

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 645-648 DOI: 10.22060/mej.2021.18252.6784

Feasibility study of single point incremental forming of aircraft canopy for polycarbonate sheet

A. Barimani-Varandi^{1,*}, M. Kazemi Nasrabadi², B. Abedi Ravan³

1 Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2 Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran 3 Faculty of Basic Sciences, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran

ABSTRACT: The canopy as a clear cockpit protector is one of the strategic polymer parts in the aviation industry. Conventional forming processes aren't cost-effective for individual production of transparent polymer canopies due to high energy consumption and high costs of machinery, equipment, and tools. In this paper, rapid prototyping of geometry similar to integral canopies is investigated using an incremental forming process of transparent polycarbonate sheets on a laboratory scale. Polycarbonate sheets with suitable mechanical, thermal, chemical, and optical properties are used in the manufacturing of the latest integral canopies. In single point incremental forming experiments, effect of tool rotational velocity on apparent transparency and effect of toolpath strategy on geometric accuracy were investigated. Three toolpath strategies including raster, spiral from outside, and spiral from inside were applied. Post-forming heating at about 55°C for 30 min resulted in a 50% reduction in spring back by releasing process-induced residual stresses. The use of a non-rotating tool as well as a mechanical-chemical surface polishing improved the final finishing and transparency of samples. Additionally, the amount of deviation for the raster strategy in both depth and radial directions was less than 1 mm, which was within the allowable range of process window of single point incremental forming.

Review History:

Received: Apr. 11, 2020 Revised: Nov. 15, 2020 Accepted: Dec. 24,2020 Available Online: Jan. 02, 2021

Keywords:

Rapid prototyping Aircraft canopy Single point incremental forming Polycarbonate sheet Toolpath strategy

1- Introduction

The canopy is one of the strategic polymer parts in the aviation industry used in various aircrafts as a transparent enclosure of the cockpit. The kind of canopy is the main measure to compare the advanced level of the fighters. Integral canopies as the newest technology used in fourth-generation fighters e.g. F-16 and F-22 are developed via an integrated injection molding of the polycarbonate by the USA army [1-3].

Polycarbonate sheets with fantastic properties improved the challenges of increased temperatures and collisions with birds for velocities below Mach of 2.5 [1]. It is noteworthy that conventional methods are not cost-effective in the smallbatch production of polymer products [4, 5]. Incremental forming process patented in 1967 by Leszak Edward [6] in which, a hemispherical tool through a predefined toolpath formed the final geometry with the induced local plastic deformations.

For incremental forming processes, high flexibility in fabricating complex geometries, short time to fabricate the final product due to no need to design and make special tools, use of simple equipment, and high economic efficiency in mass production have been reported. In the present study, the Single Point Incremental Forming (SPIF) of geometry similar to the aircraft canopy was investigated with polycarbonate sheets to assess the feasibility of the rapid prototyping of integral canopies. To this end, the effect of toolpath strategy and tool rotational velocity on geometric accuracy and apparent transparency were studied, respectively. Besides, the post-forming heating was utilized to solve the spring back problem.

2- Methodology

In all experiments, Lexan American polycarbonate commercial sheets [7] with a thickness of 2.25 mm were used to perform the SPIF experiments. The sheets' dimensions were 170 mm \times 170 mm with nylon covers on both sides of the sheets which relatively protected the formed surface from process-induced scratches.

A dedicated fixture mounted on a CNC milling machine equipped with a Siemens 802 controller was used to perform all the SPIF experiments as shown in Fig. 1. The constant input parameters according to the Table 1 were extracted based on the literature review on polymer sheets [8, 9]. Condaform 3442 E was used as a lubricant during the forming process. The side window geometry of a training aircraft was used with a surface scale of 1:7 due to the SPIF practical limitations. The scaled model surfaced in a cavity form is similar to a fourth-generation integral canopy used in the fourth-generation fighters.

*Corresponding author's email: barimani.abozar@email.kntu.ac.ir







Fig. 1. Performing the SPIF process on a CNC milling machine.

Fig. 2. Average surface roughness for various strategies





Fig. 4. Comparison of the effect of toolpath strategy on geometric accuracy for the critical curve

Three toolpath strategies involving raster $(R_{\rm st})$, spiral from outside (S_{out}) , and spiral from inside (S_{in}) were applied to evaluate the geometric accuracy. After forming, a new proposed mechanical-chemical surface polishing was utilized to enhance the apparent transparency. In addition, heating at about 55 °C for 30 min was applied subsequent to the forming to release the residual stresses.

Mahr MarSurf PS 10 was used to measure the roughness average (Ra). The clarity of the orthogonal lines through the samples was inspected with the naked eye to evaluate the transparency of the samples [10]. The amount of geometric deviation of a critical curve passing through the deepest points of the product model on the inner surface of the samples was compared to the corresponding curve in the 3D model for the three applied toolpath strategies. The torsion of the flat surface of the formed products taken out of the fixture was a criterion to measure the spring back. In which, the height of the two vertices of corresponding diameters on the same side was compared.

3- Results and Discussion

3.1 Effect of rotational velocity

Roughness average was compared with and without the rotating tool to investigate the influence of rotational velocity of the tool. Increased friction by tool rotation may lead to material sticking, distortion, and local oxidation. As presented in Fig. 2, the surface roughness increased by 62% compared with using the rotating tool, with a small effect of strategy type on the final finishing.

Furthermore, as shown in Fig. 3, orthogonal lines were much clearer through the samples formed with a non-rotating tool. Higher generated friction at the rotational velocity of 1000 rpm significantly affected the final finishing as well as the apparent transparency. Besides, the proposed mechanical-chemical polishing method subsequent to the SPIF experiments could highly improve the surface quality.

3.2 Effect of toolpath strategy

The variations for the critical curve belonged to the samples formed in various strategies are plotted in Fig. 4. For the critical curves in S_{out} and S_{in} strategies, the radial material flow led to a large deviation with the accumulation of the material in the central part of the sample and side corners, respectively. However, the swept material flow from one side to the other side in R_{st} , the strategy did not cause vortex flow either accumulation of the material. Accordingly, the occurred deviation was below 1 mm in both deep and radial directions for the raster strategy. For this strategy, the tolerance ±1 mm is within the allowable range of the SPIF process window as reported [11, 12].



Fig. 5. Comparison of the spring back for the formed samples with raster strategy without rotating tool

3.3 Effect of post-forming heating

It is generally necessary to find a solution to defeat the spring back problem, particularly for the polymer sheets. The small amount of elastic modulus relative to the metals, low yield stress, small sheet thickness, and large induced strains causes to increase in the spring back severity for polymer sheets. To this aim, samples formed by raster strategy with a non-rotating tool were heated subsequent to the SPIF for 30 min at about 55 °C to release the residual stresses. The results are depicted in Fig. 5.

As shown in Fig. 5, post-heating treatment reduced the spring back by almost 50%. Note that optimizing the amount of temperature and holding time for post-heating treatment will result in a much more reduction in spring back.

4- Conclusions

The results showed that the non-rotating tool led to a 62% improvement in surface quality compared with the rotating tool. Besides, the employment of the proposed mechanicalchemical surface polishing dramatically improved the apparent transparency. However, for the raster strategy, less geometric deviation was created for the critical curve in both depth and radial directions below 1 mm, which was within the allowable range of the SPIF process window. In addition, releasing the process-induced residual stresses by applying the post-forming heating for 30 min at 55 °C reduced the amount of the spring back by approximately 50%.

References

- [1] X. Wang, S. Wei, B. Xu, Y. Chen, X. Yan, H. Xia, Transparent organic materials of aircraft cockpit canopies: research status and development trends, Materials Research Innovations, 19(sup10) (2015) S10-199-S110-206.
- [2] B. Sweetman, f-22 raptor, Zenith Imprint, 1998.
- [3] B.S. Haisty, Lockheed Martin's Affordable Stealth, in: National Press Club, 2000.
- [4] A. Barimani-Varandi, The non-isothermal hot deep drawing of AA5083 aluminum alloy, Mechanics & Industry, 21(1) (2020) 112.
- [5] A. Barimani-Varandi, A.J. Aghchai, Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, Mechanics & Industry, 21(5) (2020) 529.
- [6] L. Edward, Apparatus and process for incremental dieless forming, in, Google Patents, 1967.
- [7] https://www.par-group.co.uk/.
- [8] P.D. Valle, F.L. Amorim, D.D. Da Costa, P.V. Marcondes, Experimental investigations on the incremental sheet forming of commercial steel ASTM A653 CS-A G90 to predict maximum bending effort, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40(6) (2018) 322.
- [9] I. Bagudanch Frigolé, M.L. Garcia-Romeu, M. Sabater i Armengou, Incremental forming of polymers: Process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost, © Journal of Cleaner Production, 2015, vol. 112, núm. 1, p. 1013-1024, (2015).
- [10] M.D. Bruyn Neto, R.d.C.M. Sales, K. Iha, J.A.F.F. Rocco, Reinforced Transparencies for Aerospace Application–Case Description, Journal of Aerospace Technology and Management, 8(1) (2016) 49-54.
- [11] V. Franzen, L. Kwiatkowski, P. Martins, A. Tekkaya, Single point incremental forming of PVC, Journal of materials processing technology, 209(1) (2009) 462-469.
- [12] J. Allwood, G. King, J. Duflou, A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219(2) (2005) 239-244.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Barimani-Varandi, M. Kazemi Nasrabadi, B. Abedi Ravan, Feasibility study of single point incremental forming of aircraft canopy for polycarbonate sheet, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 645--648.

DOI: 10.22060/mej.2021.18252.6784



This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۷۵۱ تا ۲۷۶۸ DOI: 10.22060/mej.2021.18252.6784



امکانسنجی شکلدهی تدریجی تکنقطه ای کانوپی هواپیما از ورق پلیکربنات: تاثیر استراتژی مسیر و دوران ابزار بر دقت هندسی و شفافیت ظاهری

ابوذر بریمانی ورندی'*، محمد کاظمی نصرآبادی'، بهرام عابدی روان"

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،

۲- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴ ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

کلمات کلیدی: نمونهسازی سریع کانوپی هواپیما شکلدهی تدریجی تکنقطهای ورق پلیکربنات استراتژی مسیر ابزار خلاصه: کانوپی به عنوان محافظ شفاف کابین خلبان، یکی از قطعات پلی مری راهبردی در صنایع هوایی است. فرآیندهای شکل دهی سنتی در تولید تکی کانوپی های پلی مریِ شفاف، به علت مصرف بالای انرژی و هزینه های زیاد ماشین آلات، تجهیزات و ابزار مقرون به صرفه نیستند. ورق های پلی کربنات با ویژ گی های مناسب مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و اپتیکی در ساخت جدیدترین کانوپی های یکپارچه مورد استفاده قرار می گیرند. در این مقاله نمونه سازی سریع هندسه ای مشابه کانوپی های یکپارچه هواپیما، به کمک فرآیند شکل دهی تدریجیِ ورق های شفاف پلی کربنات در مقیاس آزمایشگاهی بررسی می شود. در آزمایش های شکل دهی تدریجی تک نقطه ای، تاثیر سرعت دورانی ابزار بر شفافیت ظاهری و تاثیر استراتژی مسیر ابزار بر دقت هندسی بررسی شد. سه استراتژی مسیر ابزار شامل استراتژی شطرنجی، مارپیچ از ادسازی تنش های پسماندِ فرآیندی سبب کاهش ۵۰ ٪ در برگشت فنری شد. استفاده از ابزار غیر دوار و همچنین پولیش سطحیِ مکانیکی – شیمیایی سبب بهبود قابل ملاحظه ای در پرداخت نهایی و شفافیت نمونه ها گردید. همچنین انحراف هندسی برای استراتژی شطرنجی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از Mm ۱ ایجاد شده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی

۱– مقدمه

پوشش شفاف کابین هواپیماهای جنگی، آموزشی و یا تفریحی که خلبان را از عوامل جوی محافظت کرده کانوپی^۱ نام دارد. کانوپیها که امروزه از پلیمرهای شفاف ساخته میشوند به عنوان یکی از قطعات کلیدی هواپیما نقش مهمی در تنش کل وارد بر سازه و همچنین تحمل بارهای ناشی از اثرات آیرودینامیکی و اختلاف فشار بین فضای داخلی و خارجی کابین را ایفا میکنند. یکی از معیارهای سنجشِ میزان پیشرفتهبودن یک جنگنده نوع کانوپی مورد استفاده در آن است. در جنگندههای نسل چهارم نظیر اف-۲۲ و اف-۳۵، جهت افزایش توانایی دید خلبان، کانوپی به صورت یک قطعه یکپارچه و 1 Canopy

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: barimani.abozar@email.kntu.ac.ir

یکپارچه به کمک فناوری قالب گیری تزریقی یکپارچه^۲ تولید می شوند. این فناوری هم اکنون تنها در اختیار ایالت متحده آمریکا بوده و به علت اهمیت بالای نظامی و استراتژیکی، جزئیات آن کاملا محرمانه ماندهاست [۱–۳].

بدون وجود هیچ ستون و قاب عرضی ساخته می شود. کانوپی های

ورقهای پلیکربنات دارای ویژگیهای منحصربهفردی همچون شفافیت و مقاومت بالا در ضربه و همچنین استحکام عالی در برابر گرما و سرما هستند [۴, ۵]. استفاده از این ماده در ساخت کانوپی هواپیماها توانسته مشکلات موجود در دماهای بالا و برخورد با پرندگان برای سرعتهای تا ۲٫۵ ماخ را حل کند [۳]. مقاوت ضربهی

² Integrated injection moulding

کی با موافق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) No By No

ورقهای پلی کربنات ۲۵۰ برابر شیشه با ضخامت یکسان است [۶]. کانوپی ازجمله قطعاتی است که به دلیل قرار گرفتن در شرایط سخت جوی و عملیاتی و همچنین نیاز به خصوصیات اپتیکی ویژه در معرض استهلاک زیادی قرار می گیرد. بهره گیری از فرآیندهای شکل دهی سنتی پلی مرها همچون قالب گیری دمشی، فشاری، تزریقی، انتقالی و شکل دهی حرارتی و درخلا، به علت مصرف بالای انرژی و هزینههای زیاد ماشین آلات، تجهیزات و ابزار، در تیراژ کم مقرون به صرفه نیستند.

امروزه بهره گیری از روش های نمونه سازی سریع در حال گسترش مى باشد. ضرورت أن نيز جهت اطمينان از انطباق دقيق قطعات براى تولید یک محصول جدید و دریافت بازخورد آن در کوتاهترین زمان ممکن و همچنین افزایش بهرهوری اقتصادی در تولید غیر انبوه است. این انتظارات اغلب با بکارگیری روشهای سنتی امکانپذیر نیست [۲-۱۱]. یکی از روشهای نمونهسازی سریع که در ساخت محصولات ورقى مورد استفاده قرار مى گيرد، فرآيند شكل دهى تدريجى است. فرآیندهای شکلدهی تدریجی نوین از ایدهی فنی لژاک ادوارد [۱۲] که در سال ۱۹۶۷ میلادی ثبت شد، نشات گرفتهاست. این فرآیند به عنوان یکی از فناوریهای شکلدهی انعطافپذیر^۲ به ابزار و تجهیزات پیچیدهای نیاز ندارد [۱۳]. فرآیند شکل دهی تدریجی توانسته در نمونهسازی سریع هندسههای فلزی پیچیده، پتانسیل بالایی را از جنبه بهرموری اقتصادی در دهههای اخیر نشان دهد [۱۴, 1۵]. وحدتی و همکاران [۱۶] به کمک ارتعاشهای آلتراسونیک در فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای^۳ نیروهای شکلدهی، برگشت فنری و زبری سطحی را کاهش دادند. درحالیکه بهرهگیری از فرآیند شکلدهی تدریجی برای ورقهای پلی مری برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط فرانزن و همکاران [۱۷] گزارش شد. آنها جهت نمونهسازی سریع از روش شکلدهی تدریجی تکنقطهای استفاده کردند. در این روش نمونههای پلی مری توسط ابزار کنترلشده با ماشین فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری^۳، به صورت تدریجی شکلدهی شدند. مارتینز و همکاران [۱۸] حد شکلدهی را برای پنج نوع ورق پليمرى از جمله ورق پلىكربنات استخراج كردند. آنها وجود سه حالت شکست شامل ترک محیطی، چروکیدگی[†] و

ترک عرضی را گزارش کردند. مارکز و همکاران [۱۹] امکانسنجی ساخت محصولات ورقی پلی کربنات را توسط فرآیند شکل دهی تدریجی تکنقطهای صحه گذاری کردند. باگودانچ و همکاران [۲۰] محصولی از ورق پلی کربنات با هندسهای ساده را توسط فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای بررسی و پارامترهای فرآیندی را از نقطه نظر مصرف انرژی الکتریکی و هزینهها بهینهسازی کردند. ادواردز و همکاران [۲۱] پارامترهای فرآیندی بهینه جهت کاهش برگشت فنری ورقهای پلی کربنات را در فرآیند شکل دهی تدریجی تکنقطهای گزارش کردند. تاثیر شرایط تماسی و استراتژی مسیر ابزار بر کیفیت قطعات شکل گرفته از ورقهای پلی کربنات، توسط دورانت و همکاران [۲۲] در فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای بررسی و پارامترهای بهینه گزارش شد. فورمیسانو و همکاران [۲۳] شکل پذیری نمونههای پلی کربناتی شکل دهی شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی تکنقطهای را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که دیواره نمونههای هرمی شکل مستعد چروکیدگی ناشی از پیچش است. دورانت و همکاران [۲۴] در پژوهش دیگر تاثیر قطر ابزار، ضخامت و هندسه نهایی را برای فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای ورقهای یلی کربنات به کمک تحلیل اجزای محدود مطالعه کردند. چشمیوشی از ناهمسانگردی ورق سبب عدم پیشبینی پیچش⁶ و چروکیدگی در نتایج عددی شد. قابل ذکر است که اغلب پژوهشهای اشاره شده فرآیند شکلدهی تدریجی نمونههای پلیمری با هندسههای ساده (اغلب هرمی) و متقارن را بررسی کردند. در حالیکه سنتنو و همکاران [1] در سال ۲۰۱۷ مطالعهای مروری پیرامون روشهای نوین برای ساخت كاشتنىهاى پلىمرى توسط فرآيند شكلدهى تدريجي ارائه كردند. آنها ساخت موفقیت آمیز بخشی از پروتز جمجمه را توسط فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای بر روی ورقهای پلی کربنات گزارش کردند.

اغلب فرآیندهای تولیدیِ سنتی در تولید تکیِ کانوپیهای پلیمری مقرون به صرفه نیستند. برای فرآیندهای شکل دهی تدریجی انعطاف پذیری بالایی در ساخت هندسه های پیچیده، زمان کم جهت ساخت محصول نهایی با توجه به عدم نیاز به طراحی و ساخت ابزار خاص، استفاده از تجهیزات ساده و بهرهوری بالای اقتصادی در تولید غیر انبوه گزارش شدهاست. در این مقاله نمونه سازی سریع هندسهای

Rapid prototyping
 Elevible forming

Flexible forming
 Computer numerical control (CNC)

⁴ Wrinkling

⁵ Twisting

ازدیاد طول شکست (٪)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول الاستيک (GPa)	دمای انتقال شیشه ⁽ (°C)	چگالی (kg/m ³)	ساختار	فرآيند توليد
17.	۶.	۲٫۳	140	۲,۲	آمورف	اكستروژن

جدول ۱. خواص مكانيكي و فيزيكي ورق پلي كربنات [۲۵]
 Table 1. Mechanical and physical properties of the polycarbonate sheet [24]

¹ Glass transition temperature



شکل ۱. نمودار تنش- کرنش مهندسی ورق پلی کربنات [۲۵] Fig. 1. Engineering stress-strain diagram of polycarbonate sheet [24]

نامتقارن و مشابه کانوپی هواپیما، به کمک شکل دهی تدریجی تکنقطهای ورقهای پلیکربنات در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتهاست. با توجه به اهمیت بالای شفافیت کانویی در وضوح دید خلبان راهکارهایی شامل استفاده از روغن روانکار مختص

عملیات کشش، اعمال گام عمودی کوچک در مقایسه با تحقیقات پیشین، کاهش زبری با حذف سرعت دورانی و روشی جدید جهت پولیش سطحی مکانیکی- شیمیایی اعمال شد. هدف اصلی پژوهش امكانسنجى شكلدهى تدريجى كانوپىهاى شفاف يكپارچه نسل چهارم با ماهیت نمونهسازی سریع است. بدین منظور اثر متغیرهای سرعت دورانی ابزار و استراتژی مسیر ابزار به ترتیب بر خروجیهای شفافیت ظاهری و دقت هندسی نمونهها به کمک آزمایشهای شکلدهی تدریجی تکنقطه ای بررسی شد. همچنین تاثیر حرارت یسا شکل دهی نیز بر برگشت فنری مورد مطالعه قرار گرفت. ۲- روش تحقيق

۲–۱– مواد استفادهشده

برای انجام تمامی آزمایشهای شکلدهی تدریجی تکنقطهای از ورقهای تجاری پلی کربنات آمریکایی برند لکسان ابا ضخامت معادل ۲٫۲۵ mm و ابعاد ۲٫۲۵ mm ۱۷۰ × ۱۷۰ استفاده شد. خواص گزارش شده در جدول ۱ و همچنین نمودار تنش- کرنش در شکل ۱ بر اساس اطلاعات تأمين كننده ورق ارائه شدهاست. در هر دو سمت ورق روکشی ناپلونی قرار دارد. وجود این روکش علاوه بر تسهیل عملیات روانکاری، سطح محصول شکل دهی شده را تا حدود زیادی از ایجاد خط و خش محافظت می کند.

۲-۲- مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشهای تجربی از فیکسچری طبق مدل شکل ۲ استفاده شدهاست.

با توجه به اجزای معرفی شده، ورق بین ورقگیر و صفحه پشتیبان



شکل ۲. مدل سهبعدی فیکسچر طراحی شده شکلدهی تدریجی تکنقطهای Fig. 2. 3D Model of the designed SPIF fixture

به کمک ۴ عدد پیچ و مهره اِم ۸ گیرهبندی شد. ورق پیش از شروع آزمایش، توسط دو عدد پین در دو سمت فیکسچر موقعیتدهی شد. وجود این دو عدد پین برای موقعیتدهی محصول بر روی فیکسچر حین بستن مجدد، بسیار مهم میباشد. ابزار از جنس فولاد سردکار اِس پی کا^۱ (دین ۲۰۸۰ (۱) و سایر اجزای فیکسچر از فولاد اِس تی ۵۲ ^۲ (دین ۱٬۰۵۵۳) ساخته شدند. آزمایشها طبق شکل ۳ بر روی ماشین فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری چهار محور ماشینسازی تبریز، مدل اِف پی ۴ اِم ای^۴ با کنترلر زیمنس ۸۰۲ انجام شد.

ابزار سرنیمکروی (انتها ثابت^۵) به قطر mm ۱۰ با توجه به کد مسیر ایجاد شده در نرمافزار پاورمیل³، به تدریج هندسه نهایی را شکل داد. آزمایشها در دو حالت با و بدون سرعت دورانی انجام شد. جهت بررسی تاثیر سرعت دورانی بر کیفیت نهایی محصول، سرعت معادل rpm ۲۰۰۰ لحاظ شد. همچنین نرخ پیشروی معادل , mm معادل ۲۰۰۰ min گردید. مقادیر پیشروی بیشتر سبب لرزش میز فرز می گردید. گام حرکتی ابزار نیز در راستای عرضی و عمقی با توجه به اهمیت شفافیت ظاهری نهایی، mm ۲٫۵ تنظیم شد. این مقدار کوچکترین گام اعمالی گزارششده در شکلدهی تدریجی ورقهای پلیمری است. این تنظیم به دلیل اهمیت بالای پرداخت نهایی

- 1 SPK
- 2 DIN
- St52
- FP4ME
 Fixed end
- 6 Powermill



شکل ۳. انجام فرآیند شکلدهی تدریجی بر روی ماشین فرز Fig. 3. Performing the SPIF process on a CNC milling machine

کانوییهای شفاف درنظر گرفته شد. از روغن گرید کندافرم ۳۴۴۲

ای^۷ نیز به عنوان روانکار استفاده شد. این گرید مختص عملیات شکلدهی و کشش است [۲۶]. پارامترهای فرآیندی مذکور با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش بر روی ورقهای پلیمری، در نظر گرفته شد [۲۴, ۲۷]. مقدار پارامترهای ثابت در جدول ۲ ارائه شدهاست. برای امکانسنجی قابلیت فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای در ساخت کانوپی هواپیما، با توجه به محدودیت منابع از هندسه

⁷ Condaform 3442 E



جدول ۲. پارامترهای ثابت ورودی Table 2. Constant input parameters

نرخ پیشروی

۲۰۰۰ mm/min

گام حرکتی ابزار

۰٬۲۵ mm

سرعت دورانی

۱۰۰۰ rpm

قطر ابزار

۱۰ mm

شکل ۴. (الف) نمای بالای پنجره با مقیاس ۱ به ۷، (ب) مدل توسعه یافته جهت انجام فر آیند شکلدهی تدریجی و (ج) نماهای مختلف Fig. 4. a) Top view of the window with a scale of 1:7, (b) a model developed to perform SPIF process, and (c) various views

همچنین کنترل مناسب جریان مواد جهت ایجاد هندسه نامتقارن، از سه استراتژی شطرنجی^۱ و مارپیچ از بیرون^۲ و داخل^۳ طبق شکل ۵ استفاده شدهاست. این استراتژیها در نرمافزار پاورمیل^۴ ایجاد شده سپس جهت اجرا به کنترلر ماشین فرز انتقال داده شدهاست. زمان شکلدهی تدریجی نمونهها در هر یک از این سه استراتژی کمتر از min بود.

نمونه پلی کربنات پس از شکل دهی تدریجی دارای ناهمواری های سطحی ناشی از تماس ابزار با ورق است. این ناهمواری ها بر شفافیت ظاهری محصول تاثیر گذار هستند. پولیش سطحی قطعات پلی کربنات پنجره کناری یک هواپیمای آموزشی موجود در ناوگان هوایی جمهوری اسلامی ایران استفاده شد. با توجه به محدودیت در ابعاد میز ماشین فرز و همچنین ابعاد فیکسچر، از مقیاس سطحی ۱ به ۷ استفاده شدهاست. مدل محصول که توسط اسکن سهبعدی ایجادشده در شکل ۴ به صورت توسعهیافته نشان داده شدهاست.

طبق شکل ۴ مدل مقیاس دهی شده به کمک سطح سازی در نرمافزار کتیا بصورت محفظهای در آمده تا بتوان توسط فر آیند شکل دهی تدریجی گیرهبندی و شکل دهی شود. محفظهای شدن مدل سبب ایجاد هندسهای مشابه کانوپی های یکپارچه نسل چهارم شده که در حال حاضر در پیشرفته ترین جنگنده های ایالات متحده ی آمریکا به کار می روند [۳].

جهت بررسی تاثیر مسیر حرکت ابزار بر کیفیت هندسه نهایی و

¹ Raster (Rst.)

² Spiral from outside (S_{out})

³ Spiral from inside $(S_{in})^{n}$

⁴ PowerMill



شكل ۵. استراتژی مسير ابزار (الف) شطرنجی، (ب) مارپيچ از بيرون و (ج) مارپيچ از داخل Fig. 5. a) Toolpath strategies: (a) Rst., (b) S_{out} , and (c) S_{in}



شکل ۶. تجهیزات جهت حرارتدهی پسافر آیندی Fig. 6. Equipment for post-forming heating

بخار حاصل با سطوح نمونههای شکل دادهشده تماس پیدا کرد. به محض تماس این گاز با محصول ویژگیهای سطحی تغییر کرده و شفافیت افزایش مییابد [۲۸].

پس از انجام فرآیند شکل دهی تدریجی از حرارت دهی به منظور آزادسازی تنشهای پسماند فرآیندی و همچنین بررسی تاثیر آن بر برگشت فنری استفاده شد [۲۱]. بدین منظور نمونههای خارج شده از فیکسچر، مجدد بین دو صفحه گیره بندی شده و سپس طبق شکل ۶ به مدت min در کورهای با دمای حدود C° ۵۵ قرار گرفتند. یک نمایشگر دمای درون کوره را به کمک ترموکوپل نشان می دهد. پس اتمام زمان حرارت دهی کوره خاموش و نمونه در کوره خنک شد. قابل ذکر است که دمای ذکر شده با توجه به نتایج موفقیت پس از تولید تزریقی یا فرآیند ترموفرمینگ (شکلدهی حرارتی) در مراجع گوناگون گزارش شدهاست [۳, ۲۸]. در پژوهش حاضر جهت برطرف کردن ناهموارهای سطحیِ محصول شکلدهیشده و همچنین بهبود شفافیت، از روش پولیش ترکیبیِ مکانیکی – شیمیایی استفاده شدهاست. روش مکانیکی شامل سنبادهزنی بوده و روش شیمیایی شدهاست. روش مکانیکی شامل سنبادهزنی بوده و روش شیمیایی بغش انتهایی عملیات پرداخت است. در روش مکانیکی به ترتیب از کاغذهای سنباده گریت پی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ (استاندارد ایزو بهعنوان روان کننده از آب استفاده شد. جهت انجام پولیش شیمیایی، حلال شیمیایی دیکلرومتان درون ظرفی حرارت داده شده، سپس

1 Grit



شکل ۷. نواحی مختلف اصطکاکی مبتنی بر عملکرد ابزار در حین شکلدهی Fig. 7. Various friction zones in terms of the tool performance during forming

آمیز ادوارد و همکاران اعمال شد [۲۱]. البته آنها از دمنده هوای گرم استفاده کردند. در حالیکه استفاده از کوره شرایط دمایی پیوسته و یکنواختی را برای حرارتدهی نمونه ایجاد کرده و قابلیت کنترل بهتری را نیز دارد.

۲-۳- ارزیابی پسا فرآیندی

جهت بررسی اثر سرعت دورانی بر زبری نهایی در حالت با و بدون دورانِ ابزار، زبری سطحی در راستای عمود بر مسیر ابزار توسط دستگاه زبریسنج متحرک برند ماهر مارسرف پی اِس ۱۰ ^۱ اندازه گیری شد. با توجه به شرایط اصطکاکی متفاوت در فرآیند، پارامتر زبری میانگین^۲ در سه ناحیه پرشیب،کمشیب و کف محصول مطابق شکل ۷ اندازه گیری شد. پارامتر زبری میانگین رایجترین سنجه برای کنترل کیفی و پرداخت نهایی معرفی شده که به عنوان معیاری کلی در زبریسنجی لحاظ میشود. این پارامتر میانگین حسابی برای مقادیر مطلق ارتفاعهای پروفیلِ زبری است [۱۶].

تعریف این نواحی به دلیل عملکرد متفاوت ابزار سرکروی درحین شکلدهی تدریجی است. در نواحی کمشیب و کف مشاهده گردید که به علت اصطکاک پایین و حرارت کم، ابزار روی ورق سر میخورد. اما در ناحیه پرشیب لغزش ابزار بر روی ورق سبب بالارفتن اصطکاک شد. جهت مقایسه شفافیت نمونهها از روش بازرسی چشمی نتو و همکاران جهت نمونهها به کمک چشم غیرمسلح بطور نسبی مقایسه میشوند.

جهت بررسی دقت هندسیِ محصول نهایی فاکتورهای بازیابی با گذشت زمان، توزیع ضخامت، پیچش، انحراف هندسی نمونه شکلدهی شده و برگشت فنری مهم هستند [۳۰]. سه مورد آخر که طبق نتایجِ حاصل در این پژوهش بحرانی مشاهدهشده، ارزیابی میشوند. چشمپوشی از مورد اول به این دلیل است که اطلاعات زیادی راجع به بازیابی با گذشت زمانِ ورقهای پلیمری شکلدهیِ تدریجی شده گزارش نشده و نیازمند بررسی و مطالعه جداگانه است. عدم لحاظ توزیع ضخامت نیز با توجه به عمق نه چندان زیاد محصول و عدم مشاهده نازکشدگی بحرانی در آزمایشها، قابل توجیه است. پیش از شکلدهی بر روی ورقها دو خط متعامد عبوری از مرکز

¹ Mahr MarSurf PS 10

² Roughness average (Ra)



شکل ۸. منحنی بحرانی در مدل اصلی جهت بررسی انحراف هندسی Fig. 8. Critical curve in the main model to assess the geometric deviation



شکل ۹. نمایش عمق نقاط بر روی منحنی بحرانی یک نمونه گیرهبندی شده Fig. 9. Presentation of depth of points on the critical curve of a clamped sample

برای بررسی برگشت فنری، از نمونههای خارجشده از فیکسچر استفاده شدهاست. تغییر شکل سطح تخت نمونهها معیاری جهت مقایسه کمی برگشت فنری لحاظ شد. با توجه به مهار و گیرهبندی محصول اصلی بر روی هواپیما، اهمیت کاهش برگشت فنری در کاهش تنشهای پسماند خواهد بود. برگشت فنری شدید سبب باقیماندن تنشهای پسماند برای پنجره اصلی نصبشده بر روی هواپیما میشود. لذا این قطعات پس از نصب تحت تنش قرار میگیرند. وجود این تنشها علیرغم احتمال افزایش استحکام ذاتی، پنجره را مستعد به ایجاد اعوجاج و تغییر شکل ناشی از شوکهای حرارتی (حاصل از تغییرات دمایی)، اختلاف فشار درون کابین و نیروی آیرودینامیکی پسا^۱ میکند. از مزایای بررسی جداگانه دو پارامتر انحراف هندسی و برگشت فنری در حالتهای به ترتیب، گیرهبندی شده و محصول هندسی ورق رسم شد. میزان دوران این خطوط پس از شکلدهی نسبت به حالت پیش از شکلدهی، به عنوان معیاری جهت ارزیابی زاویه پیچش لحاظ شد. جهت اندازه گیری انحراف هندسی، از نمونههای گیرهبندی شده بر روی فیکسچر استفاده شد. دلیل این امر این است که محصول اصلی نصب شده بر روی هواپیما نیز از محیط بیرونی نمود مهار و به نوعی توسط قاب پنجره گیرهبندی می شود. میزان انحراف هندسی منحنی معین روی سطح درونی نمونهها، نسبت به منحنی متناظر در مدل سهبعدی در استراتژی های مسیرهای مختلف بحرانی عبوری از عمیق ترین نقاط مدل محصول است که در شکل ۸ نشان داده شدهاست. جهت اندازه گیری انحراف منحنی بحرانی، عمق نقاط منحنی بحرانی طبق شکل ۹، با نموهای افقی ۲ mm توسط عمق سنج اندازه گیری شد. جدول ۳. نتایج اندازه گیری زبری سطحی

Table 3. Measured results of the surface roughness										
ناحيه پرشيب		ناحيه كمشيب		ناحيه كف		استراتژی				
۱۰۰۰ rpm	بدون دوران	۱۰۰۰ rpm	بدون دوران	۱۰۰۰ rpm	بدون دوران					
٣,١٨۴	١,٢٨٦	۲,۴۱۵	٠/٧٩ ١	۱,Δ۱۸	•/862	شطرنجى				
۳٫۶۰۱	1,417	۲/۳۱۵	•/A•)	1,410	•/&V)	مارپيچ از بيرون				
٣,• ٩٩	۱,۳۱۵	۲,۷۵۱	•/٧٢٣	۱,۸۵۲	•,87•	مارپیچ از داخل				





خارجشده از فیکسچر این است که هر خروجی به تنهایی بررسی شده و متاثر از دیگری نمیباشند. این رویه تا به حال گزارش نشده و با توجه به محصول محوربودن تحقیق، کمک شایانی به یافتن پارامترهای بهینه جهت شکل دهی دقیق ترین هندسه خواهد کرد.

شایان ذکر است که روشهای اصولی تر جهت ارزیابی دقت هندسی استفاده از ماشین اندازه گیری مختصات^۱، بهره گیری از فیکسچرهای کنترلی و یا اسکن سهبعدی نمونه شکل داده شده و مقایسه مدل آن با مدل اصلی است. این روشها اغلب در صنعت استفاده می شوند و تا حدودی هزینهبر هستند. با توجه به اینکه هدف اصلی در این پژوهش

1 Coordinate measuring machine (CMM)

مقایسه نسبی نمونهها با یکدیگر بوده، لذا روشهای بیانشده که در اغلب مقالات نیز گزارش شده [۱۴, ۲۲, ۳۱]، مناسب میباشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر سرعت دورانی ابزار بر شفافیت ظاهری محصول

با توجه به تاثیر محسوس شرایط تماسی ابزار با ورق [۲۱, ۳۲]، اثر سرعت دورانی بر زبری و شفافیت ظاهری بررسی شدهاست. بدین منظور در حالت با و بدون دورانِ ابزار زبری سطحی مقایسه شد. زبری برای هر ناحیه در جدول ۳ و میانگین زبری برای هر نمونه در شکل ۱۰ نشان داده شدهاست. قابل اشاره است که مقادیر زبری



شکل ۱۱. مقایسه شفافیت محصول شکلدهی شده با استراتژی شطرنجی در حالت (الف) بدون دوران ابزار و (ب) سرعت دورانی ۲۰۰۳ Fig. 11. Comparison of the transparency of the sample formed with the raster strategy. (a) without rotating tool and (b) rotational velocity 1000 rpm

دوار شدهاست. دوران ابزار سبب اصطکاک سایشی و ایجاد حرارت شده و در نتیجهی اغتشاش مواد، اعوجاج و اکسایش موضعی حادث می گردد. از تبعات آن کاهش شفافیت و کیفیت سطحی محصول نهایی بوده که در شکل ۱۱ نمایش داده شدهاست.

طبق شکل ۱۱، در حالت بدون دوران خطوط شطرنجی با وضوح بیشتری با چشم غیرمسلح قابل رویت است. در سرعت دورانی معادل rpm ۱۰۰۰، اصطکاک تماسی ناشی از دوران ابزار سبب افزایش اصطکاک شده طوری که شفافیت را به شدت تحت تاثیر قرار دادهاست. این کاهش شفافیت در تطابق با نتایج شکل ۱۰ است. قابل ذکر است که در حالت بدون دوران نیز اگرچه شفافیت ظاهری نسبت به حالت ابزار دوار بهبود یافته، اما همچنان در شرایط ایدهآلی قرار نداشته و نیازمند تحقیقات بیشتری است. بدین منظور از پولیش مکانیکی – شیمیایی جهت بهبود کیفیت سطحی و شفافیت، پس از شکلدهی نهایی استفاده شدهاست (شکل ۱۲).

اساس این روش قراردادن سطح زبر پلاستیک در برابر جریان داغی از یک بخار محلول است. عملیات پیش سنبادهزنی لازمهی آمادهسازی سطحی جهت تاثیرپذیری عملیات شیمیایی است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شدهاست، شفافیت ظاهری نمونه بهبود یافته بطوریکه خطوط متعامد پشت نمونه، با وضوح بیشتری گزارششده، میانگین اندازهگیریشده از سه نمونه است.

بر اساس نتایج جدول ۳، در تمامی موارد سطح زبرتری برای دیواره پرشیب ایجاد شدهاست. در کف و سطح کمشیب، تفاوت زبری قابل توجه نبوده و دلایل آن تماس نسبتا عمود ابزار با این سطوح است. با آغاز حرکت تدریجی ابزار، در زمان یکسان عمق کمتری در سطح كم شيب نسبت به ناحيه پرشيب طي مي شود. لذا براي قسمت کمشیب نیروهای بازدارنده کمترشده و ابزار به راحتی بر روی ورق سر میخورد. درحالیکه برای سطح پرشیب نیروهای بزرگتری در راستای عمقی وارد شده که لغزش ابزار را درپی خواهد داشت. درنتیجه اصطکاک بیشتری ایجاد شده و همراه با ایجاد حرارت خواهد بود. لذا زبری سطحی بیشتر در سطح پرشیب قابل پیش بینی می باشد. کاهش شرایط اصطکاکی برای ناحیه کف محصول نیز، زبری سطحی کمتری را نسبت به سایر سطوح درپی داشته است. طبق نتایج شکل ۱۰، با دوران ابزار زبری سطحی و درنتیجه کیفیت سطحی محصول برای هر سه استراتژی کاهش مییابد که در تطابق با نتایج پیشین است [۲۹, ۳۳, ۳۴]. همانطور که مشخص است نوع استراتژی مسیر تاثیر ناچیزی بر زبری سطح داشته و در هر سه استراتژی با حذف دوران، بهبود تقریبا یکسانی در میانگین زبری حاصل شدهاست. عدم دوران ابزار سبب بهبود ۶۲ ٪ پرداخت نهایی نسبت به حالت استفاده از ابزار



شکل ۱۲. انجام پولیش سطحیِ مکانیکی- شیمیایی بر روی نمونه شکل دهیشده با استراتژی شطرنجی بدون دوران ابزار Fig. 12. Performing the mechanical-chemical surface polishing on a sample formed with a raster strategy without rotating tool

با انحنای زیاد حادثشده میتواند به دلیل اعوجاجهای ایجادشده، نقصهای سطحی نمونه و یا ناشی از ویژگیهای خود ورق پلیمری باشد. با توجه به مطالعات انجامشده بهره گیری از ابزارهای غیرفلزی و همچنین استفاده از فیلم واسط بین ابزار و محصول میتواند اعوجاج و نقصهای سطحی را در قسمتهای غیرتخت و انحنادار بهبود دهد [۲۷, ۱۴].

۲-۳- بررسی اثر استراتژی مسیر ابزار بر دقت هندسی

همانطور که در مقدمه اشاره شد، پدیده پیچش در فرآیند شکلدهی تدریجی، هندسه و شکل نهایی را به شدت تحت تاثیر قرار میدهد. در این پدیده به دلیل نیروهای مماسی واردشده توسط ابزار، چرخش کنترل نشدهی قطعه کار حولِ تکیهگاه صفحه پشتیبان ایجاد شده و منجربه برش درون صفحهای^۴ در قطعهکار میشود. شدت این پدیده حتی تا مقدار [°]۲۴ هم گزارش شدهاست [۲۴]. جهت بررسی تاثیر استراتژی مسیر ابزار بر پدیده پیچش، سه نمونه طبق شکل ۱۳ شکلدهی شدند. قابل ذکر است که با توجه به نتایج قسمت قبل، برای قابل رویت است. بهره گیری از فرآیند پولیش سطحی در ساخت کانوپیهای شرکتهای اروپایی و آمریکایی نیز تاکید شده است [۸۸]. سنجش ویژگیهای اپتیکی کانوپیها در شرکتهای سازنده توسط آزمونهای بسیار دقیقی انجام می شود. در این آزمونها دو معیار عبورپذیری نور و انحراف نور طبق استاندارد ای اس تی اِم دی۳۰۰۱٬۰۱ از مهم ترین معیارهای اپتیکی ذکر شده اند. طبق این استاندارد به ترتیب از روش اسپکتروفوتومتر و هیزمتر ^۳جهت سنجش درصد عبورپذیری نور و درصد انحراف نور برای مواد پلاستیکی شفاف استاندارد به ترتیب از روش اسپکتروفوتومتر از می مواد پلاستیکی شفاف درصد عبورپذیری نور و درصد انحراف نور برای مواد پلاستیکی شفاف می در وضوح دید خلبان دارد. در کانوپی از جنس پلی کربنات با درصد می کند. ولی اگر بخشی از ۹۰ ٪، اغلب طیف نور به خوبی از کانوپی عبور می کند. ولی اگر بخشی از این طیف به خاطر اعوجاجهای درونی جسم از حالت مستقیم منحرف شود، آنگاه دیدن اجسام از میان این کانوپی علی رغم وجود شفافیت مقدور نخواهد بود. این نقص در نواحی

¹ ASTM D1003

² Spectrophotometer

³ Haze meter

⁴ In-plane shear



شكل ١٣. مقايسه اثر استراتژى مسير ابزار بر پارامتر پيچش (الف) شطرنجى، (ب) مارپيچ از بيرون و (ج) مارپيچ از داخل Fig. 13. Comparison of the effect of toolpath strategy on twisting parameter: (a) Rst., (b) S_{out}, and (c) S_{in}





تمامی آزمایشها از حالت بدون سرعت دورانی استفاده شد.

همانطور که نشان داده شده زاویه پیچش در هر سه استراتژی بسیار ناچیز بود. لذا پدیده چروکیدگی نیز در هیچ مورد مشاهده نشد. یکی از استراتژیهایی که جهت عدم پیچش محصول در فرآیندهای پیشین برای شکلدهی تدریجی تک و دونقطهای پیشنهاد شده، متناوب کردن^۱ مسیر ابزار است. در استراتژی متناوب کاهش کیفیت سطحی نمونه بهویژه در محل تغییر جهت ابزار گزارش شدهاست اسطحی نمونه بهویژه در محل تغییر جهت ابزار گزارش شدهاست بهبود کیفیت سطحی، عدم پیچش محصول را نیز درپی داشته است. البته پژوهشهای پیشین، پدیده پیچش را در شکلدهی تدریجی با استراتژی مارپیچ برای نمونههای عمیقِ نزدیک به حد شکلدهی گزارش کردند [۳۸, ۳۸]. لذا در صورت انتخاب محصولی عمیق تر

1 Alternating

همچون کانوپی جنگندههای اف-۱۶، اف-۲۲ و اف-۳۵، جلوگیری از پدیده پیچش همراه با چالش خواهد بود.

جهت ارزیابی دقت هندسی منحنی بحرانی، طبق شکل ۱۴ مقطع هر منحنی در محور مختصات رسم شدهاست. برای هر نمونه میانگین عمق نقاط متناظر برای ۳ تکرار در هر منحنی رسم شدهاست. جریان مواد برای استراتژی های مارپیچ نیز در شکل ۱۵ با منحنیهای قرمز نشان داده شدهاست.

در استراتژی مارپیچ بیرونی جریان مواد در جهت شعاعی و به سمت مرکز است. این جریان گردابی همانند یه موج به سمت مرکز حرکت کرده و سبب انباشت مواد در قسمت مرکزی نمونه میشود. طوری که انحراف بیشینهای به مقدار ۳٫۷۸ mm ایجاد شده و عمق کمتری نسبت به منحنی مرجع شکل گرفته است. برای مسیر ابزار با استراتژی مارپیچ داخلی جریان گردابی مواد به سمت بیرون و در



شكل 1۵. مقايسه اثر استراتژی مسير ابزار بر جريان مواد (الف) مارپيچ از بيرون و (ب) مارپيچ از داخل Fig. 15. Comparison of the effect of toolpath strategy on material flow: (a) S_{out} and (b) S_{in}

جهت افزایش قطر است. طوری که طبق منحنی شکل ۱۴ افزایش محیطی را در هر گام عمقی به همراه داشت. انحراف بیشینه در استراتژی مارپیچ داخلی به مقدار ۳٫۲۱ mm بوده که در راستای شعاعی حادث شد. همانطور که در پیشینه پژوهش ذکر گردید، اغلب مطالعات بر روی هندسههای ساده و متقارن انجام شد. در نتیجه مشکلات حاصل از ایجاد هندسههای نامتقارن به طور محسوس مشاهده و بررسی نشدهاست.

در استراتژی شطرنجی جریان مواد از یک سمت آغاز شده و به سمت دیگر جاروب میشود. در نتیجه عدم تقارن جریان سبب ایجاد جریان گردابی و انباشت مواد نمیشود. علی رغم ایجاد هندسهای نامتقارن و نسبتا پیچیده دقت هندسی مناسبی با اعمال استراتژی شطرنجی ایجاد شد. میزان انحراف برای استراتژی شطرنجی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از mm ۱ بود. لذا در این استراتژی تلرانس mm ۱± قابل دستیابی بوده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی شکل دهی تدریجی تکنقطهای که پیشتر ارائه شده قرار فرآیندی شکل دهی تدریجی تکنقطهای که پیشتر ارائه شده قرار محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی محدوده بالاترین مقدایر گزارش شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی بسته تری مورد نیاز است. البته نمونه سازی سریع پنجره مورد بررسی به علت وجود انحناهای بزرگ تر همراه با چالش های کمتری در شکل دهی تدریجی می باشد.

قابل ذکر است با توجه به عدم وجود قالب و پشتیبان در یک سمت نمونهها، وجود این انحرافها قابل انتظار میباشد. بهره گیری از

فرآیندهای بهبودیافته فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای، انجام فرآیند شکلدهی تدریجی دونقطهای، بکارگیری فرآیند شکلدهی تدریجی تکنقطهای در چند پاس و بهرهگیری از پشتیبان غیرصلب میتواند به دقت هندسی بیشتری بیانجاند. البته انجام فرآیند در چند پاس علاوه بر افزایش زمان فرآیندی میتواند سبب کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی شود [۲۰, ۴۰].

۳-۳- بررسی اثر حرارتدهی پسا شکلدهی بر برگشت فنری

پارامتر برگشت فنری در فرآیند شکلدهی تدریجی ورقهای پلیمری نقش بسیار کلیدی در دقت ابعادی و هندسی ایفا میکند. بدین دلیل که در فرآیند شکل دهی تدریجی تکنقطهای ورقهای پلىمرى نسبت به ورق هاى فلزى، بسيار مستعدتر جهت اعوجاج و تابيده شدن هستند. مدول الاستيک کوچک، تنش تسليم کم، ضخامت کم ورقها و کرنشهای بزرگ واردشده سبب حادشدن میزان برگشت فنرى ورقهاى پلىمرى مىشود. در نتيجه انديشيدن راهحلى جهت ارتقای این چالش ضروری است. با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش، حرارتدهی پسا فرآیندی راهحل اجرایی مناسبی می تواند باشد [۲۱]. برای بررسی پارامتر برگشت فنری از نمونههای شکلدهیشده توسط استراتژی شطرنجی و در حالت بدون دوران استفاده شد. زیرا این استراتژی شفافیت و دقت هندسی بالاتری را نسبت به دو استراتژی مارپیچ ایجاد کرد. با توجه به تخت بودن سمتی از نمونه که حین فرآیند گیرهبندی شد، از بیشترین اختلاف ارتفاع دو راس یک قطر در سمت تخت برای مقایسه پارامتر برگشت فنری طبق شکل ۱۶ استفاده شد.



شکل ۱۶. مقایسه مقدار برگشت فنری برای نمونههای شکلدهی شده توسط استراتژی شطرنجی و در حالت بدون دوران ابزار Fig. 16. Comparison of the spring back for the formed samples with raster strategy without rotating tool



شكل ١٧. مقايسه ارتفاع دو راس قطرى متناظر در حالت (الف) بدون حرارتدهى و (ب) حرارتدهى پسافر آيندى Fig. 17. Comparison of the height of the two vertices of corresponding diameters. (a) without heating and (b) applying post-forming heating

حرارتدهی جهت حفظ دقت ابعادی و هندسی است. زیرا با توجه به ضخامت کم نمونهها، انجام عملیات حرارتی همراه با افزایش اعوجاج و تابیدگی در محصول میباشد. در شکل ۱۷ اختلاف ارتفاع دو راس قطری متناظر مورد مقایسه قرار گرفته است.

بهینهسازی مقدار دما و زمان حرارتدهی پسا فرآیندی میتواند کاهش قابل ملاحظهای در میزان برگشت فنری به ارمغان آورد. قابل ذکر است که حرارتدهی در حین فرآیند نیز گزینه مناسبی میباشد که مطالعه آن در شکلدهی تدریجی پلیمرها گزارش نشده و نیازمند مطالعه و بررسی جداگانه میباشد. از مزایای آن میتوان به حذف عملیات ثانویه حرارتدهی و در نتیجه کاهش زمان فرآیندی، بهبود همانطور که نشان داده شده حرارتی دهی پسا فرآیندی مقدار برگشت فنری را تقریبا ۵۰ ٪ کاهش داده است. حرارت دهی به مدت زمان ۳۰ min در دمای حدود °C ۵۵ به نمونه اجازهی آزادسازی تنشهای پسماندی را می دهد که در حین شکل دهی تدریجی ایجاد شده است. این تنشهای پسماند به دلیل کوچک بودن مدول الاستیک نسبت به ورقهای فلزی بسیار بزرگتر خواهد بود. عمده ترین دلیل در بزرگ بودن مقدار برگشت فنری نسبت به ورقهای فلزی، مقدار مدول الاستیک ورقهای پلی کربنات است که تقریبا به ترتیب ۱۰۰ و ۳۵ برابر کوچکتر از مدول فولاد و آلومینیوم می باشد. یکی دیگر از موارد مهم در آزادسازی تنشهای پسماند اهمیت گیره بندی در حین

شکل پذیری و کاهش نیروهای فرآیندی اشاره کرد.

۴- نتیجهگیری

هدف از این پژوهش امکانسنجی نمونه سازی سریع کانوپی هواپیما به کمک روش شکل دهی تدریجی است. بدین منظور هندسه ای مشابه کانوپی یکپارچه در ابعاد آزمایشگاهی، توسط ورق های تجاری پلی کربنات شکل دهی شد. آزمایش ها در حالت با و بدون ابزار دوار و اعمال سه استراتژی مسیر ابزار انجام شد. همچنین از حرارت دهی پسا شکل دهی جهت آزادسازی تنش های پسماند فرآیندی و بررسی اثر آن بر پارامتر برگشت فنری استفاده شد. یافته های مهم این مقاله بصورت زیر خلاصه شده است:

۱- عدم دوران ابزار با ارتقای ۶۲ ٪ پرداخت نهایی سبب افزایش کیفیت سطحی نسبت به حالت استفاده از ابزار دوار شد. استفاده از پولیش سطحیِ مکانیکی- شیمیایی بر روی نمونههای شکل دهی شده با ابزار غیر دوار، شفافیت ظاهری نمونهها را بهبود داده بطوریکه خطوط متعامد پشت نمونه با وضوح بیشتری قابل رویت شد.

۲- نمونههای شکلدهی شده توسط هیچ یک از سه استراتژی شطرنجی، مارپیچ از بیرون و از داخل، تحت تاثیر محسوس پدیده پیچش قرار نگرفتند. درحالیکه در استراتژی شطرنجی، با کنترل مناسب جریان مواد انحراف هندسی کمتری برای منحنی بحرانی نسبت به سایر استراتژیها ایجاد شد. میزان انحراف برای این استراتژی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از mm ۱ بوده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی شکلدهی تدریجی تکنقطهای قرار دارد.

۳- در حرارتیدهی پسا فرآیندی به مدت min در دمای حدود ۵۵ ۲۵، با آزادسازی تنشهای پسماند ایجادشده در حین شکلدهی تدریجی، مقدار برگشت فنری تقریبا ۵۰ ٪ بهبود یافت.

۴- با توجه به انتخاب هندسهای نه چندان عمیق در مقایسه با هندسههای حدی، هیچ از سه حالت شکست رایج در شکلدهی تدریجی ورقهای پلیمری شامل ترک محیطی، چروکیدگی و ترک عرضی در نمونهها مشاهده نشدهاست.

۵- بهترین تنظیمات از نقطه نظر شفافیت ظاهری و دقت هندسی شامل اعمال ابزار غیر دوار، استفاده از پولیش مکانیکی-شیمیایی با لحاظ استراتژی شطرنجی و حرارتدهی پسا شکلدهی است.

۶- نتایج حاصل نوید بخش بکارگیری فرآیندهای شکلدهی تدریجی جهت نمونه سازی سریع کانوپی ها در آینده ای نزدیک است. البته این امر نیازمند بهره گیری از روش های نوین شکل دهی تدریجی بوده تا بتواند استاندارده ای لازم را برآورده کند. مواردی همچون درصد عبورپذیری و اعوجاج نور و همچنین حفظ تلرانس های ابعادی و هندسی نیازمند مطالعات بیشتری است.

مراجع

- B.S. Haisty, Lockheed Martin's Affordable Stealth, in: National Press Club, 2000.
- [2] B. Sweetman, f-22 raptor, Zenith Imprint, 1998.
- [3] X. Wang, S. Wei, B. Xu, Y. Chen, X. Yan, H. Xia, Transparent organic materials of aircraft cockpit canopies: research status and development trends, Materials Research Innovations, 19(sup10) (2015) S10-199-S110-206.
- [4] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K.Y. Benyounis, The effect of low power CO2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding, Modares Mechanical Engineering, 17(2) (2017) 93-100.
- [5] M.S.S.M. Meiabadi, A. Kazerooni, M. Moradi, M.J. Torkamany, Laser assisted joining of St12 to polycarbonate: Experimental study and numerical simulation, Optik, (2019) 164151.
- [6] M. Moradi, M.K. Moghadam, M. Shamsborhan, Z.M. Beiranvand, A. Rasouli, M. Vahdati, A. Bakhtiari, M. Bodaghi, Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets, Optik, (2020) 164932.
- [7] A. Barimani-Varandi, The non-isothermal hot deep drawing of AA5083 aluminum alloy, Mechanics & Industry, 21(1) (2020) 112.
- [8] A. Barimani-Varandi, A.J. Aghchai, Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, Mechanics & Industry, 21(5) (2020) 529.
- [9] A. Barimani-Varandi, S.J. Hosseinipour, Numerical and experimental study on the effect of forming speed in

Technology, 60(1-4) (2012) 75-86.

- [20] I. Bagudanch, M. Garcia-Romeu, M. Sabater, Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost, Journal of Cleaner Production, 112 (2016) 1013-1024.
- [21] W.L. Edwards, T.J. Grimm, I. Ragai, J.T. Roth, Optimum process parameters for springback reduction of single point incrementally formed polycarbonate, Procedia Manufacturing, 10 (2017) 329-338.
- [22] M. Durante, A. Formisano, F. Lambiase, Incremental forming of polycarbonate sheets, Journal of Materials Processing Technology, 253 (2018) 57-63.
- [23] A. Formisano, L. Boccarusso, L. Carrino, F. Lambiase, F.M.C. Minutolo, Single point incremental forming: Formability of PC sheets, in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2018, pp. 100006.
- [24] M. Durante, A. Formisano, F. Lambiase, Formability of polycarbonate sheets in single-point incremental forming, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(5-8) (2019) 2049-2062.
- [25] <u>https://www.par-group.co.uk/</u>.
- [26] https://www.condat-lubricants.com/.
- [27] Y. Li, X. Chen, Z. Liu, J. Sun, F. Li, J. Li, G. Zhao, A review on the recent development of incremental sheetforming process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(5-8) (2017) 2439-2462.
- [28] O. Cybulski, P. Garstecki, VAPOR POLISHING OF MICROMACHINED STRUCTURES, (2015).
- [29] B. Neto, M. De, R.d.C.M. Sales, K. Iha, J.A.F.F. Rocco, Reinforced Transparencies for Aerospace Application– Case Description, Journal of Aerospace Technology and Management, 8(1) (2016) 49-54.
- [30] V. Franzen, L. Kwiatkowski, J. Neves, P. Martins, A. Tekkaya, On the capability of single point incremental forming for manufacturing polymer sheet parts, in: Int. Conf. Technol. Plast, 2008, pp. 890-895.
- [31] V. Franzen, L. Kwiatkowski, P. Martins, A. Tekkaya, Single point incremental forming of PVC, Journal of materials processing technology, 209(1) (2009) 462-469.
- [32] J. Duflou, H. Vanhove, J. Verbert, J. Gu, I. Vasilakos, P.

gradient warm deep drawing process, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 8(2) (2018) 51-66 (in Persain).

- [10] A. Barimani-Varandi, S. Jamal Hosseinipour, Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing, Modares Mechanical Engineering, 14(10) (2015) 187-194 (in Persain).
- [11] A. Barimani-Varandi, A. Jalali Aghchai, Electroplastic Friction Stir Spot Welding for Joining of AA6061-T6 Aluminum to Galvanized DP590 Steel, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2020) (in Persain).
- [12] L. Edward, Apparatus and process for incremental dieless forming, in, Google Patents, 1967.
- [13] D.H. Nimbalkar, V. Nandedkar, Review of incremental forming of sheet metal components, Int J Eng Res Appl, 3(5) (2013) 39-51.
- [14] A.K. Behera, R.A. de Sousa, G. Ingarao, V. Oleksik, Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015, Journal of Manufacturing Processes, 27 (2017) 37-62.
- [15] M. Vahdati, R. Mahdavinejad, S. Amini, M. Moradi, Statistical analysis and optimization of factors affecting the surface roughness in UVaSPIF process using response surface methodology, Journal of Advanced Materials and Processing, 3(1) (2015) 15-28.
- [16] M. Vahdati, R. Mahdavinejad, S. Amini, Investigation of the ultrasonic vibration effect in incremental sheet metal forming process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(6) (2017) 971-982.
- [17] V. Franzen, L. Kwiatkowski, J. Neves, P. Martins, A. Tekkaya, On the capability of single point incremental forming for manufacturing polymer sheet parts, in: ICTP2008, 9th International Conference on Theory of Plasticity, 2008.
- [18] P. Martins, L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. Tekkaya, M. Kleiner, Single point incremental forming of polymers, CIRP annals, 58(1) (2009) 229-232.
- [19] T.A. Marques, M.B. Silva, P. Martins, On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts, The International Journal of Advanced Manufacturing

Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215(7) (2001) 959-966.

- [37] M. Ham, J. Jeswiet, Forming limit curves in single point incremental forming, CIRP annals, 56(1) (2007) 277-280.
- [38] S. Jadhav, Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine, Shaker, 2004.
- [39] J. Allwood, G. King, J. Duflou, A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219(2) (2005) 239-244.
- [40] J. Li, T. Bai, Z. Zhou, Numerical simulation and experimental investigation of incremental sheet forming with an elastic support, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74(9-12) (2014) 1649-1654.

Eyckens, Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming, CIRP annals, 59(1) (2010) 307-310.

- [33] I. Bagudanch, O. Martínez-Romero, A. Elías-Zúñiga, M.L. Garcia-Romeu, Identifying polymeric constitutive equations for incremental sheet forming modelling, Procedia Engineering, 81 (2014) 2292-2297.
- [34] A. Formisano, M. Durante, L. Boccarusso, A. Astarita, The influence of thermal oxidation and tool-sheet contact conditions on the formability and the surface quality of incrementally formed grade 1 titanium thin sheets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93(9-12) (2017) 3723-3732.
- [35] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, CIRP annals, 54(2) (2005) 88-114.
- [36] S. Matsubara, A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal, Proceedings of the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم A. Barimani-Varandi, M. Kazemi Nasrabadi, B. Abedi Ravan, Feasibility study of single point incremental forming of aircraft canopy for polycarbonate sheet, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2751-2768.

DOI: 10.22060/mej.2021.18252.6784



بی موجعه محمد ا