

بررسی ایجاد ضخامت یکنواخت در شکل دهی ابروموسان نیمکره از جنس Ti-6Al-4V

حمید عربی

استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، تهران، ایران

میلاذ انوری مهر

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، تهران، ایران

علی اکبر نامجو منش

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، تهران، ایران

مهرداد خاندانی

دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت، تهران، ایران

چکیده

مخازن سوخت کروی تولید شده توسط شکل دهی ابروموسان بعد از شکل دهی دچار تغییرات ضخامتی می شوند، به این صورت که ضخامت در نوک نیم کره به کمترین مقدار می رسد. کاهش ضخامت ورق در نوک نیم کره تا حدود 60 درصد ضخامت اولیه گزارش شده است. پدیده کاهش ضخامت یکی از مهم ترین عیوب مخازن تولید شده به این روش می باشد. در این پژوهش ابتدا شرایط بهینه برای شکل دهی ابروموسان دمشی آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از آزمون های کشش گرم تعیین شده است. بهترین دما 878 درجه سانتی گراد و بهترین نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه به دست آمد. در شرایط بهینه شکل دهی ابروموسان دمشی ورق از جنس Ti-6Al-4V اجرا شد. برای ایجاد ضخامت یکنواخت در پایان فرآیند شکل دهی از ورق با ضخامت اولیه متغیر استفاده شد. بدین صورت در لبه ها که تغییر شکل کمتری خواهند داشت ضخامت اولیه کمتر و در مرکز ورق که تغییر شکل بالایی تحمل می کند ضخامت بالاتر در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده با ورق با ضخامت یکنواخت مقایسه شد. شکل دهی در شرایط بهینه دما و نرخ کرنش و پروفیل ورق ماشینکاری شده منجر به دستیابی به نیم کره با ضخامت یکنواخت گردید. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که این روش میتواند به عنوان یک روش موثر جهت ایجاد ضخامت یکنواخت پس از شکل دهی باشد.

واژگان کلیدی: شکل دهی، ابروموسان، ضخامت یکنواخت، Ti-6Al-4V



مقدمه

ماهوره‌های ساخته شده تا به امروز معمولاً دارای سیستم کنترل واکنش و سیستم کنترل مداری هستند که هر دو به مخازن سوخت سبک و مخازن گاز تحت فشار نیاز دارند. این مخازن از طریق جوشکاری دو قسمت با ضخامت کم که دارای هندسه نیمه‌کروی یا مخروطی است، ساخته می‌شوند برای ساخت مخازن نیم کره سوخت با وزنی کم و دارای مقاومت در برابر نفوذ هیدروژن، که در سوخت ماهواره‌بر یافت می‌شود، بهترین گزینه استفاده از آلیاژهای تیتانیومی است (Sato, 2007).

همواره شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیومی در صنعت مسئله مورد بحثی بوده است. در شکل‌دهی ابرمومسان دما بالاتر از نصف دمای ذوب ماده و نرخ کرنش در بازه‌ای کمتر از 10^{-3} می‌باشد؛ که تحت این شرایط و همچنین در صورت ریز دانه بودن ساختار قابلیت تغییر شکل زیاد مواد قبل از شکست نهایی وجود دارد. این مواد هنگامی که به روش شکل‌دهی ابرمومسان تغییر شکل پیدا می‌کنند استحکامی به مراتب پایین‌تر از استحکام عادی در دمای محیط از خود نشان می‌دهند و از ظرفیت زیادی برای افزایش طول برخوردار هستند. یکی از روش‌هایی که به منظور شکل‌دهی آلیاژهای تیتانیومی مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از روش دمشی ابرمومسان می‌باشد (Barnes, 2007).

بک و همکاران (Beck, 2008) در گزارشی از مخازن ذخیره‌ساز هیدروژن در فضاپیماهای آریان 5، یک نمونه مخزن ساخته‌شده از جنس تیتانیوم Ti-6Al-4V با روش شکل‌دهی ابرمومسان را معرفی نموده‌اند. بیش از 100 عدد از این مخازن ساخته و بیش از 90 عدد از آن به مصارف فضایی رسیده است. این مخازن سوخت در دمای 900 الی 950 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش در بازه 10^{-5} الی 10^{-2} بر ثانیه بر روی ورق با ضخامت اولیه 1.6 میلی‌متر شکل‌دهی شد. کمترین مقدار ضخامت بعد از شکل‌دهی 0.9 میلی‌متر در نوک نیم‌کره و بیشترین ضخامت چسبیده به دیواره 1/3 میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

ساتو و همکاران (Sato, 2007) در تحقیقی با موضوع مخازن برای مصرف در سیستم‌های ماهواره‌ای، مخازن ساخته‌شده از روش ابرمومسان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور کاهش وزن مخزن و یکنواختی پروفیل ضخامت ورق بعد از شکل‌دهی، دو روش را پیشنهاد کردند. در روش اول ورق ابتدا مورد ماشینکاری قرار می‌گیرد و سپس شکل‌دهی می‌شود. در روش دوم ابتدا ورق شکل‌دهی می‌شود و سپس ماشینکاری می‌شود و به اندازه دلخواه می‌رسد. ساتو پس از بررسی‌های فراوان روش اول را برای شکل‌دهی مخزن‌های سوخت ماهواره‌بر مناسب‌تر و اقتصادی‌تر دانسته است. اینگلبریچ و همکاران (Ingelbrecht, 2016) شکل‌دهی نیم‌کره را برای ورق تیتانیومی Ti-6Al-4V بررسی نمودند. او آزمون نیم‌کره را بر روی ورق با ضخامت 3/3 میلی‌متر و در دمای 925 درجه سانتی‌گراد انجام داد. محقق دمای مذکور را برای دستیابی به بیشترین میزان ضریب حساسیت به نرخ کرنش (m) معرفی کرده است. در تحقیقی که توسط گیلیانو و همکاران (Giuliano, 2021) انجام گرفت، پروفیل ورقی با ضخامت متغیر طراحی و سپس بر روی ورق‌هایی از جنس آلومینیوم 2017 ماشینکاری شد. سپس این پروفیل ورق تحت شکل‌دهی ابرمومسان قرار گرفت. به نظر می‌رسد این روش می‌تواند روش مناسبی برای ایجاد پروفیل یکنواخت در شکل‌دهی ابرمومسان نیم‌کره‌های ابرمومسان باشد. از آنجا که این موضوع تا بحال در مورد آلیاژ Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار نگرفته است در پژوهش حاضر تاثیر استفاده از ورق با ضخامت غیر یکنواخت اولیه در ایجاد ضخامت یکنواخت پس از شکل‌دهی ابرمومسان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

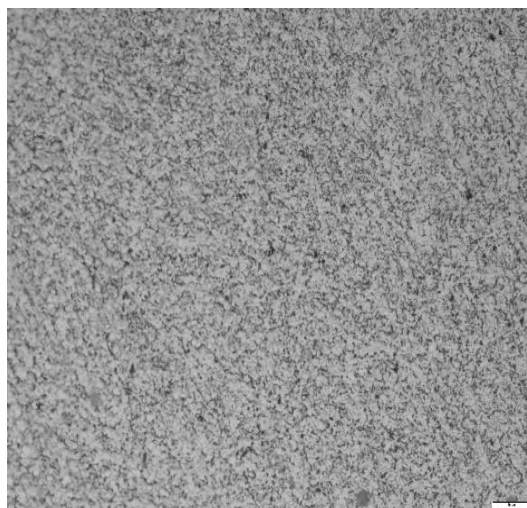
روش تحقیق

ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق تیتانیوم گرید 5 یا Ti-6Al-4V می‌باشد. مواد اولیه بر اساس استاندارد AMS 4928 خریداری شده است. ماده اولیه به صورت ورق با ضخامت 2 میلی‌متر بود. آنالیز شیمیایی این ماده در جدول 1 آورده شده است. نمونه‌های متالوگرافی به طور مرحله‌ای تا سنباده 3000 سنباده زنی شدند. بعد از سنباده زنی نمونه‌ها با محلول کروم شامل 85 % آب، 5 % اسید نیتریک و 10 % اسید هیدروفلوئوریک اچ شدند. تصویر متالوگرافی ریز ساختار این آلیاژ نیز در شکل 1 آورده شده است.

جدول 1- آنالیز شیمیایی آلیاژ Ti-6Al-4V مورد استفاده

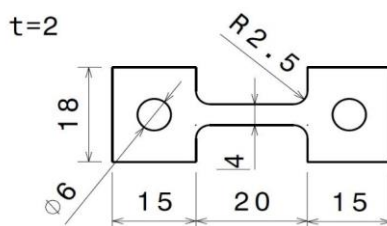


عنصر	Ti	Al	V	Fe	O	N	C	H	Others
حد بالا	Balance	6/75	4/5	0/4	0/06	0/05	0/08	0/015	Total
حد پایین	Balance	5/8	3/5	0/05	0/2	0/009	0/01	0/001	<0.4



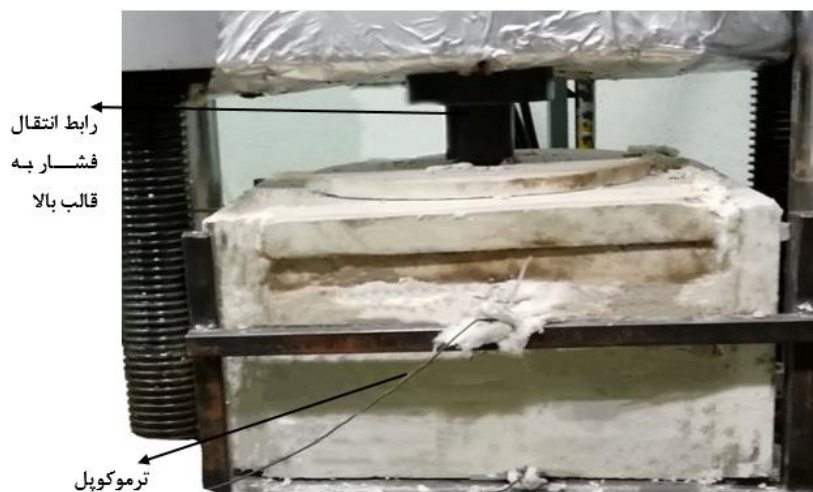
شکل ۱- ریز ساختار ماده اولیه در حالت آنیل کارخانه‌ای در بزرگنمایی‌های ۲۰۰ برابر.

در این تحقیق برای انجام آزمون‌های دما بالا از دستگاه کشش یونیورسال GOTECH LAS-100 استفاده شد. به دلیل دمای بالای آزمون‌های کشش در این آزمون‌ها از فک‌های کشش اینکونل ۷۱۸ استفاده شد. اتصال نمونه‌ها به فک‌های کشش به صورت پین بود. ابعاد نمونه‌های ساخته شده در شکل ۲ آورده شده است. آزمون‌هایی جهت بررسی حداکثر تغییر طول نمونه‌ها در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف انجام شد. این آزمون‌ها در دماهای ۸۵۰، ۸۷۵، ۹۰۰، ۹۲۵±۰ درجه سانتی‌گراد و در نرخ کرنش‌های 10^{-3} ، 5×10^{-3} ، 10^{-2} و 5×10^{-2} بر ثانیه انجام پذیرفت. این آزمون‌ها شرایط بهینه آزمون شکل دهی ابرمومسان نیمکره را مشخص می‌کند.



شکل ۲- نقشه نمونه آزمون کشش دما بالا

برای ساخت قالب‌های شکل دهی نیمکره به جای استفاده از بالک ماده از ورق استفاده شد. جنس قالب‌ها از فولاد نسوز ۳۱۰ بود. قالب‌ها از روش اسپینینگ به صورت نیمکره ساخته شدند. برای گرم کردن قالب‌ها از کوره المنتی ساخته شده استفاده گردید. جهت آب بند کردن دو کفه قالب از فشار پرس هیدرولیک و برای دمش از فشار گاز آرگون معمولی استفاده شد. چیدمان آزمون در شکل آورده شده است.



شکل 3- چیدمان آزمون شکل دهی نیمکره $Ti-6Al-4V$ از روش ابرمومسان

در این پژوهش طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ (RSM) توسط نرم افزار minitab2020 انجام گرفت. این آزمایش ها برای پیدا کردن بهترین دما و نرخ کرنش به منظور دستیابی به بیشترین افزایش طول طراحی شد. نرم افزار تعداد 9 عدد آزمایش با دو مرتبه تکرار را برای پیدا کردن شرایط بهینه پیشنهاد داد. این آزمایش ها شامل حالت های مختلف دما و نرخ کرنش می باشند که در جدول 2 آورده شده اند.

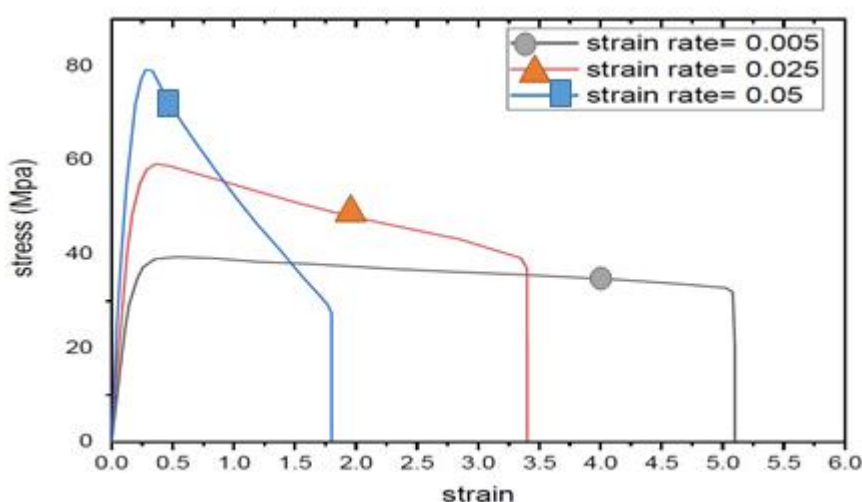
جدول 2- شرایط مختلف دما (سانتی گراد)، نرخ کرنش (بر ثانیه) بررسی شده در این پژوهش

Temp.	Strain Rate
875	0.0050
850	0.0275
900	0.0050
850	0.0500
900	0.0275
850	0.0050
900	0.0275
875	0.0500
875	0.0500
900	0.0050
900	0.0500
875	0.0050
900	0.0500
850	0.0050
850	0.0500
850	0.0275
875	0.0275
875	0.0275



بحث و نتایج

آزمون‌های کشش در دما و نرخ کرنش‌های مشخص شده در جدول 2 انجام شد. برای نمونه، نمودارهای بدست آمده در آزمون کشش در دمای 875 درجه سانتیگراد در نرخ کرنش‌های 0.05، 0.025 و 0.005 بر ثانیه در شکل 3 آورده شده است. تصویر نمونه‌ها پس از آزمون کشش در شکل 4 آورده شده است.

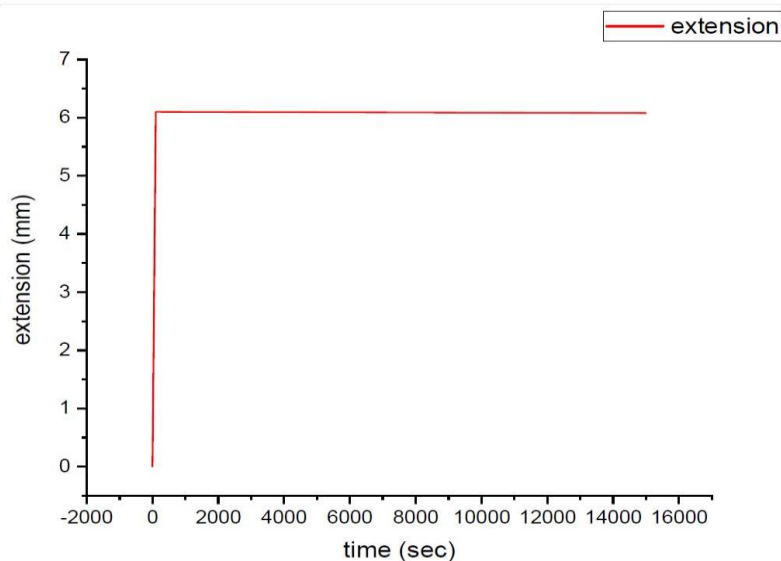


شکل 4- نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش در دمای 875 درجه سانتیگراد و نرخ کرنش‌های 0.005، 0.025 و 0.05 بر ثانیه.



شکل 5- تصویری از نمونه‌های آزمون کشش پس از اتمام فرآیند در دمای 875 درجه سانتیگراد در نرخ کرنش‌های 0.005، 0.025 و 0.05 بر ثانیه.

برای بررسی میزان مشارکت شکل دهی خزشی در میزان کل افزایش طول ایجاد شده، آزمون خزش مطابق استاندارد ASTM E139 و در دمای 878 درجه سانتیگراد انجام شد. نمودار افزایش طول بر حسب زمان در شکل 6 آورده شده است. نمودار شکل 6 از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به افزایش طول در اثر اعمال وزن و در محدوده الاستیک می‌باشد ولی قسمت دوم افزایش طول بر حسب مکانیزم‌های خزشی را نشان می‌دهد که این قسمت بسیار مهم است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که این نمونه در دمای 878 درجه سانتیگراد و به مدت 15000 ثانیه در اثر مکانیزم‌های خزشی به مقدار بسیار کمی افزایش طول دارد که این مقدار در مدت 15000 ثانیه عدد 0/02 میلی‌متر است. از این اعداد می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول نمونه از روش خزشی بسیار محدود بوده و به راحتی و دقتی بسیار بالا می‌توان از وارد کردن خواص خزشی در شکل‌دهی نمونه صرف نظر کرد.



شکل 6- نمودار افزایش طول بر حسب زمان برای نمونه Ti-6Al-4V مطابق استاندارد ASTM E139 و در دمای 878 درجه سانتی-گراد.

نتایج حاصل از آزمون‌های کشش گرم در جدول 3 آورده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های کشش گرم صورت گرفته به منظور رسیدن به بیشترین افزایش طول با روش پاسخ سطح بهینه سازی شدند.

جدول 3- نتایج حاصل از آزمون‌های کشش گرم وارد شده در نرم افزار Minitab

Temp.	Strain Rate	elongation
875	0.0050	99.65
850	0.0275	31.38
900	0.0050	69.18
850	0.0500	20.05
900	0.0275	38.26
850	0.0050	57.38
900	0.0275	39.88
875	0.0500	25.92
875	0.0500	32.49
900	0.0050	68.25
900	0.0500	25.51
875	0.0050	95.68
900	0.0500	20.25
850	0.0050	55.32
850	0.0500	19.34
850	0.0275	32.06
875	0.0275	65.45
875	0.0275	68.35



با استفاده از روش سطح پاسخ و رگرسیون خطی، صحت و دقت آزمایشات بررسی شد. مطابق شکل 7 مشاهده می شود که مقدار p-value برای دو فاکتور دما و نرخ کرنش کمتر از 0/1 هستند و این، میزان دقت بالای نتایج را نشان می دهد، همچنین با داشتن R-sq برابر 94/21 صحت بالای نتایج نیز نشان داده شده است.

Coded Coefficients

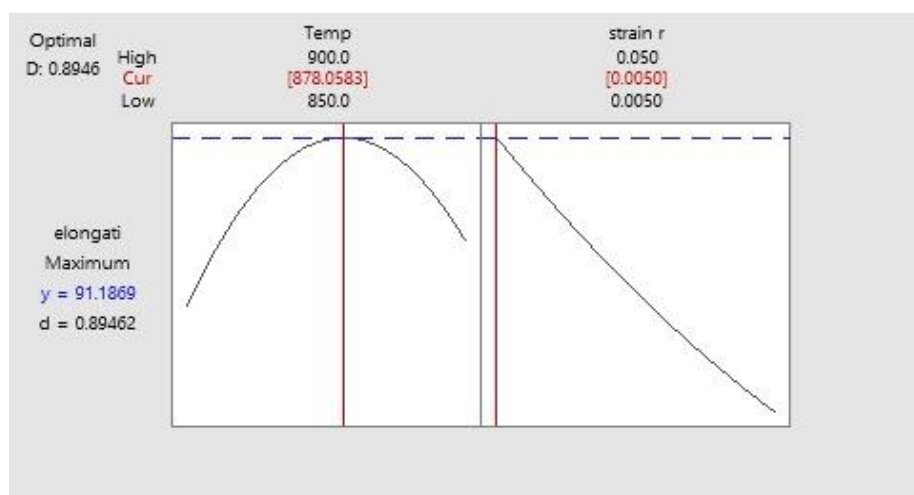
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	62.46	3.83	16.30	0.000	
Temp	3.82	2.10	1.82	0.094	1.00
strain rate	-25.16	2.10	-11.99	0.000	1.00
Temp*Temp	-24.85	3.64	-6.84	0.000	1.00
strain rate*strain rate	3.19	3.64	0.88	0.398	1.00
Temp*strain rate	-2.30	2.57	-0.89	0.389	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7.27024	94.21%	91.80%	87.36%

شکل 7- بررسی دقت و صحت نتایج آزمون های کشش گرم توسط نرم افزار Minitab.

جهت بهینه سازی و پیش بینی دما و نرخ کرنش بهینه توسط نرم افزار Minitab، از گزینه Response Optimization استفاده می شود. در این قسمت برای بیشترین افزایش طول، بهترین دما و نرخ کرنش توسط نرم افزار مشخص می شود. بعد از انتخاب این گزینه، نرم افزار به صورت خودکار نمودار پیش بینی دما و نرخ کرنش بهینه در حالت بیشترین افزایش طول را نشان می دهد.



شکل 8- نمودار پیش بینی بیشترین افزایش طول بر اساس پارامترهای دما و نرخ کرنش.

طبق شکل 8 مشاهده می شود که دمای بهینه به دست آمده، 878 درجه سانتی گراد و نرخ کرنش بهینه 0/005 بر ثانیه توسط نرم افزار می باشد. در شکل 9 نیز مقدار افزایش طول پیش بینی شده توسط نرم افزار بعد از انجام آزمون های تجربی در شرایط بهینه دما و نرخ کرنش نشان داده شده است که در این شرایط انتظار می رود نمونه بین 73/29 تا 109/08 میلی متر افزایش طول داشته باشد.



Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
Temp	878.058			
strain rate	0.005			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
elongation	91.19	3.82	(82.87, 99.51)	(73.29, 109.08)

شکل 9- پیش‌بینی افزایش طول نمونه آزمون کشش گرم در شرایط بهینه دما و نرخ کرنش.

با توجه به نتایج تحقیق گیلیانو و همکاران (Giuliano, 2021) برای یکنواخت شدن ضخامت در طول فرآیند شکل‌دهی ابرمومسان باید همواره ضریب حساسیت به نرخ کرنش بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد. برای نگه‌داشتن ضریب حساسیت به نرخ کرنش در بالاترین مقدار ممکن باید همواره شرایط شکل‌دهی در دما و نرخ کرنش بهینه تعیین شده در قسمت قبل قرار داشته باشند. به این منظور باید فشار گاز در طول فرآیند شکل‌دهی مدام تغییر کند تا نرخ کرنش در طول فرآیند ثابت باقی بماند. برای دستیابی به پروفیل فشار مناسب فرآیند شکل‌دهی ابرمومسان نیم‌کره در نرم‌افزار آباکوس مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی از الگوریتم کنترل فشار تعبیه شده در خود نرم‌افزار آباکوس به منظور نگه داشتن نرخ کرنش در مقداری معین استفاده شد. این الگوریتم فشار گاز را به گونه‌ای تغییر می‌دهد تا نرخ کرنش شکل‌دهی همواره در مقداری مشخص ثابت باقی بماند. در این الگوریتم پارامتر r از طریق رابطه 4-4 تعریف می‌شود.

$$r = \frac{\dot{\epsilon}_{max}}{\dot{\epsilon}_{tar}} \quad (4-4)$$

در این رابطه $\dot{\epsilon}_{max}$ مقدار بیشینه نرخ کرنش در حین تغییر شکل و $\dot{\epsilon}_{tar}$ مقدار مورد نرخ کرنش انتخاب شده یا نرخ کرنش هدف برای شبیه‌سازی است. اگر $0.2 \leq r \leq 3$ آنگاه حل در increment مورد تایید قرار خواهد گرفت.

$$\text{If } 0.2 \leq r \leq 0.5 \text{ then } P_{new} = 1.5P_{old} \quad (5-4)$$

$$\text{If } 0.5 \leq r \leq 0.8 \text{ then } P_{new} = 1.2P_{old} \quad (6-4)$$

$$\text{If } 0.8 \leq r \leq 1.5 \text{ then } P_{new} = P_{old} \quad (7-4)$$

$$\text{If } 1.5 \leq r \leq 3 \text{ then } P_{new} = 0.834P_{old} \quad (8-4)$$

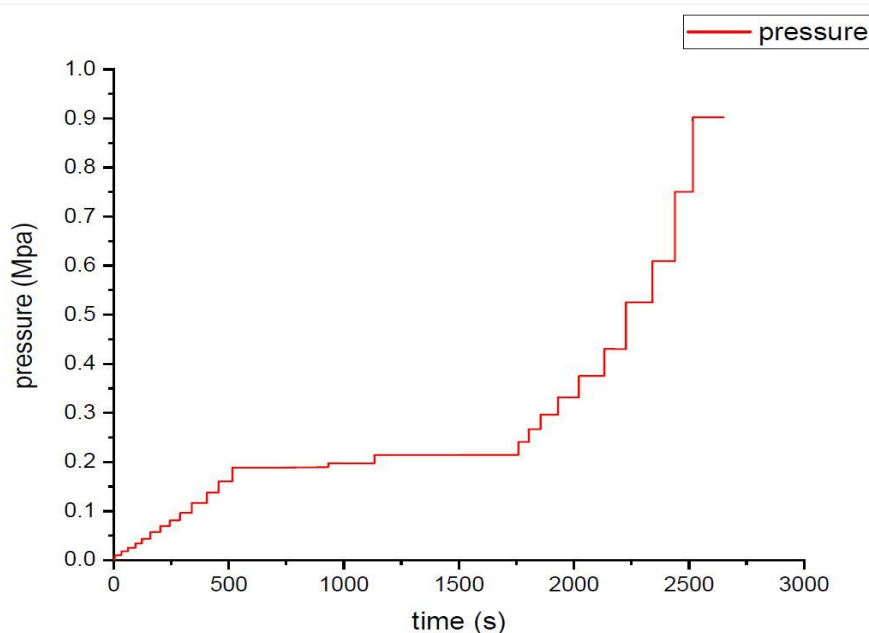
که در این رابطه‌ها P_{new} فشار جدید در increment بعدی و P_{old} فشار مورد استفاده در increment گذشته است.

همچنین اگر $r \leq 0.2$ یا $r > 3$ increment در حال اجرا متوقف می‌شود و دوباره با شرایط زیر شروع می‌شود.

$$\text{If } r < 0.2 \text{ then } P_{new} = 2P_{old} \quad (9-4)$$

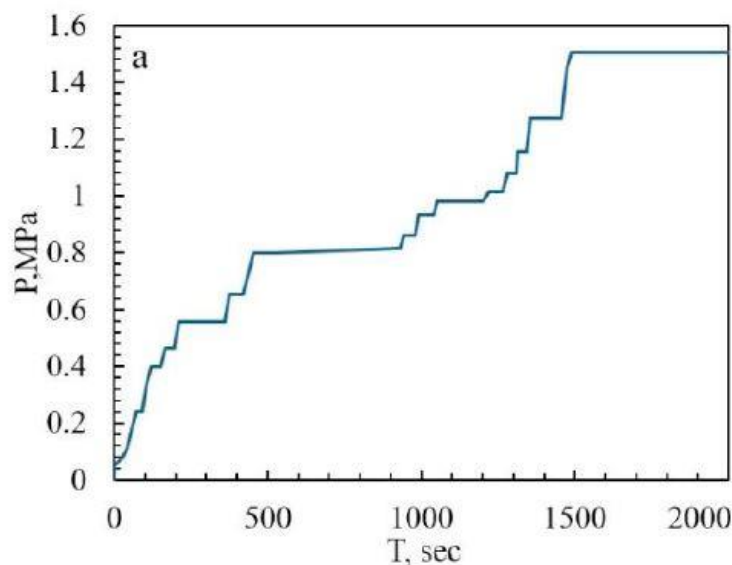
$$\text{If } r > 3 \text{ then } P_{new} = 0.5P_{old} \quad (10-4)$$

با اجرای این الگوریتم و پایان یافتن شبیه‌سازی شکل‌دهی نیم‌کره ابرمومسان پروفیل فشار-زمان برای حفظ نرخ کرنش در محدوده عدد مورد نظر به‌دست می‌آید. شکل 10 این نمودار فشار-زمان را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی زمان مورد نظر برای اتمام فرآیند شکل‌دهی 2547 ثانیه به‌دست آمد.



شکل 10- نمودار فشار-زمان شکل‌دهی نیم‌کره ابرمومسان Ti-6Al-4V در دمای 878 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه.

شکل 11 نمودار فشار زمان برای شکل‌دهی یک ورق Ti-6Al-4V را نشان می‌دهد که توسط زاخاریو^۱ و همکاران [34] به دست آمد. مطابق گفته‌های محقق این نمودار از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول که افزایش فشار شکل‌دهی به منظور حفظ شکل‌دهی با نرخ کرنش مشخص تا مقدار معینی می‌باشد و بخش دوم شامل افزایش ناگهانی فشار به منظور غلبه بر نیروی اصطکاک ناشی از تماس ورق و قالب است که وابستگی بسیار زیادی با ضریب اصطکاک بین ورق و قالب دارد.



شکل 11- نمودار فشار زمان به دست آمده توسط زاخاریو و همکاران به منظور شکل‌دهی ورق Ti-6Al-4V در دمای 825 درجه سانتی‌گراد [34].

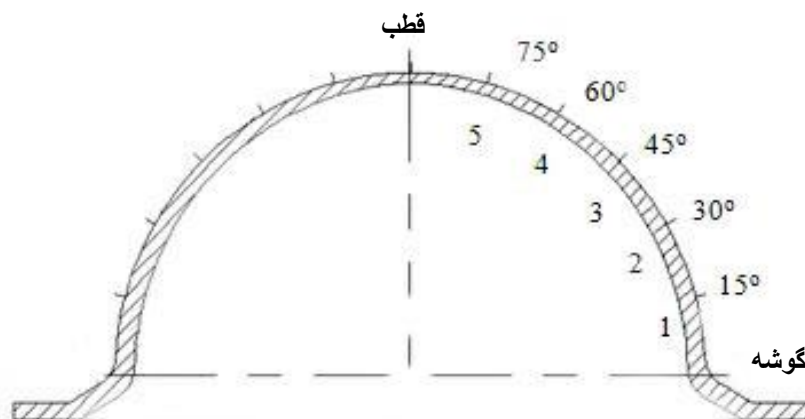
¹ Ivan zakhariev



جهت آزمون های تجربی ورق دایره ای شکل بریده شده، در شرایط بهینه بدست آمده (دمای 878 درجه سانتی گراد و نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه) مطابق با نمودار فشار-زمان شکل 11 شکل دهی شد. فرآیند شکل دهی 2620 ثانیه به طول انجامید. با انجام این آزمون و مقایسه مدت زمان شکل دهی بر اساس نتایج شبیه سازی و نتایج عملی 2/7 درصد خطا برای این شبیه سازی محاسبه شد. پس از شکل دهی، ورق و قالب در کوره خنک شدند، سپس ورق از کوره بیرون آورده شد. شکل 12 تصویر نیم کره شکل دهی شده به این روش را نشان می دهد. پس از شکل دهی و ثبت مستندهای لازم نیم کره ابرمومسان با دستگاه وایرکات به صورت شکل 13 برش داده شد تا پروفیل ضخامت آن به صورت کاملاً دقیق توسط ضخامت سنج اندازه گیری شود.



شکل 12- تصویری از نیم کره شکل دهی شده دمای 878 درجه سانتی گراد و نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه پروفیل ضخامتی نیم کره ابرمومسان توسط ضخامت سنج در هفت نقطه مطابق شکل 14 اندازه گیری شد. نتایج این اندازه گیری در جدول 4 آورده شده است.



شکل 13- تقسیم بندی شماتیک نیم کره برای سنجش ضخامت توسط ضخامت سنج.

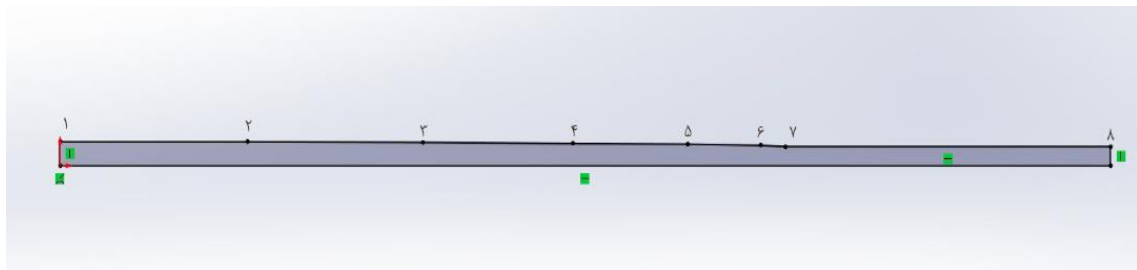
جدول 4- ضخامت های اندازه گیری شده در مقیاس میلی متر در نقاط مشخص شده در شکل 13

نقاط	گوشه	نقطه یک	نقطه دو	نقطه سه	نقطه چهار	نقطه پنج	قطب
ضخامت ورق	1.50	1.40	1.30	1.25	1.15	1.10	1.10
تغییرات ضخامت	0.5	0.6	0.7	0.75	0.85	0.9	0.9



همانطور که در جدول 4 نشان داده شد، ضخامت در قطب نیم کره کمترین مقدار را دارد و این نقطه بر حسب اندازه گیری انجام شده حدود 55 درصد کاهش ضخامت را تجربه کرده است، همچنین اگر از قطب به سمت گوشه های نیم کره حرکت کنیم بر مقدار ضخامت افزوده می شود.

برای به دست آوردن بهترین پروفیل ورق اولیه مطابق جدول 4 کمترین ضخامت به دست آمده در شکل دهی نیم کره ابرومسان در شرایط بهینه، بیشترین ضخامت در ورق اولیه در نظر گرفته شد. سپس مقدار کاهش ضخامت روی نیم کره مذکور از پروفیل ضخامت اولیه ورق کم می شود. به این ترتیب ورقی با پروفیل ضخامتی مانند شکل 14 به دست آمد. ضخامت ورق در نقاط مشخص شده، در جدول 5 آورده شده است.



شکل 14- پروفیل ضخامتی ورق اولیه برای شکل دهی ابرومسان در نرم افزار سالیدورکس.

جدول 5- مختصات مربوط به نقاط 1 تا 7 بر حسب میلی متر

شماره نقاط	1	2	3	4	5	6	7	8
مختصات x	0	18/75	36/25	51/25	62/75	70/00	72/50	105//00
مختصات y	2/00	2/00	1/95	1/85	1/80	1/70	1/60	1/60

این نمونه ابتدا با هندسه دایره و قطر 26 سانتی متر توسط ماشین واتر جت تهیه و سپس با ماشین فرز CNC پروفیل شکل 14 بر روی ورق اولیه Ti-6Al-4V با ضخامت 2 میلی متر ماشینکاری شد. شکل 15 نمایی از ورق بعد از ماشینکاری را نشان می دهد.

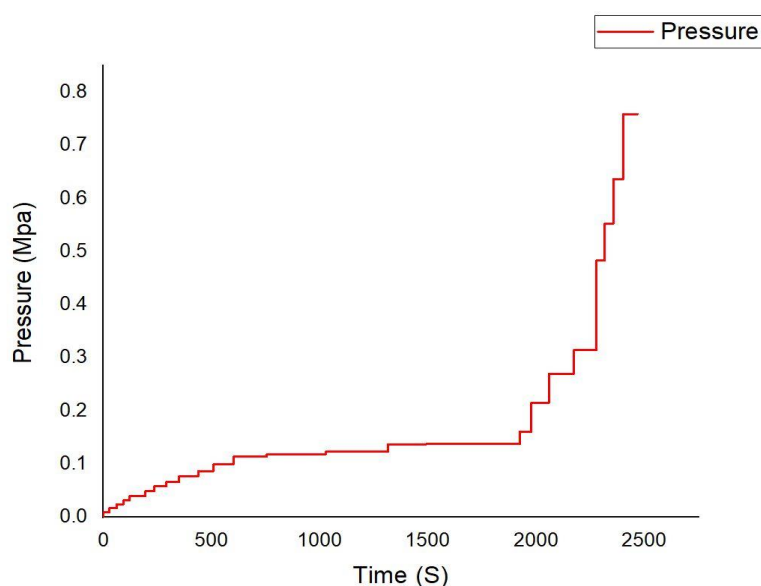


شکل 15- ورق ماشینکاری شده با پروفیل ضخامت متغیر

برای شکل دهی این ورق اولیه با ضخامت متغیر نمی توان از نمودار فشار-زمان به دست آمده در شکل 10 استفاده نمود، چرا که آن نمودار برای حفظ نرخ کرنش در ورق اولیه با ضخامت ثابت 2 میلی متر توسط نرم افزار آباکوس محاسبه شده است. به این



منظور مجدداً باید ورق اولیه با ضخامت متغیر در نرم‌افزار آباکوس مدل شود و سپس با انجام شکل‌دهی ابرمومسان در شرایط بهینه دما و نرخ کرنش نمودار فشار-زمان مناسب به منظور حفظ نرخ کرنش در محدوده بهینه به‌دست بیاید. شکل 16 نمودار فشار-زمان مخصوص ورق اولیه با این پروفیل ضخامتی متغیر برای شکل‌دهی در دما 878 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود زمان انجام فرآیند شبیه سازی 2301 ثانیه به‌دست آمد که نسبت به حالتی که ضخامت ورق ثابت است به مقدار 246 ثانیه کاهش یافته است که موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و همچنین افزایش بهره‌وری در تولید خواهد شد. با مقایسه دقیق شکل 10 و 16 نیز می‌توان دریافت که فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.



شکل 16- نمودار فشار-زمان ورق با ضخامت متغیر برای شکل‌دهی نیم‌کره ابرمومسان در دما 878 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/005.

مطابق با پروفیل فشار بدست آمده، شکل‌دهی ورق با ضخامت متغیر در شرایط بهینه دما و نرخ کرنش انجام شد، در حین آزمون دما با دقت 2 درجه سانتی‌گراد در محدوده 878 درجه سانتی‌گراد حفظ شد و از پروفیل فشار شکل 16 ایجاد شده توسط گاز بی اثر آرگون استفاده شد. ورق با ضخامت متغیر در مدت زمان 2391 ثانیه انجام شد. شکل 17 نیم‌کره شکل‌دهی شده در این شرایط را نشان می‌دهد. این نیم‌کره توسط ماشین وایرکات از وسط به دو نیم تقسیم شد تا پروفیل ضخامتی آن کامل و با دقت بالایی سنجیده شود. شکل 18 نمایی از نیم‌کره برشکاری شده را نشان می‌دهد.





شکل 17- نمایی از نیم کره شکل گرفته از ورق با ضخامت متغیر.



شکل 18- نمایی از پروفیل یکنواخت ضخامتی نیم کره شکل دهی شده.

پروفیل ضخامتی فوق توسط دستگاه ضخامت سنج مطابق شکل 13 اندازه گیری شد. نتایج این اندازه گیری در جدول 6 آورده شده است. از این نتایج کاملاً مشهود است که ضخامت پروفیل نیم کره با دقت 0/01 میلی متر کاملاً یکنواخت شده است.

جدول 6- ضخامت‌های اندازه گیری شده در مقیاس میلی متر در نقاط مشخص شده در شکل 14

نقاط	گوشه	نقطه یک	نقطه دو	نقطه سه	نقطه چهار	نقطه پنج	قطب
ضخامت ورق	1/11	1/11	1/12	1/12	1/11	1/11	1/11
تغییرات ضخامت	0/89	0/89	0/88	0/88	0/89	0/89	0/89

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد می‌توان با تهیه ورق با ضخامت متغیر اولیه به ضخامت کاملاً یکنواخت در تمام نیم کره Ti-6Al-4V شکل داده شده دست یافت.



نتیجه گیری

- 1- با توجه به آزمون‌های کشش گرم انجام شده بیشترین افزایش طول برای آلیاژ Ti-6Al-4V در بازه نرخ کرنشی 0/005 تا 0/05 بر ثانیه و بازه دمایی 800 تا 900 درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد.
- 2- با توجه به آزمون‌های کشش گرم انجام شده و بهینه‌سازی از روش RSM بیشترین افزایش طول در بازه نرخ کرنش 0/005 تا 0/05 بر ثانیه و محدوده دمایی 800 تا 900 درجه سانتی‌گراد؛ مربوط به دمای 878 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/005 می‌باشد.
- 3- بر طبق آزمون‌های کشش گرم بیشترین مقدار افزایش طول برای این آلیاژ در دمای 878 درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش 0/005 بر ثانیه مقدار 600 درصد به دست آمد.
- 4- استفاده از پیش‌فرم ورق با ضخامت متغیر استفاده شده در شکل دهی ابرمومسان آلیاژ Ti-6Al-4V می‌تواند ضخامت نهایی یکنواخت ایجاد کند.



- منابع

- E. Sato et al., (2007) "Superplastic Titanium Tanks for Propulsion System of Satellites," vol. 552, pp. 43-48,
- Barnes, A., (2007), Superplastic Forming 40 Years and Still Growing, Journal of Materials Engineering Performance, Vol. 16, No. 4, pp. 440-453.
- W. Beck, L. Duong, and H. Rogall, (2008) "Titan 6 – 4 hemispheres for SCA system of ariane 5," no. 4, pp. 293-297
- E. Sato et al., (2007) "Superplastic Titanium Tanks for Propulsion System of Satellites," Mater. Sci. Forum, vol. 551-552, pp. 43-48
- C. D. Ingelbrecht, (2016) "r-values of Ti-6Al-4V sheet after superplastic strain Ti-6Al-4V sheet after superplastic strain," vol. 0836, no. April
- G. Giuliano and W. Polini, (2021) "Optimal design of blank thickness in superplastic AZ31 alloy to decrease forming time and product weight," Int. J. Adv. Manuf. Technol., no. 0123456789

Investigating the creation of uniform thickness in the forming of hemispherical superplastic forming of Ti-6Al-4V

Hamid ArabiError! Bookmark not defined.

Assistance professor, Faculty of Material and
Manufacturing Technologies, Malek Ashtar
University of technology

Milad Anvari Mehr

Masters student, Faculty of Material and
Manufacturing Technologies, Malek Ashtar
University of technology

Ali Akbar namjoomanesh

Masters student, Faculty of Material and
Manufacturing Technologies, Malek Ashtar
University of technology

Mehrdad Khandani

Associate Professor, Faculty of Material and
Manufacturing Technologies, Malek Ashtar
University of technology

Abstract

Spherical fuel tanks produced by superplastic forming undergo thickness changes after forming, in such a way that the thickness reaches the lowest value at the tip of the hemisphere. A decrease in the thickness of the sheet at the tip of the hemisphere has been reported to about 60% of the initial thickness. The phenomenon of thickness reduction is one of the most important defects of tanks produced by this method. In this research, firstly, the optimal conditions for forming superplastic Ti-6Al-4V alloy have been determined using hot tensile tests. The best temperature was 878°C and the best strain rate was 0.005/s. In optimal conditions, superplastic blow molding of Ti-6Al-4V sheets was performed. To create a uniform thickness at the end of the forming process, a sheet with a variable initial thickness was used. In this way, the initial thickness was lower at the edges, which will have less deformation, and a higher thickness was considered in the center of the sheet, which tolerates higher deformation. The obtained results were compared with the sheet with uniform thickness. Forming in optimal conditions of temperature and strain rate and machined sheet profile resulted in obtaining a hemisphere with uniform thickness. The obtained results indicate that this method can be an effective method to create uniform thickness after forming.

Keywords: Forming, Superplastic, uniform thickness, Ti-6Al-4V