدا کرده است (شکل 11). این پدیده را می‌توان ناشی از اثر نرم‌شدگی ماده پی‌وی‌سی فاز زمینه ورق کامپوزیتی دانست. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد حالت خمیری و سیلان پی‌وی‌سی ناشی از افزایش دما سبب کاهش مقاومت لبه در تنش‌های فشاری موجود در آن ناحیه شده و از آن‌جا که سازوکار چروکیدگی در لبه ناشی از کرنش‌های

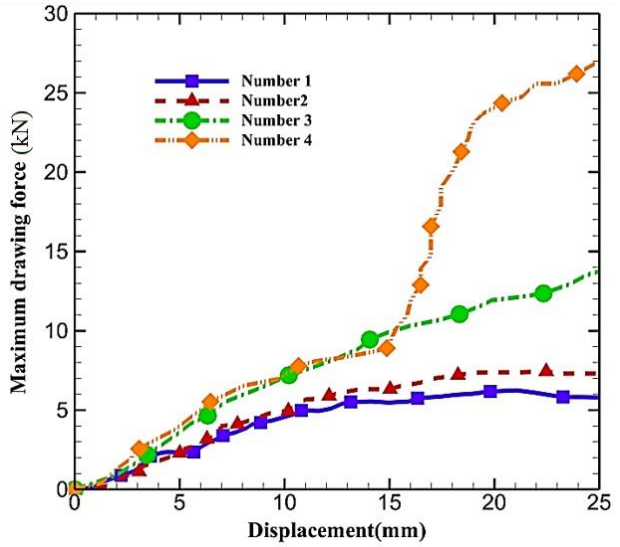

Fig. 8 Punch force – displacement curves for the PVC/fiber glass composite laminates based runs Nos. 1 to 4

شکل 8 منحنی تغییرات نیرو برحسب جابه‌جایی سنبه برای ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی مربوط به آزمایش‌های 1 تا 4

[1] Minitab
[2] Anova

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

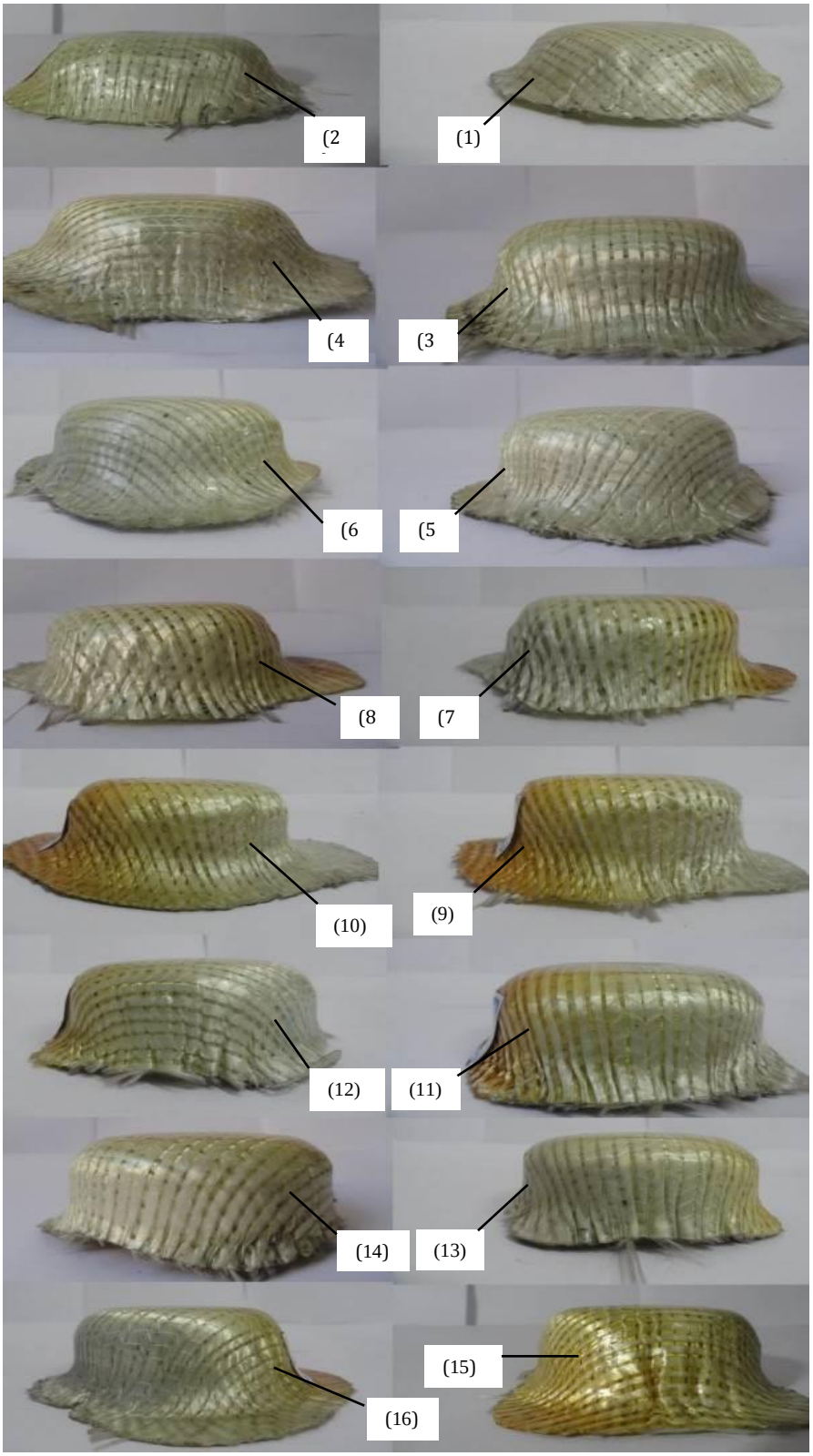

Fig. 9 Final geometry of PVC/fiber glass composite laminates after deep drawing process based on DOE (Table 5)

شکل 9 شکل نهایی قطعات کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی تحت فرآیند کشش عمیق بر اساس طراحی آزمایش انجام شده (جدول 5)

فشاری است، از این رو چروکیدگی افزایش می‌یابد.

5-3- اثر ضخامت نمونه

از نتایج خروجی "شکل 10"، افزایش حداکثر نیروی شکل‌دهی مورد نیاز در اثر افزایش میزان ضخامت نمونه مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد ورق‌های کامپوزیتی استفاده شده در نوع لایه‌چینی $[30/-30]_4$ و $[0/90]_4$ دارای ضخامت تقریبی 2 میلی‌متر، در حالی که نمونه ورق‌های $[30/-30]_2$ و $[0/90]_2$ دارای ضخامت تقریبی 1 میلی‌متر می‌باشند. در تحلیل تنش ورق‌ها

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

با توجه به وضعیت تنش‌های کششی در جهت شعاعی و تنش‌های فشاری محیطی اعمالی به ورق در ناحیه نگهدارنده ورق و در عبور ماده از این ناحیه به داخل قالب منجر به خمش ورق و ایجاد تنش خمشی می‌گردد. با افزایش لایه‌های کامپوزیتی و به تبع آن افزایش ضخامت ورق، لایه‌های بیرونی از محور خنثی بیشتر فاصله می‌گیرند. این عامل باعث افزایش تنش خمشی می‌شود. از طرفی در مرحله تغییر شکل‌های پلاستیک، تا تنش‌ها به تنش سیلان یا تنش جریان نرسند تغییر شکل پلاستیکی صورت نخواهد گرفت. لذا برای عبور ماده به داخل قالب (رساندن ماده به تنش‌های سیلان)، سنبه به نیروی بیشتری نیاز دارد. همان‌گونه که قبلاً بیان شد در فرآیند کشش عمیق ورق‌های گرد تنش محیطی فشاری عامل به وجود آورنده چروکیدگی می‌باشد. به ازای یک تنش محیطی ثابت در یک نمونه با ضخامت کمتر به دلیل مقاومت کمتر ماده در مقابل تنش، چروکیدگی بیشتری ایجاد شود. نتایج حاصل از آزمایش در نمودار "شکل 11" درستی این مطلب را می‌رساند.

4-5- اثر قطر نمونه اولیه

در اثر افزایش قطر قطعه خام از 110 میلی‌متر به 120 میلی‌متر میزان حداکثر نیروی شکل‌دهی افزایش یافته است. بدیهی است که با افزایش قطر نمونه و سطح ماده در یک ضخامت یکسان، حجم نمونه افزایش یافته است و

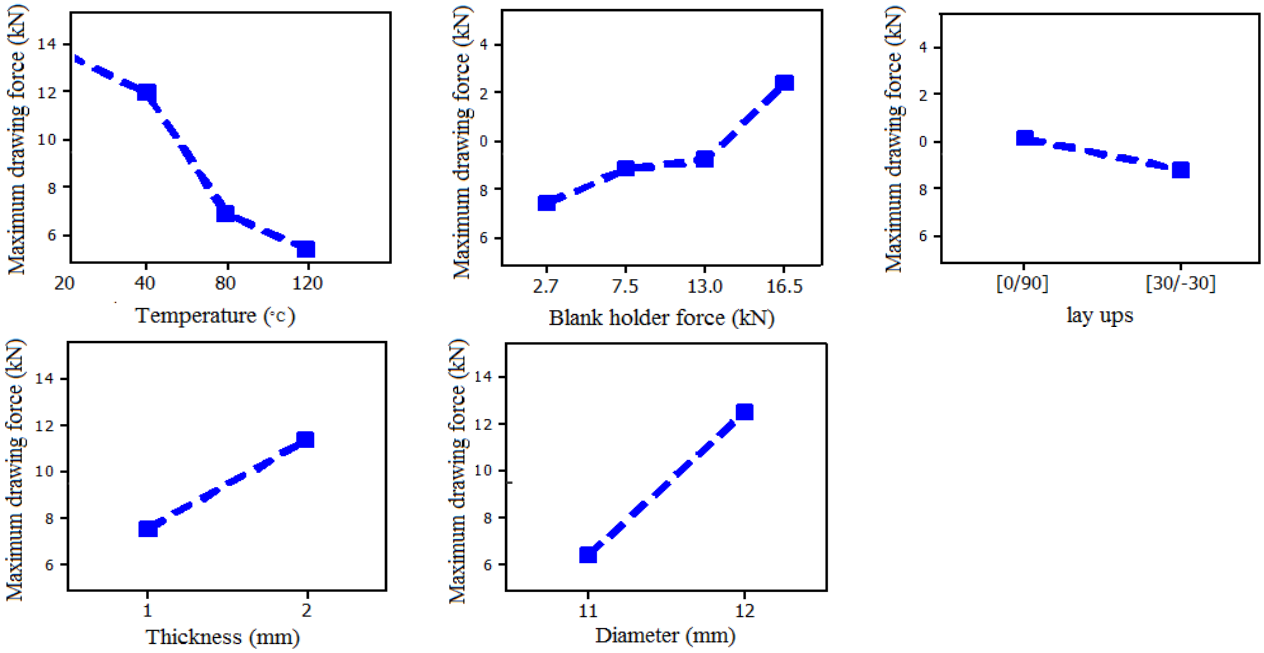

Fig. 10 Main effects plot for maximum drawing force (Analysis of variance ANOVA)

شکل 10 تغییرات ماکزیمم نیروی پانچ براساس متغیرهای فرآیند (براساس تحلیل آنالیز واریانس انووا)

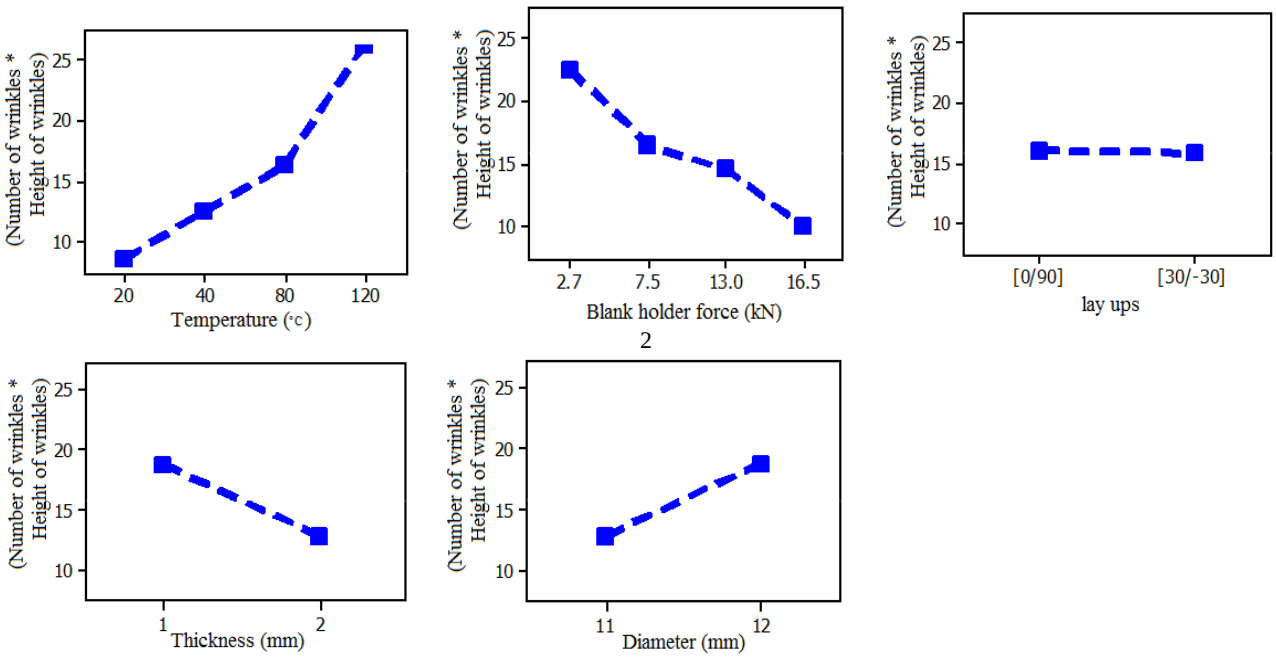

Fig. 11 Main effects plot for severity of wrinkling (Analysis of variance ANOVA)

شکل 11 نمودار میزان چروکیدگی برحسب متغیرهای فرآیند (براساس تحلیل آنالیز واریانس انووا)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

Fig. 12 Result of experimental tests for wrinkling of PVC/fiber glass composite laminates

شکل 12 نتایج آزمایش بررسی چروکیدگی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی

این افزایش مقدار ماده باعث می‌شود در هنگام شکل‌دهی به منظور ایجاد انرژی لازم برای لغزش الیاف شیشه و پی‌وی‌سی در یکدیگر و تغییر شکل‌های پلاستیک نیروهای بیشتری لازم باشد. بنابراین این نیروی لازم که توسط سنبه به ورق اعمال می‌شود در اثر افزایش قطر قطعه خام، زیادتر شده است (شکل 10). بدیهی است که با توجه به تئوری کلاسیک اصطکاک لغزشی، وابستگی ضریب اصطکاک به بزرگی سطح ناشی از افزایش قطر در مراحلی که منجر به اصطکاک چسبندگی نشده است، قابل اغماض است. بنابراین تغییر قطر ورق اولیه نمی‌تواند عامل تأثیرگذار بر روی تغییر ضریب اصطکاک باشد. نیروی عمودی ورق اولیه با پیچ‌های تعبیه شده بر روی نگهدارنده ورق و با کمک ورنیه موجود در کنار فنرها، در ابتدای فرایند به‌طور صحیح تنظیم می‌شود. از آن‌جا که نیروی اصطکاک از حاصل‌ضرب نیروی عمودی وارد شده بر ورق در ضریب اصطکاک محاسبه می‌شود، با ثابت بودن این دو عامل در اثر تغییر قطر ورق اولیه، نیروی اصطکاک نیز ثابت خواهد ماند. بنابراین افزایش نیروی شکل‌دهی در اثر افزایش قطر ورق به تغییر نیروی اصطکاک وابستگی نخواهد داشت. در حین شکل‌دهی هرچه در راستای شعاع به محیط ورق نزدیک می‌شویم میزان تنش‌های فشاری محیطی افزایش یافته و از میزان تنش‌های کششی شعاعی کاسته می‌شود. بنابراین در دو نمونه با قطرهای اولیه متفاوت، قطر نمونه‌ای که بیشتر بوده (120 میلی‌متر) به دلیل فاصله بیشتر از مرکز ورق در هنگام شکل‌دهی تنش‌های فشاری محیطی بیشتری به آن وارد شده و در نتیجه دچار چروکیدگی بیشتری شده است. نتایج حاصل از آزمایش "شکل 11" این موضوع را به درستی نشان می‌دهد.

5-5- اثر نوع لایه چینی ورق

تأثیر نوع لایه‌چینی ورق بر میزان بیشینه نیروی شکل‌دهی در "شکل 10" نشان داده شده است. حداکثر نیروی سنبه به ترتیب در ورق با لایه‌چینی‌های $[0/90]_2$ و $[0/90]_4$ از ورق با لایه‌چینی‌های $[30/-30]_2$ و $[30/-30]_4$ بیشتر می‌باشد. در تحلیل این موضوع می‌توان گفت که در نوع لایه‌چینی $[0/90]_4$ نسبت به لایه‌چینی $[30/-30]_4$ به‌دلیل استحکام تسلیم بالاتر ورق برای شکل‌دهی به نیروی سنبه بیشتری احتیاج است (به‌طور مشابه برای لایه چینی‌های $[0/90]_2$ و $[30/-30]_2$ این موضوع صادق است). سازوکار اصلی تغییر شکل در لایه‌چینی $[0/90]_2$ و $[0/90]_4$ کرنش‌های برشی درون هر لایه است. در حالی که سازوکار تغییر شکل در لایه‌چینی $[30/-30]_2$ و $[30/-30]_4$ علاوه بر کرنش‌های برشی، لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر است [17]. لازم به ذکر است که نوع لایه‌چینی ورق بر میزان چروکیدگی اثر محسوسی نداشته است. این موضوع در "شکل 10" نشان داده شده است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اولین بار شکل‌دهی کشش عمیق ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی با لایه‌چینی‌های $[0/90]_2$، $[0/90]_4$، $[30/-30]_2$ و $[0/90]_4$ به روش انباشت لایه‌ها تولید شدند. سپس به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شد. در این روش تعداد آزمایش‌ها به 16 آزمایش کاهش پیدا کرد. پس از آن ورق‌های تولید شده طبق طراحی آزمایش انجام شده، تحت فرآیند کشش عمیق شکل‌دهی شد. با تحلیل نتایج و نمودارهای خروجی حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی نتایج زیر بدست آمد.

- در شکل‌دهی کشش عمیق ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینه پی‌وی‌سی هرچه نیروی نگهدارنده ورق افزایش می‌یابد میزان حداکثر نیروی سنبه (نیروی شکل‌دهی) افزایش یافته و میزان چروکیدگی کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش دما، حداکثر نیروی شکل‌دهی به صورت کاملاً محسوسی کاهش پیدا می‌کند. درحالی‌که افزایش دما باعث افزایش میزان چروکیدگی لبه ورق می‌شود.
- با افزایش ضخامت نمونه اولیه، حداکثر نیروی شکل‌دهی افزایش پیدا کرده و از میزان چروکیدگی کاسته شده است.
- با افزایش قطر نمونه اولیه از 110 میلی‌متر به 120 میلی‌متر، حداکثر نیروی شکل‌دهی افزایش پیدا کرده و همچنین قطعه تولید شده دارای چروکیدگی بیشتری است.
- میزان حداکثر نیروی سنبه به ترتیب در ورق با لایه‌چینی‌های $[0/90]_2$ و $[0/90]_4$ از لایه‌چینی‌های $[30/-30]_2$ و $[30/-30]_4$ بیشتر بوده است. در ضمن تغییر نوع لایه‌چینی بر میزان چروکیدگی تأثیر محسوسی ندارد.

7- مراجع

[1] S. Hoseini, A. Pol, Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforces with nanoclay particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, 2014. (In Persianفارسی)

[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. 10, No. 5, pp. 279- 287, 2013.

[3] H. 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 cvclic 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, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 152-170, 2015.

[7] Q. Zhang, Q. Gao, J. Cai, Experimental and simulation research on thermal

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]

[13] L. Mosse, P. Copston, W. Cantwell, Stamp forming of polypropylene based fiber- metal laminate: the effect of process variables on formability, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 12, No. 7, pp. 163-168, 2006.
[14] M. Hou, K. Friedrich, Adjustable forming of thermoplastic composites for orthopedic application, *Journal of Material Science: Material in Medicine*, Vol. 9, No. 1, pp. 83-88, 1998.
[15] B. Zhu, T. Yu, H. Zhang, Experimental investigation of formability of woven textile composite preform in stamping operation, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, pp. 969-972, 2008.
[16] Y. Oftadeh, An *Investigation of Pvc/Fiberglass Composite*, Msc thesis, university of modares, Iran, DOI, 368062, pp. 35-39, April,2015.
[17] V. Zal, H. Moslemi, A. Bahramian, J. Sinke, Investigation of the effect of temperature and layup on the press forming of polyvinyl choloride-baced composite laminates, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No.1, pp. 106-112, 2016.
[18] S. Haanappel, Forming of Ud Fibre Reinforced Thermoplastics, *Phd thesis, University of Twente*, Enschede, *the Netherlands, DOI, 10.3990/1.9789036535014*, pp. 74-85, April, 2013.
stamping of carbon fiber composite sheet, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 2, pp. 217-223, 2014.
[8] Q. Zhang, J. Cai, Simulation and experimental study on thermal deep drawing of carbon fiber woven composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 7, No. 14, pp. 802-810, 2014.
[9] O. A. Sokolva, M. Kuhn, H. Palkowsk, Deep drawing properties of lightweight steel/polymwe/steel sandwich composites, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 10, pp. 105-112, 2012.
[10] X. Peng, Z. Rehman, Textile composite double dome stamping simulation using a non-orthogonal constitutive model, *Composite Science and Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 1075-1081, 2011.
[11] B. Zhu, T. Yu, H. Zhang, Experimental investigation of formability of commingled woven composite preform in stamping operation, *Composite: Part B*, Vol. 14, No. 5, pp. 289-295, 2011.
[12] M. H. Parsa, S. Ahkami, M. Ettehad, Experimental and finite element study on the springback of double curved aluminum/polypropylene/sandwich sheet, *Materials and Design*, Vol. 24, No. 12, pp. 4174-4183, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.32.0]