



# بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات استوانه‌ای به وسیله فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی

ابوذر بریمانی ورندی<sup>1</sup>، سید جمال حسینی پور<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

\* صندوق پستی 484، j.hosseini@nit.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 20 آذر 1392  
پذیرش: 02 بهمن 1392  
ارائه در سایت: 06 مهر 1393  
کلید واژگان:  
کشش عمیق گرم گرادایانی  
آلیاژ آلومینیوم  
نسبت کشش حدی

## چکیده

آلیاژهای آلومینیوم، به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به چگالی بالا، به عنوان جایگزینی برای ورق‌های فولادی در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند. به منظور افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم در فرآیند کشش عمیق و با توجه به مشکلات شکل‌پذیری این آلیاژها در دمای اتاق، استفاده از فرآیندهای شکل‌دهی گرم ضروری است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، فرآیند کشش عمیق گرم در حالت گرادایانی نتایج مطلوب‌تری را نسبت به حالت هم‌دما دارد. لذا، در این مقاله، پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات استوانه‌ای از ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 با ضخامت 2mm به وسیله فرآیند کشش عمیق گرم گرادایانی در دماهای محیط، 80°C، 150°C، 180°C، 250°C، 350°C، 450°C و 550°C مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ناحیه فلنج بلنک توسط حرارت‌دهی قالب گرم شده و خنک‌سازی مرکز بلنک جهت افزایش مقاومت ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه نیز توسط سنبه آبگرد انجام می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما در ناحیه فلنج بلنک و همچنین خنک‌سازی مرکز بلنک منجر به بهبود نسبت کشش حدی می‌شود، به طوری که در دمای شکل‌دهی 550°C و سرعت رم 378 mm/min با روانکاری پودر گرافیت می‌توان به نسبت کشش حدی 2/83 دست یافت.

## Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing

Abozar Barimani Varandi, Seyed Jamal Hosseinipour\*

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran.

\*P.O.B. 484 Babol, Iran, j.hosseini@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 December 2013  
Accepted 22 January 2014  
Available Online 28 September 2014

#### Keywords:

Gradient Warm Deep Drawing  
Limit Drawing Ratio  
Aluminum Alloy

### ABSTRACT

Aluminum alloys are using widely duo to high strength-to-density ratio in the industries of automotive, shipbuilding and aerospace as a substitution of steel sheets. To increase the formability of aluminum alloys in deep drawing process and due to formability problems of these alloys in room temperature using of warm deep drawing process is necessary. According to recent researches, warm deep drawing in gradient condition has better results as isothermal case. In this paper the process parameters in production of cylindrical parts from aluminum alloys 5083 sheet with 2mm thickness is investigated. For this purpose, gradient warm deep drawing in temperatures of ambient (25°C), 80°C, 150°C, 180°C, 250°C, 350°C, 450°C and 550°C have been used. The blank in flange region is heated by die heating and the blank center to increase the strength of the region which contact with punch corner radius is cooled by water circulating punch. The results show that increasing the temperature of the blank in flange region and also cooling of blank center lead to improve the limit drawing ratio. In forming temperature of 550°C and ram speed of 378 mm/min and lubrication by graphite powder can reach to the limit drawing ratio equal to 2.83.

### 1- مقدمه

شده با فیبر، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند و کاربرد وسیعی در ساختمان‌ها، پل‌ها، صنایع دریایی، مخازن ذخیره‌سازی و سیستم‌ها و مجاری فشاری مورد استفاده در دماهای پایین دارند [1]. کشش عمیق از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی ورق به‌شمار می‌آید. ویژگی این فرآیند در تولید قطعاتی با هندسه پیچیده، استحکام بالا و وزن کم است که با سایر فرآیندهای شکل‌دهی تولید آنها امکان‌پذیر نیست. با توجه به

آلیاژهای آلومینیومی سری 5000 قابلیت کرنش سختی داشته و مشخصه‌هایی مانند استحکام نسبتاً بالا، مقاومت خوردگی عالی حتی در آب شور، قابلیت جوشکاری خوب، چگالی کم و سفتی خیلی زیاد حتی در دمای تبریدی را دارا هستند. این آلیاژها در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا، به‌عنوان جایگزینی برای ورق‌های فولادی و پنل‌های پلاستیکی تقویت

ورق به‌راحتی ترک ایجاد می‌شود، اما در دمای شکل‌دهی  $150^{\circ}\text{C}$  و سرعت کشتش  $15\text{mm}/\text{min}$  نسبت کشتش حدی به 2 می‌رسد. در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  نسبت کشتش می‌تواند به 3 برسد.

پالمبو و تریکاریکو [7] فرآیند کشتش عمیق گرم‌گرادیانی آلیاژ آلومینیومی 5754 با ضخامت  $0/8\text{mm}$  را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش، یک محدوده دمایی  $100-250^{\circ}\text{C}$  برای ورق هولدر طرح‌ریزی شده است. هنگامی که دمای  $250^{\circ}\text{C}$  روی ناحیه فلنچ بلنک اعمال می‌شود، دمای  $110^{\circ}\text{C}$  می‌تواند در ناحیه مرکز ورق توسط سنبه خنک‌شونده تضمین شود. آن‌ها نشان داده‌اند که مقادیر سرعت بالا برای سنبه منجر به شکست زودهنگام در ورق می‌شود و هر چه سرعت بالاتر باشد، ارتفاع فنجان کمتری تحت نیروی یکسان ایجاد خواهد شد.

پالمبو و همکاران [8]، در پژوهشی دیگر، تمرکز را بر روی فرآیند کشتش عمیق گرم آلیاژ منیزیم AZ31 معطوف کرده‌اند. شبیه‌سازی اجزای محدود جهت بررسی توزیع تنش و کرنش و همچنین صحت‌گذاری بر نتایج آزمایشگاهی نیز انجام شده است. برای شبیه‌سازی دو استراتژی مختلف با و بدون اعمال اثر خنک‌کنندگی سنبه را مورد تحلیل قرار داده‌اند. شبیه‌سازی در حالت با اعمال اثر خنک‌کنندگی سنبه هم نسبت کشتش بیشتری را برای ورقگیری با دمای  $230^{\circ}\text{C}$  ایجاد کرده و هم توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را در دیواره نتیجه داده است.

ژانگ و همکاران [9] کشتش عمیق گرم‌گرادیانی ورق‌های آلیاژ منیزیم نورد شده را مورد بررسی قرار داده‌اند که قابلیت کشتش عمیق خوبی در یک محدوده دمایی  $105-175^{\circ}\text{C}$  ایجاد شده که در دمای  $170^{\circ}\text{C}$  نسبت کشتش حدی معادل  $2/6$  حاصل شده است. چروکیدگی و عیوب شکست حاصل از نیروهای ورقگیر نامناسب را نیز توسط تحلیل اجزای محدود مورد آنالیز قرار داده که نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی سازگاری خوبی نشان داده‌اند.

کیم [10] ترکیبی از تکنیک طراحی آزمایش‌ها با تحلیل اجزای محدود را برای تعیین پارامترهای فرآیندی بهینه در شکل‌دهی گرم‌گرادیانی آلیاژ آلومینیومی 5182 مورد استفاده قرار داده است. نتایج او نشان داده که دماهای بالاتر برای قالب‌ها و دمای پایین‌تر برای سنبه جهت دستیابی به شکل‌پذیری بیشتر مطلوب است. پارامترهای بهینه او دمای  $350^{\circ}\text{C}$  برای ورقگیر و قالب و همچنین دمای سنبه  $25^{\circ}\text{C}$  بوده که بهترین شرایط شکل‌پذیری را ایجاد کرده است.

وانگ و همکاران [11] شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیومی 7075 با ضخامت  $2\text{mm}$  را در فرآیند کشتش عمیق گرم‌هم‌دم مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که شکل‌پذیری این آلیاژ تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  بهبودی نداشته است. با افزایش دما تا  $180^{\circ}\text{C}$  نسبت کشتش حدی افزایش یافته و به مقدار 2 می‌رسد، اما در دمای  $220^{\circ}\text{C}$  و  $260^{\circ}\text{C}$  شکل‌پذیری کاهش یافته و نسبت کشتش حدی معادل  $1/9$  می‌شود.

اغلب پژوهش‌های انجام شده در خصوص آلیاژهای آلومینیوم در محدوده شکل‌دهی گرم تا حداکثر دمای  $350^{\circ}\text{C}$  است. در این پژوهش، فرآیند کشتش عمیق گرم‌گرادیانی ورق آلیاژ آلومینیوم 5083 در محدوده دمایی محیط تا دمای  $550^{\circ}\text{C}$  انجام شده است. اثر پارامترهای فرآیندی شامل نیروی ورقگیر، هندسه ابزار و روانکار بر نسبت‌های کشتش حدی، توزیع ضخامت و همچنین کیفیت سطوح شکل گرفته در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش، برای انجام تست‌های کشتش عمیق گرم‌گرادیانی، از ورق

شکل‌پذیری پایین آلیاژهای آلومینیوم در دمای اتاق در مقایسه با فولادهای کم‌کربن، ضرورت افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم منجر به توسعه روش‌های شکل‌دهی گرم شده است [2].

در فرآیند کشتش عمیق، اولین برخورد سنبه با ورق بین شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره قالب صورت می‌گیرد که در صورت حرارت‌دهی بلنک، هنگام اعمال نیروی سنبه نازک‌شدگی ورق در قسمت شعاع گوشه سنبه را در پی خواهد داشت. با افزایش دمای ورق، استحکام تسلیم کاهش یافته و احتمال شکست در قسمت شعاع گوشه سنبه در آغاز شکل‌دهی نیز افزایش خواهد یافت. لذا، اگر استحکام ورق در منطقه شعاع گوشه سنبه افزایش یابد، از شکست زودهنگام جلوگیری به‌عمل می‌آید. برای افزایش استحکام در این قسمت، از فرآیند کشتش عمیق گرم در حالت گرادیانی استفاده می‌شود. بدین صورت که ناحیه فلنچ بلنک توسط حرارت‌دهی قالب یا ورقگیر<sup>1</sup> گرم شده و ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه نیز توسط جریان سیال خنک می‌شود. در نتیجه فرآیند کشتش عمیق گرم‌گرادیانی در مقایسه با حرارت‌دهی یکنواخت کل مجموعه قالب، که در فرآیند کشتش عمیق گرم هم‌دم صورت می‌پذیرد، نتایج مطلوب‌تری را در پی خواهد داشت [3].

ناکا و یوشیدا [4] اثرات سرعت شکل‌دهی و دما روی قابلیت کشتش را برای یک ورق آلیاژ آلومینیوم 5083 با ضخامت  $1\text{mm}$  توسط تست‌های کشتش عمیق گرم‌گرادیانی انجام شده در سرعت‌های شکل‌دهی گوناگون و در دمای قالب  $180-25^{\circ}\text{C}$  مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که نسبت کشتش با افزایش سرعت شکل‌دهی کمتر و با بالا رفتن دما بیشتر می‌شود. بزرگ‌ترین نسبت کشتش حدی نیز در بالاترین دما معادل  $180^{\circ}\text{C}$  و در کمترین سرعت اعمالی، یعنی  $2\text{mm}/\text{min}$ ، ایجاد شده که معادل  $2/38$  بوده است.

مون و همکاران [3] مطالعه امکان‌سنجی روی کنترل دمای ابزار جهت افزایش قابلیت کشتش ورق آلومینیومی 1050 در حالت گرادیانی را انجام داده‌اند. هدف آن‌ها افزایش میزان نسبت کشتش حدی توسط کاهش دمای سنبه به  $10^{\circ}\text{C}$  - به‌وسیله جریان هوای منجمد بوده، در حالی که فلنچ ورق با حرارت‌دهی قالب تا دمای  $200^{\circ}\text{C}$  گرم شده است. تحت این شرایط نسبت کشتش بالاتری در حدود  $2/1$  نسبت به سنبه معمولی به‌دست آمد.

تاکودا و همکاران [5] شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیومی 5182 با ضخامت  $1\text{mm}$  را در فرآیند کشتش عمیق گرم‌گرادیانی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که حدود شکل‌دهی در دماهای بالا به گسیختگی حول شعاع گوشه حفره قالب بستگی داشته و نسبت کشتش حدی با شعاع پروفیل قالب افزایش می‌یابد که نسبت کشتش حدی  $2/8$  برای شعاع  $10\text{mm}$  در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  قابل دستیابی است. نتایج پیش‌بینی شده تحلیل اجزای محدود تاکودا و همکاران به‌خوبی با نتایج آزمایشگاهی از لحاظ کمی و کیفی در تطابق بوده است.

امبروگیو و همکاران [1] سه استراتژی مختلف یعنی کشتش عمیق در دمای اتاق، کشتش عمیق با حرارت‌دهی یکنواخت ورق (همدم<sup>2</sup>) و نیز کشتش عمیق گرم‌گرادیانی را برای ورق آلومینیومی 1050 مورد مقایسه قرار داده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که به‌هنگام اعمال گرادیان حرارتی به ورق، نسبت کشتش حدی بالاتری معادل  $2/03$  ایجاد شده است و نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی را با تطابق مناسب مورد مقایسه قرار داده‌اند.

چانگ و همکاران [6] کشتش عمیق گرم‌هم‌دم را برای آلیاژ منیزیمی AZ31 به‌طور تجربی بررسی کرده‌اند. در دمای شکل‌دهی کمتر از  $150^{\circ}\text{C}$  در

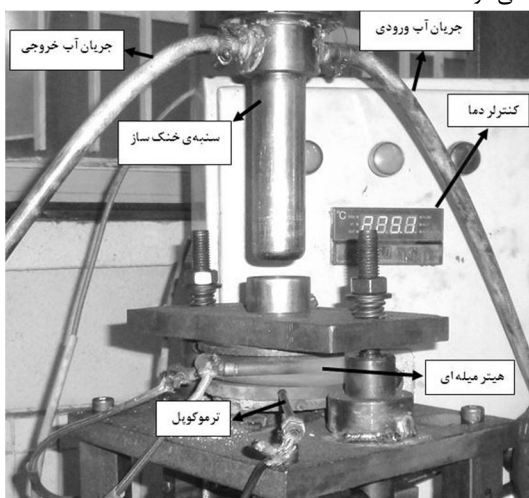
1-Blankholder  
2-Isothermal

وجود ورقگیر جهت نگهداری ورق در موقعیت خود با اعمال نیروی کافی، ضروری است. برای نیروی ورقگیر مقدار کمینه‌ای اعمال شده است که بتواند از چروکیدگی ورق‌ها جلوگیری کند. این نیرو توسط فنرهایی به ورقگیر اعمال شده که با توجه به میزان فشردگی و ضریب سختی فنرها، نیروی وارده به ورقگیر جهت عدم چروکیدگی در هر دما تعیین شده است. در هر دما، ابتدا نیروی کمینه جهت شکل‌دهی نمونه سالم تعیین شده و سپس با افزایش تدریجی 1mm بر قطر بلنک، تست‌ها تا شکل‌دهی بزرگ‌ترین نمونه سالم ادامه پیدا کرده تا نسبت کشش حدی با توجه به بیشینه قطر سالم شکل گرفته در هر دما تعیین شود. با توجه به نسبت کشش متداول برای آلیاژهای آلومینیوم که در دمای محیط معادل 2 است، برای تست‌های اولیه در دمای محیط بلنکی با قطر 72mm توسط دستگاه تراش به‌صورت گرد بریده شده است که در صورت شکل‌گیری نمونه‌ای سالم، تدریجاً 1mm به قطر ورق افزوده می‌شود تا نهایتاً شکست صورت گیرد.

تست‌ها در دمای محیط (25°C) تا دمای 550°C انجام گرفته‌اند. برای حرارت‌دهی ناحیه فلنچ ورق از یک هیتر حرارتی میله‌ای با توان 1/5kW استفاده شده است که درون شیار محیطی قالب (شکل 2) به‌صورت مارپیچ قرار گرفته که در شکل 3 نشان داده شده است. ترموکوپلی در تماس با قالب قرار دارد که دمای قالب را با ارسال سیگنال به کنترلر دما تعیین می‌کند که پس از رسیدن دمای قالب به دمای تنظیم شده، هیتر با دستور کنترلر خاموش شده و بلافاصله بعد از آن تست‌ها انجام می‌گیرد. خنک‌سازی مرکز ورق نیز توسط سنبه آب‌گردی که دو کانال محوری برای جریان آب ورودی و خروجی در آن ماشینکاری شده است انجام می‌گیرد (شکل 3).

جهت بررسی توزیع ضخامت قطعات شکل گرفته از مرکز ورق تا دیواره در مسیری معین، در هر دما، نمونه‌ای با نسبت کشش مشخص به‌صورت شکل 4 در جهت نورد برش داده شده که ناحیه‌های A، B و C در آن مشخص و سپس توسط ضخامت‌سنج دستی ضخامت نقاط مختلف اندازه‌گیری شده است.

ماده خام سنبه، قالب و ورقگیر از فولاد گرم‌کار است که تمامی سطوح جهت کاهش اصطکاک به‌دقت صاف و صیقلی ماشین‌کاری شده‌اند. جهت روانکاری در دمای محیط از گریس فشار بالا و در دماهای بالا از گرافیت استفاده شده است که قبل از هر تست بر روی ورق، سطوح قالب و ورقگیر آغشته می‌شود.



شکل 3 ابزار بندی فرآیند کشش عمیق گرم‌گردانی

آلیاژی آلومینیوم 5083 با ضخامت 2mm استفاده شده است که خواص شیمیایی آن در جدول 1 آمده است.

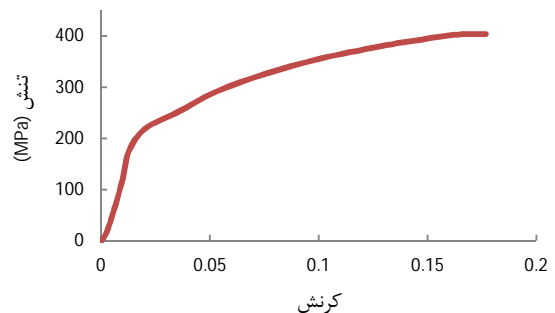
به منظور تعیین نمودار تنش-کرنش، نمونه‌هایی از ورق طبق استاندارد ASTM-A370 آماده و توسط دستگاه آزمایش کشش تا حد پارگی کشیده شده است. مشخصات فیزیکی ماده در جدول 2 و همچنین منحنی تنش-کرنش حقیقی جنس مذکور نیز در شکل 1 نشان داده شده است. تست‌های کشش عمیق گرم‌گردانی توسط سنبه سر تخت با قطر 36mm و شعاع گوشه 8mm و همچنین در قالبی با حفره داخلی 44mm شعاع گوشه حفره 8mm (شکل 2) به‌وسیله یک پرس هیدرولیک 50 تن با سرعت رم 378 mm/min انجام گرفته است. در این فرآیند حدود شکل‌دهی توسط نسبت کشش حدی بیان شده که بزرگ‌ترین نسبت قطر سنبه به بلنکی است که در آن قطعه‌ای سالم با موفقیت شکل‌دهی شود.

جدول 1 خواص شیمیایی آلومینیوم 5083

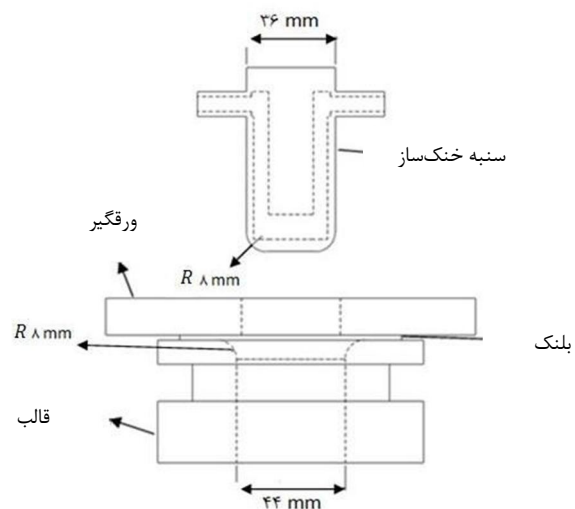
Ti	Zn	Ni	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
0/02	0/02	0/01	0/10	4/60	0/65	0/01	0/20	0/07

جدول 2 خواص فیزیکی آلومینیوم 5083

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
2700	70	0/33



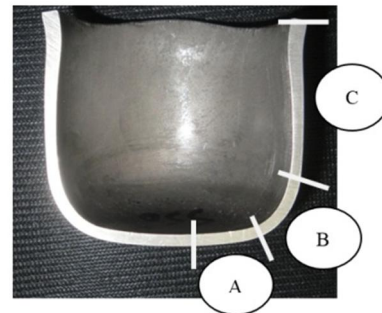
شکل 1 نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



شکل 2 هندسه ابزار بندی



شکل 6 نمونه‌هایی با شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره قالب (mm) به ترتیب از راست به چپ، 8، 4، 8 و 6، 8 و 8



شکل 4 نمونه شکل‌یافته برش خورده در جهت نورد

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- اثر هندسه شعاع‌های گوشه سنبه و گوشه حفره قالب

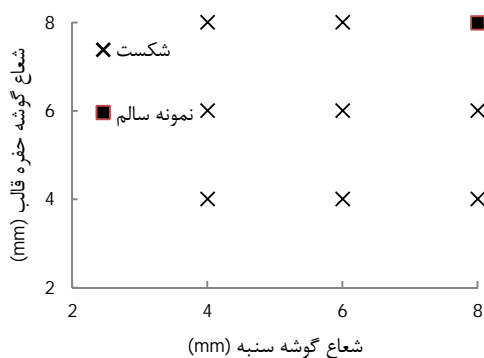
پس از تعیین شعاع سنبه، لقی قالب، که همان فاصله شعاعی بین سنبه و دیواره حفره قالب است، جهت ایجاد کشش مناسب در ورق باید تعیین شود. لقی کم از کشش ورق جلوگیری کرده که گسیختگی زود هنگام را در پی خواهد داشت و لقی زیاد نیز منجر به چروکیدگی می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، لقی مناسب قالب برای ورق آلیاژی آلومینیوم 5083 دو برابر ضخامت اولیه ورق است که با نتایج ناکا [4] در تطابق است.

یکی از فاکتورهای بسیار مهم جهت کشش مناسب ورق و شکل‌دهی نمونه‌ای سالم، شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره قالب است. برای یافتن شعاع‌های مناسب جهت شکل‌دهی نمونه‌های سالم، تست‌هایی با شعاع‌های مختلف صورت گرفته تا اندازه‌های بهینه ایجاد شود. ابتدا، هر دو شعاع 4mm در نظر گرفته شده و به دلیل پارگی ورق با ثابت نگه داشتن شعاع گوشه سنبه از قالب‌هایی با شعاع گوشه حفره 6mm و 8mm استفاده شده است. در هر سه حالت، به دلیل کشش ناکافی، هنگام تماس ورق با شعاع‌های سنبه و قالب در ورق پارگی ایجاد شده است (شکل 5).

در مرحله بعد سنبه‌ای با شعاع گوشه 6mm استفاده شده است و توسط قالب‌های با شعاع گوشه 6، 4 و 8mm آزمایش‌ها انجام شده است که در این سه حالت نیز ورق‌ها در ابتدای شکل‌دهی گسیخته شده‌اند. با تغییر شعاع گوشه سنبه به 8mm و انجام تست در قالب‌هایی با شعاع گوشه حفره 6، 4 و 8mm آزمایش‌ها تکرار شده است. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، نهایتاً توسط شعاع گوشه سنبه 8mm در قالبی با شعاع گوشه حفره 8mm نمونه‌ای سالم شکل گرفته است. لذا، سایر آزمایش‌ها توسط سنبه‌ای با شعاع گوشه 8mm در قالبی با شعاع گوشه حفره 8mm انجام شده است. نتایج شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف برای گوشه سنبه و گوشه حفره قالب در دمای محیط در شکل 7 ارائه شده است.



شکل 5 نمونه‌هایی با شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره قالب (mm) به ترتیب از راست به چپ، 4، 4 و 4، 6 و 8



شکل 7 نتایج شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف در دمای محیط

#### 3-2- اثر روانکار بر فرآیند کشش عمیق گرم‌گرادیانی

روانکار مورد استفاده باید به راحتی قابل استعمال بوده، به آسانی پاک شود و بتواند لایه روانکار یکنواختی را ایجاد کند و همچنین در دماهای شکل‌دهی نیز به راحتی تبخیر نشده و کارایی خود را از دست ندهد. در دمای محیط از گریس فشار بالا، به عنوان روانکار، استفاده شده که عملیات روانکاری را به خوبی انجام داده است، اما برای شکل‌دهی در دماهای بالا و به خصوص حالت داغ (دماهای بالاتر از نصف دمای ذوب مطلق) گریس فشار بالا قابلیت روانکاری خود را از دست داده و منجر به چسبندگی ورق به قالب شده که گسیختگی را در پی خواهد داشت. در دمای 150°C با روانکاری گریس فشار بالا در بیشینه قطر ورقی معادل 74mm نمونه‌ای سالم شکل گرفته است، اما در شکل‌دهی ورقی با قطر 75mm نمونه دچار پارگی شده است، در حالی که این قطر ورق در دمای محیط با موفقیت شکل گرفته است.

آزمایشی نیز با روانکاری پودر تالک انجام گرفته است. پودر تالک، با توجه به حفظ خواص خود در دماهای بالا، کاربرد وسیعی در فرآیند ریخته‌گری داشته که در دماهای بالا اگر چه ذوب و تبخیر نمی‌شود، اما در فرآیند کشش عمیق قابلیت روانکاری خوبی از خود نشان نداده و در شکل‌دهی ورقی با قطر 77mm پارگی را در پی داشته است. در سایر آزمایش‌ها، برای روانکاری در دماهای بالا از پودر گرافیت استفاده شده است که در دماهای افزایشی عملیات روانکاری را به خوبی انجام داده و قطعات سالمی با نسبت‌های کششی بالا توسط این روانکار شکل گرفته‌اند. در دمای 150°C قطر ورق 80mm (نسبت کشش 2/22) با روانکاری پودر گرافیت با موفقیت شکل گرفته است که دلالت بر کارایی بهتر این روانکار در دماهای بالا نسبت به گریس فشار بالا و پودر تالک دارد (شکل 8).

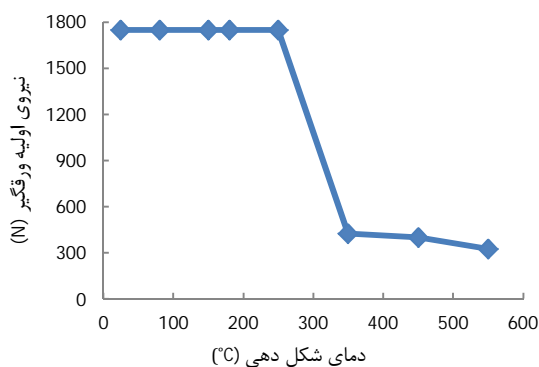
قطعات سالمی که با نیروی کافی شکل می‌گیرند در قسمت بالایی خود اغلب صاف و مسطح نیستند و معمولاً حالتی کنگره‌ای و موجی دارند که در شکل 10 مشاهده می‌شود. این پدیده معروف به گوشواره‌ای شدن است که در اثر ناهمسانگردی صفحه‌ای حاصل از فرآیند نورد ورق ایجاد می‌شود.

نیروی وارده به ورقگیر جهت عدم چروکیدگی در هر دما تعیین شده است که تغییرات آن نسبت به دما در شکل 11 مشاهده می‌شود. طبق نمودار، مقدار این نیرو تا دمای  $250^{\circ}\text{C}$  تغییری نکرده، که معادل نیروی وارده در دمای محیط است. در حالت داغ، که معادل دماهای بالاتر از  $250^{\circ}\text{C}$  است، به علت تبلور مجدد و کار نرمی ایجاد شده، استحکام ورق کاهش چشمگیری پیدا می‌کند؛ در نتیجه تنش سیلان ماده کاهش می‌یابد. لذا، نیروی اصطکاک با شدت کمتری از جریان ماده جلوگیری می‌کند که این امر نیروی ورقگیر کمتری را طلب می‌کند. در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $550^{\circ}\text{C}$  نیز طبق نتایج [12] ویژگی ابرمومسانی<sup>1</sup> ماده کاهش تنش سیلان و در نتیجه کاهش مقدار نیروی ورقگیر مورد نیاز را تشدید کرده، طوری که در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  نیروی ورقگیر کمترین مقدار یعنی  $325\text{N}$  را خواهد داشت. در شکل 11، تغییر شیب ناگهانی نمودار دقیقاً به هنگام ورود به ناحیه داغ است که حد واسط حالت گرم و داغ را نشان داده که دلالت بر کاهش شدید نیروی ورقگیر در محدوده دمایی داغ دارد.

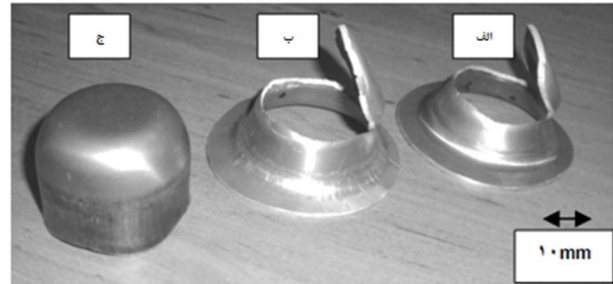
برای اطمینان از صحت مقادیر نیرو، در تمامی دماها، پس از یافتن بزرگ‌ترین قطر ورقی که نمونه‌ای سالم را شکل داده، با افزایش  $1\text{mm}$  قطر ورق، تست‌هایی با چندین نیروی ورقگیر متفاوت انجام گرفته که در هیچ حالت نمونه‌ای سالم شکل نگرفته است که دلالت بر صحت نیروهای ورقگیر تعیین شده دارد.

### 3-4- اثر دماهای شکل‌دهی بر نسبت کشش حدی

پس از تعیین نیروی ورقگیر در هر دما، با افزایش تدریجی  $1\text{mm}$  بر قطر ورق، تست‌ها تا ظهور پارگی ادامه پیدا کرده است که نهایتاً در هر دما نسبت کشش حدی توسط بزرگ‌ترین قطر ورق شکل گرفته سالم تعیین شده است. جهت اطمینان از مقدار قطر بزرگ‌ترین ورق شکل گرفته، در هر دما، شرایط سه بار تکرار شده‌اند که خطای آزمایش در شکل 13 نشان داده شده است. در شکل 12، نسبت‌های کشش حدی حاصل در دمای محیط تا محدوده شکل-دهی گرم در سرعتی یکسان ( $378\text{ mm/min}$ ) با نتایج ناکا [4] مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج تجربی به دست آمده در این پژوهش حاکی از بهبود نسبت کشش حدی است، طوری که در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  افزایش  $5\%$  در نسبت کشش حدی نسبت به نتایج ناکا حاصل شده است. قابل ذکر است که در



شکل 11 تاثیر دمای شکل‌دهی بر نیروی ورقگیر



شکل 8 نمونه‌های شکل یافته با روانکاری (قطر ورق)، الف) گریس فشار بالا (75mm)، ب) پودر تالک (77mm)، ج) پودر گرافیت (80mm)

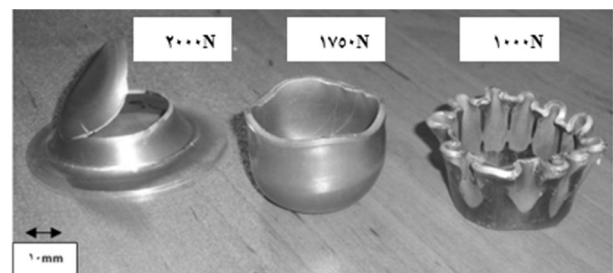
در شکل 9، نسبت‌های کشش حدی حاصل در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  برای سه روانکار مختلف نشان داده شده است. پودر گرافیت نسبت به دو روانکار دیگر نسبت کشش حدی بالاتری را ایجاد کرده است که ناشی از قابلیت روانکاری خوب آن است. در ساختار گرافیت لایه‌های اتمی توسط نیروهای ثانویه ضعیفی به یکدیگر متصل‌اند که همین پیوند ضعیف، لغزش لایه‌های گرافیتی را بر روی یکدیگر در پی خواهد داشت. سرخوردن ورق بر روی لایه‌های گرافیتی منجر به کاهش اصطکاک شده که بهترین شرایط اصطکاک را جهت کشش مناسب ورق ایجاد می‌نماید.

### 3-3- اثر دما بر نیروی ورقگیر

برای نیروی ورقگیر مقدار کمینه‌ای اعمال شده است که بتواند از چروکیدگی ورق‌ها جلوگیری کند. وقتی نیروی ورقگیر خیلی کم یا خیلی زیاد باشد، به ترتیب، چروکیدگی و گسیختگی را در پی خواهد داشت. در دماهای مختلف، ابتدا، نیروی اولیه جهت عدم چروکیدگی تعیین شده و سپس، با ثابت نگه داشتن نیرو، بر قطر ورق‌ها تدریجاً  $1\text{mm}$  افزوده می‌شود تا با یافتن بزرگ‌ترین ورق شکل‌گرفته سالم در هر دما، نسبت کشش حدی در آن شرایط تعیین شود. شکل 10 نمونه‌های شکل گرفته در دمای محیط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نیروی کم منجر به شکل‌گیری نمونه چروکیده شده، نیروی کافی نمونه‌ای سالم را شکل داده و نیروی زیاد نیز پارگی را در پی داشته است.



شکل 9 نسبت‌های کشش حدی به دست آمده در دمای  $150^{\circ}\text{C}$



شکل 10 نمونه‌های شکل گرفته در دمای محیط در نیروهای ورقگیر مشخص، به ترتیب از راست به چپ: چروکیدگی، نمونه سالم و پارگی

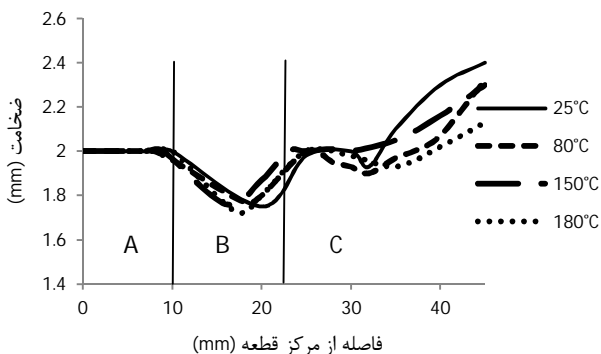


شکل 14 بزرگ‌ترین نمونه‌های شکل گرفته سالم در دماهای مختلف

مشخص شده است. محدوده فاصله از مرکز قطعه تا انتهای فلنج نمونه، طبق شکل 4، به سه ناحیه A، B و C تقسیم شده است. در این شکل، مشخص است که با افزایش دما توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را در دیواره خواهیم داشت که با نتایج پالومیو و همکاران [8] در تطابق است و برتری حالت گرادپانی نسبت به کشش عمیق در دمای محیط را برای آلومینیوم 5083 نشان می‌دهد. ماده واقع در ناحیه A، کف نمونه شکل یافته را شکل می‌دهد که این ماده باید در راستای حرکتی سنبه با آزادی بلغزد. لذا، مقداری کشیدگی در آن ایجاد شده، اما عموماً تغییر در ضخامت ورق در این ناحیه حداقل است. ماده واقع در ناحیه B، که شعاع گوشه پایینی نمونه را شکل می‌دهد، در حین کشش تحت خمش قرار می‌گیرد که کرنش‌های نسبتاً بزرگی را در این ناحیه در پی خواهد داشت. ماده واقع در ناحیه C، که از انتهای شعاع گوشه پایینی نمونه آغاز شده، دیواره و فلنج را شکل می‌دهد. انتهای فلنج در جهت شعاعی به طرف داخل کشیده می‌شود که تاثیر این کاهش در شعاع و محیط ورق موجب افزایش ضخامت می‌شود که غفوری و همکاران نیز به نتایج مشابهی دست یافتند [13].

در محدوده دمایی محیط تا دمای  $180^{\circ}\text{C}$ ، هنوز تبلور مجدد و کار نرمی حادث نشده است. لذا، استحکام در ناحیه دیواره کاهش زیادی نداشته، در نتیجه بیشترین نازک‌شدگی در این محدوده دمایی در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه، یعنی ناحیه B، ایجاد می‌شود. در حالت گرادپانی، علی‌رغم کاهش استحکام ناحیه فلنج ورق، مقاومت مرکز ورق، به دلیل خنک‌سازی، افزایش می‌یابد. لذا، احتمال شکست در ناحیه B، که مستعدترین ناحیه پارگی ورق در دمای محیط به شمار می‌آید، کاهش یافته که نهایتاً دستیابی به نسبت‌های کشش بالایی را ممکن می‌سازد.

در نمودار شکل 16 توزیع ضخامت نمونه‌هایی در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  تا دمای  $550^{\circ}\text{C}$  با نسبت کشش حدی معین نشان داده شده است. در این محدوده



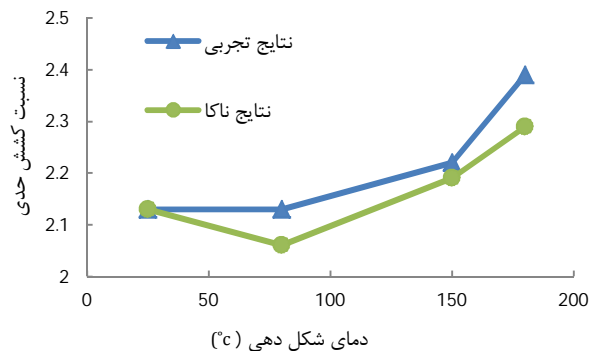
شکل 15 توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه‌های شکل یافته در دماهای محیط تا  $180^{\circ}\text{C}$

حین حرارت‌دهی، سنبه به دور از قالب نگه داشته شده و توسط جریان آبگرد خنک‌سازی می‌شود و قبل از انجام فرآیند سنبه برای مدت زمان کوتاهی به صورت مماس بر ورق قرار گرفته و سپس فرآیند انجام می‌شود.

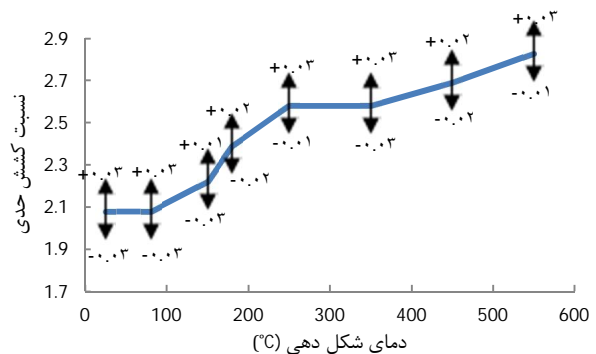
در شکل 13، نسبت‌های کشش حدی حاصل از نتایج تجربی برای تمامی دماهای اعمالی در فرآیند نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای ناحیه فلنج ورق منجر به بهبود نسبت کشش حدی می‌شود. طبق شکل 13، با افزایش دما تا  $80^{\circ}\text{C}$ ، بهبودی در نسبت کشش حدی حاصل نشده است که طبق نتایج ناکا [4] استحکام در این دما تغییر چندانی نسبت به دمای محیط نداشته، لذا پیشرفتی در قابلیت شکل‌پذیری ایجاد نشده است. با حرارت‌دهی بیشتر تا دمای  $350^{\circ}\text{C}$ ، به علت تبلور مجدد و کار-نرمی ایجاد شده، سهولت جریان ماده و عدم مقاومت به تغییر شکل‌دهی قطره‌های بزرگ‌تر و در نتیجه افزایش نسبت کشش حدی را نتیجه می‌دهد. آلومینیوم 5083 در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $550^{\circ}\text{C}$  ویژگی ابرموسانی از خود نشان داده که نرم‌شدگی و افزایش چشمگیر شکل‌پذیری را سبب می‌شود که طبق نمودار شکل 13، شیب تندی را دماهای بالای  $400^{\circ}\text{C}$  خواهیم داشت که این روند ایجاد شده در حالت داغ، در شکل 11 نیز منجر به کاهش شدید نیروی ورقگیر شده است. بالاترین نسبت کشش حدی برای حالت تجربی معادل  $2/83$  در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  ایجاد شده که بزرگ‌ترین نسبت کشش حدی گزارش شده در فرآیند کشش عمیق قطعات استوانه‌ای برای آلیاژ آلومینیومی 5083 است. بزرگ‌ترین قطعات شکل گرفته سالم در هر دما در شکل 14 نشان داده شده‌اند.

### 3-5- بررسی توزیع ضخامت

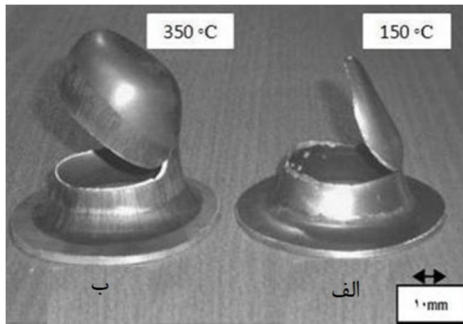
در شکل 15، توزیع ضخامت نمونه‌هایی در دمای محیط تا دمای  $180^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده که نسبت کشش هر نمونه برش زده در هر دما روی نمودار



شکل 12 مقایسه نسبت کشش حدی حاصل از نتایج تجربی با نتایج ناکا [4] در محدوده دمایی محیط تا دمای  $180^{\circ}\text{C}$



شکل 13 تغییرات نسبت کشش حدی در دماهای مختلف شکل‌دهی



شکل 17 نوع پارگی در دماهای مشخص، (الف) ناحیه B، (ب) ناحیه C



شکل 18 نمونه‌های شکل گرفته در دماهای به ترتیب از راست به چپ: دمای محیط، 150°C، 450°C

شکل‌دهی نمونه‌های سالم به دست آمده است. نتایج مهم حاصل از این مقاله به صورت زیر خلاصه شده است:

- با انجام آزمایش‌ها در حالات مختلف، بهترین حالت هندسی ابزار برای کشش ورق آلومینیوم 5083 با ضخامت 2mm، لقی معادل دو برابر ضخامت اولیه ورق، استفاده از سنبه‌ای با شعاع گوشه 8mm و قالبی با شعاع گوشه حفره 8mm است.
- نیروی ورق‌گیر تا دمای 250°C تغییری نکرده که معادل نیروی وارده در دمای محیط است. در حالت داغ و در دماهای بالاتر از 250°C، به علت تبلور مجدد و کارنرمی ایجاد شده، استحکام ورق کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. در دمای 450°C و 550°C، ویژگی ابرومسانی ماده کاهش نیروی ورق‌گیر را تشدید کرده، طوری که در دمای 550°C نیروی ورق‌گیر کمترین مقدار، یعنی 325N، را خواهد داشت.
- با افزایش دمای شکل‌دهی، نسبت کشش حدی بهبود می‌یابد. بزرگ‌ترین نسبت کشش حدی مربوط به بیشترین دما یعنی 550°C است که معادل 2/83 است.
- با افزایش دما از محیط (25°C) تا 180°C، توزیع ضخامت یکنواخت‌تری را در دیواره خواهیم داشت که در این محدوده بیشترین کاهش ضخامت و پارگی در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه (ناحیه B) ایجاد می‌شود. با افزایش دما از 250°C تا 550°C، کاهش ضخامت در ناحیه در تماس با شعاع گوشه سنبه کاهش می‌یابد. در این محدوده دمایی بیشترین کاهش ضخامت و همچنین پارگی در دیواره (ناحیه C) ایجاد می‌شود.

#### 5- مراجع

- [1] G. Ambrogio, L. Filice, G. Palumbo, S. Pinto, Prediction of formability extension in deep drawing when superimposing a thermal gradient, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162, pp. 454-460, 2005.

دمایی، کارنرمی حاصل از تبلور مجدد کاهش شدید استحکام دیواره را در پی داشته (در حالی که مقاومت ناحیه B طی عملیات خنک‌سازی افزایش می‌یابد) که در نهایت بیشترین کاهش ضخامت برای این محدوده دمایی در دیواره، یعنی ابتدای ناحیه C، را منجر شده است. این کاهش ضخامت به هنگام جریان ماده بر روی شعاع گوشه حفره قالب است. با افزایش دما از 250°C تا 550°C، کاهش ضخامت در ناحیه B کاهش یافته که حاکی از موفقیت عملیات خنک‌سازی در مرکز ورق است. طبق نمودار، در دمای 550°C در نسبت کشش 2/30، کمترین کاهش ضخامت در ناحیه C نسبت به تمامی دماها ایجاد شد.

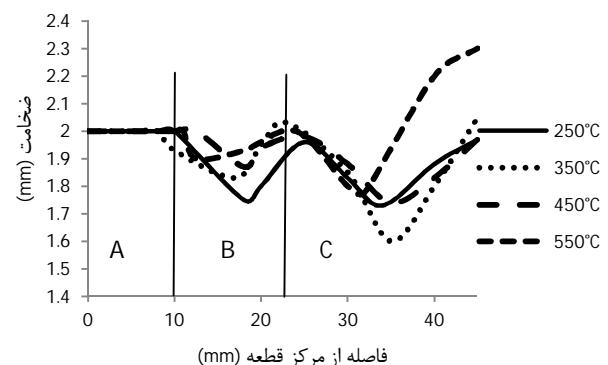
با توجه به شکل 15، بیشترین کاهش ضخامت در محدوده دمایی محیط تا دمای 180°C در ناحیه B ایجاد می‌شود. لذا، در این محدوده دمایی پارگی نیز در ناحیه B حادث می‌شود (شکل 17). طبق شکل 16، بیشترین کاهش ضخامت در محدوده دمایی 250°C تا 550°C در دیواره اتفاق افتاده که در نتیجه، پارگی در این محدوده دمایی، در صورت وقوع، در ناحیه در تماس با شعاع گوشه حفره قالب (ناحیه C) ایجاد خواهد شد که در شکل 17 نشان داده شده است و توسط تا کودا و همکاران [5] نیز نتایج مشابه ارائه شده است.

#### 3-6- کیفیت سطح قطعات شکل گرفته

قطعات شکل گرفته در دمای محیط همانند ورق اولیه، کاملاً صاف و صیقلی هستند. با افزایش دما، قطعات شکل گرفته، علاوه بر کدر شدن ناشی از حرارت‌دهی، دارای خراشیدگی‌های حرارتی در جهت طولی بوده که در شکل 18 کاملاً مشخص است. تمامی قطعات در قسمت دیواره دارای مرز مشخصی هستند که دو ناحیه مختلف را تشکیل می‌دهند. قسمتی از ورق، که پس از تماس با سنبه به آن چسبیده و هیچ جریان ماده‌ای در آن حادث نمی‌شود، کاملاً صیقلی باقی می‌ماند. اما در ناحیه دیواره و فلنج ورق، به علت جریان ماده بین شعاع گوشه سنبه و شعاع گوشه حفره قالب، سایش را خواهیم داشت که منجر به ایجاد سطح زبری می‌شود. شایان ذکر است که کدر شدن و تغییر رنگ قطعات شکل گرفته در حالت گرم و داغ ناشی از نفوذ سطحی گرافیت است که در دماهای بالا 400°C با شدت بیشتری صورت می‌پذیرد.

#### 4- نتیجه گیری

مجموعه‌ای برای تست فرآیند کشش عمیق گرم‌گردانی ورق آلومینیوم 5083 طراحی شده است. تست‌هایی در دمای محیط (25°C) تا دمای 550°C انجام شده که نهایتاً پارامترهای فرآیندی مناسب جهت



شکل 16 توزیع ضخامت نقاط مختلف برای نمونه‌های شکل یافته در دماهای 250°C تا 550°C

- [8] G. Palumbo, D. Sorgente, L. Tricarico, S. Zhang, W. Zheng, Numerical and experimental investigations on the effect of the heating strategy and the punch speed on the warm deep drawing of magnesium alloy AZ31, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1, pp. 342-346, 2007.
- [9] S. Zhang, K. Zhang, Y. Xu, Z. Wang, Y. Xu, Z. Wang, Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1, pp. 147-151, 2007.
- [10] H. S. Kim, A combined FEA and design of experiments approach for the design and analysis of warm forming of aluminum sheet alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1-4, pp. 1-14, 2010.
- [11] H. WANG, Y. b. LUO, P. Friedman, M. h. CHEN, L. GAO, Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-7, 2012.
- [12] S. Hosseinipour, An investigation into hot deformation of aluminum alloy 5083, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 319-322, 2009.
- [13] R. Ghafari-Ahangar, F. javanrodi, M. Pakbaz, Effect of hydroforming deep drawing parameters and comparing with traditional deep drawing processes by finite element method, *Modares Journal Of Mechanical Engineering*, Vol. 32, pp. 69-86, 2008 (In persian).
- [2] S. Toros, F. Ozturk, I. Kacar, Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, No. 1, pp. 1-12, 2008.
- [3] Y. Moon, Y. Kang, J. Park, S. Gong, Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 9, pp. 1283-1294, 2001.
- [4] T. Naka, F. Yoshida, Deep drawability of type 5083 aluminium-magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89, pp. 19-23, 1999.
- [5] H. Takuda, K. Mori, I. Masuda, Y. Abe, M. Matsuo, Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, No. 1, pp. 412-418, 2002.
- [6] Q. F. Chang, D. Y. Li, Y. H. Peng, X. Q. Zeng, Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 3, pp. 436-443, 2007.
- [7] G. Palumbo, L. Tricarico, Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, No. 1, pp. 115-123, 2007.