



## بررسی خواص مکانیکی قطعات گردنده وسیله پرنده با آلیاژ T6-2014 در اثر جایگزینی پوشش با روش پاشش حرارتی

حمیدرضا تفرشی<sup>۱</sup>، مرتضی احمدی، شهرام باقری، عمران کریمی زرنندی، محمد حسینی

تهران، شرکت پشتیبانی و نوسازی بالگردهای ایران

### چکیده:

با توجه به استفاده از آلیاژهای آلومینیومی در قطعات وسایل پرنده و نیاز مبرم آنها به مقاومت در برابر عوامل مستهلک کننده مانند پدیده ی سایش مطالعات بسیاری برای استفاده از پوشش های نوین به منظور افزایش مقاومت و ضریب ایمنی استفاده از این قطعات شده است. در این مقاله سعی بر حصول اطمینان از جایگزینی پوشش آندایز سخت با پوشش کاربید تنگستن کبالت به روش پاشش حرارتی شده است. پیش از جایگزینی پوشش شروع به تحلیل نرم افزاری شده است. بعد از آن، با استفاده از تست های هدایت الکتریکی و سختی سنجی سعی در اطمینان از عدم تغییر ماهیت فلز پایه قطعه شده است. با انجام تست های پروازی و زمینی طبق استاندارد های هوایی صحت و سلامت قطعه مورد تایید قرار گرفته است.

**کلید واژه:** سایش، نرم افزار، کاربید تنگستن، پاشش حرارتی، آندایز سخت، هدایت الکتریکی.

## ۱- مقدمه:

آلیاژ AL 2014-T6 بدلیل خواص مکانیکی خوب و چگالی کم از آلیاژهای پرکاربرد در صنعت ساخت وسایل پرنده می باشد. استفاده از این آلیاژ در قطعات گردنده وسایل پرنده نیاز به مقاومت به سایش بالایی را میطلبد. بدین منظور اعمال پوشش آندایز سخت بعنوان راهکاری از دیر باز مورد استفاده قرار می گیرد. وجود پارهای زیاد و شرایط بحرانی و عدم توانایی پوشش آندایز سخت برای تحمل این شرایط، استفاده از پوشش های سخت یا روش پاشش حرارتی را به عنوان جایگزین مد نظر قرار می دهد [۱]. فرآیند پاشش حرارتی به عنوان فرآیندی نوین توسط شرکت های هوایی مورد استفاده قرار میگیرد. فرآیند HVOF فرآیندی است که در آن از ترکیب اکسیژن و یک سوخت مایع یا گاز به همراه یک گاز حامل مانند نیتروژن یا هیدروژن استفاده میشود. این مخلوط توسط یک چرکه منفجر شده و گاز حامل، پودر تغذیه شده به داخل محفظه را با سرعتی بیش از سرعت صوت به سطح قطعه پرتاب میکند [۲]. مزایای دیگر این روش عبارتند از: انتقال حرارت کم به قطعه، تخلخل بسیار پایین و مقاومت به خوردگی بالا، صافی سطح و استحکام چسبندگی بالا (۶۰ مگاپاسکال). این روش کاربردهای بسیار بالایی در صنایع مختلف دارد مانند قطعات موتور هواپیما، انواع محورها، قطعات در معرض خوردگی و فرسایش در دمای بالا مانند یویلرها و کمپرسورها [۳]. به منظور تعمیر و نگهداری و بازسازی قطعات وسیله پرنده با استفاده از این روش نیازمند بررسی عدم تغییر ماهیت قطعات هستیم. بدلیل الزامات استحکامی خاص برای قطعات هوایی، عدم تاثیرگذاری فرآیند پر روی خواص مکانیکی قطعه مذکور بسیار حایز اهمیت می باشد. بدین منظور تست های گوناگونی برای کنترل عدم تغییر ماهیت قطعه بعد از پوشش برداری و پوشش دهی انجام گرفت که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق:

در این تحقیق سعی شد که از قطعه اصلی وسیله پرنده استفاده شود. قطعه اصلی از جنس آلومینیوم 2014-T6 و فورج شده با پوشش آندایز سخت بود. ترکیب شیمیایی و خواص آلیاژ این قطعه از جنس AL 2014-T6 در جدول های ۱ و ۲ آمده است [۴]. خواص مکانیکی پوشش سرمت استفاده شده برای ارائه به نرم افزار برای انجام محاسبات در جدول ۳ آماده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2014-T6

ترکیب شیمیایی	AL	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	other
درصد وزنی	bal	3.9-5.0	0.20-0.8	0.4-1.2	0.50-1.2	0.7	0.1	0.25	0.15	0.15

جدول ۲) خواص مکانیکی آلومینیوم 2014-T6

73 GPa	E
0.3	$\nu$
415 MPa	$\sigma_y$
485 MPa	$\sigma_{UTS}$

جدول ۳) خواص مکانیکی پوشش سرمت

399.89 GPa	E
0.27	$\nu$
70 MPa	استحکام اتصال

ابتدا ابعاد و اندازه های قطعه اندازه گیری شد و بعد با استفاده از محلول الکتروشیمیایی با ترکیب دی کرومات سدیم و اسید سولفوریک و مابقی آب در دمای  $150^\circ\text{F}$  پوشش آندایز سخت آن برداشته شد. بعد از پوشش برداری ابعاد

اصلی قطعه اندازه گیری شد. با استفاده از روش پاشش حرارتی و پودر سرامت قطعه پوشش دهی شد. برای پوشش دهی از دستگاه Tafa JP 5000 استفاده شد. برای رسیدن به ابعاد اصلی خواسته شده در نقشه، قطعه تحت عملیات سنگ زنی قرار گرفت. علاوه بر تست های میدانی و صنعتی که در ادامه خواهد آمد برای بررسی قطعه از تست هدایت الکتریکی استفاده شد. همچنین تست سختی سنجی بر روی زیر لایه پوشش انجام گرفت. برای مشاهده ی پوشش و زیر لایه از میکروسکوپ نوری استفاده شد. قطعه مورد نظر بعد از پوشش برداری و پوشش دهی با استفاده از نرم افزار CATIA مدل شد و با استفاده از نرم افزار آنالیز تنش مورد ارزیابی تحلیل تنش قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث:

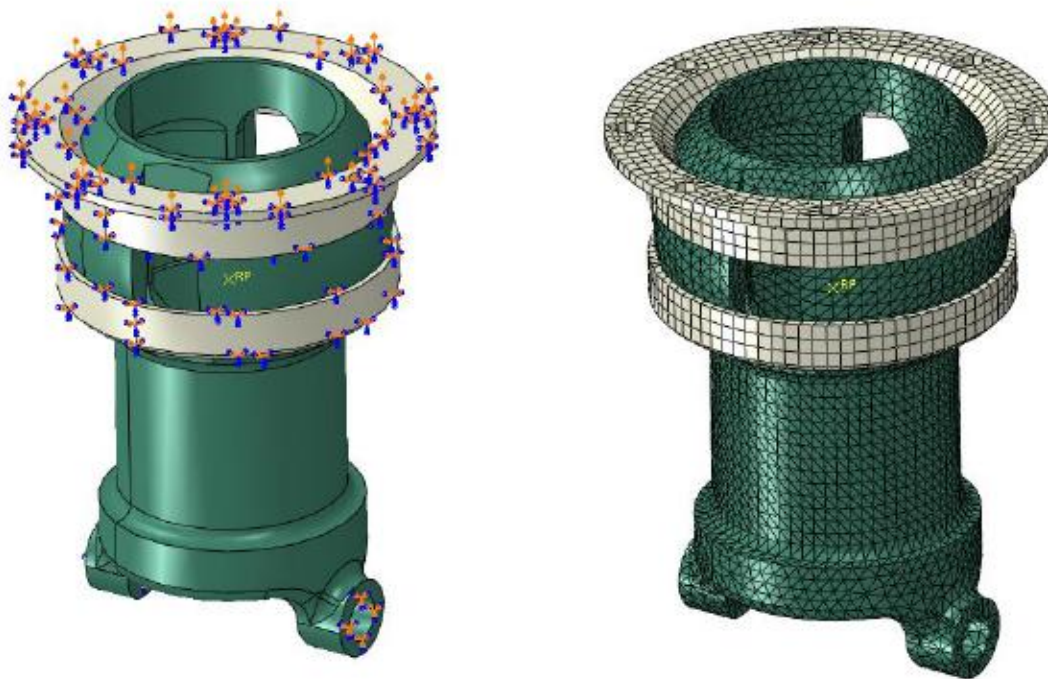
انجام عملیات پوشش دهی و جلوگیری از آسیب رسیدن به قطعات اصلی تعمیراتی وسایل پرنده که پوشش های آندایز سخت آن تحت شرایط بحرانی کاری دچار سایش شده بود، نیازمند به حصول اطمینان از حفظ خواص مکانیکی و انجام آزمایشات کنترلی می باشد. دلیل عدم استفاده از پوشش مجدد آندایز سخت، ضعف آن در برابر سایش های شدید، ایجاد تنش کششی بر روی قطعه و عدم توانایی آن برای بازیابی ابعاد اصلی قطعه طبق نقشه های مهندسی می باشد. پیش از هرکاری برای درک درست از تاثیر پوشش، اقدام به تحلیل نرم افزاری کردیم. به منظور بررسی تاثیر پوشش برداری و پوشش دهی بر روی قطعه اصلی بعد از مدل کردن قطعه با نرم افزار Catia، با نرم افزار abaqus قطعه تحت بارگذاری شبیه سازی شده، قرار گرفت. همانطور که در منابع ذکر شده است، با پوشش برداری آندایز سخت، قسمتی از ضخامت پوشش که درون قطعه نفوذ کرده است از بین می رود و از ضخامت قطعه کاسته میشود. هدف از شبیه سازی توسط نرم افزار، بررسی میزان اعوجاج قطعه در اثر کاسته شدن ضخامت و پوشش دهی با روش جدید می باشد برای بررسی تاثیر پوشش جدید بر روی خواص استحکامی قطعه منتخب، ابتدا نیازمند به دانستن نیروهای وارده بر قطعه بودیم. قطعه گردنده بدلیل نوع بارهای کششی و پیچشی که بر روی آن وارد میشود قطعه بسیار بحرانی می باشد. با انجام تست های زمینی مخصوص قطعات گردنده وسیله پرنده و اعمال گشتاور ذکر شده در استاندارد، با استفاده از دستگاه مخصوص اعمال نیرو بر روی این قطعات، نوع بارها برای ارائه به نرم افزار را بدست آوردیم. در ادامه قطعه طوری با نرم افزار Catia طراحی شد که در راستای شعاع به اندازه  $1/004 \text{ in}$  باربرداری شده است. این مقدار همان میزان پوشش برداری برای اعمال پوشش جدید می باشد.

### ۳-۱ مدل سازی بدون پوشش

بدلیل بالا بودن حجم محاسبات و سطوح مابین قطعات ترجیح داده شده یا توجه به شرایط مرزی و نحوه اعمال بار مدل به صورت شکل مدل سازی گردد. در این شکل نحوه المان بندی نمایش مجموعه نیز نمایش داده شده است. برای قطعه sleeve از ۵۱۵۵۲ نود و ۲۹۸۷۹ المان از نوع C3D10 تشکیل شده است. قطعه متصل به sleeve به صورت rigid انتخاب شده است. این قطعه نیز دارای ۲۹۹۸ المان می باشد.

### ۳-۲ مدل سازی با پوشش

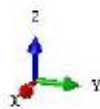
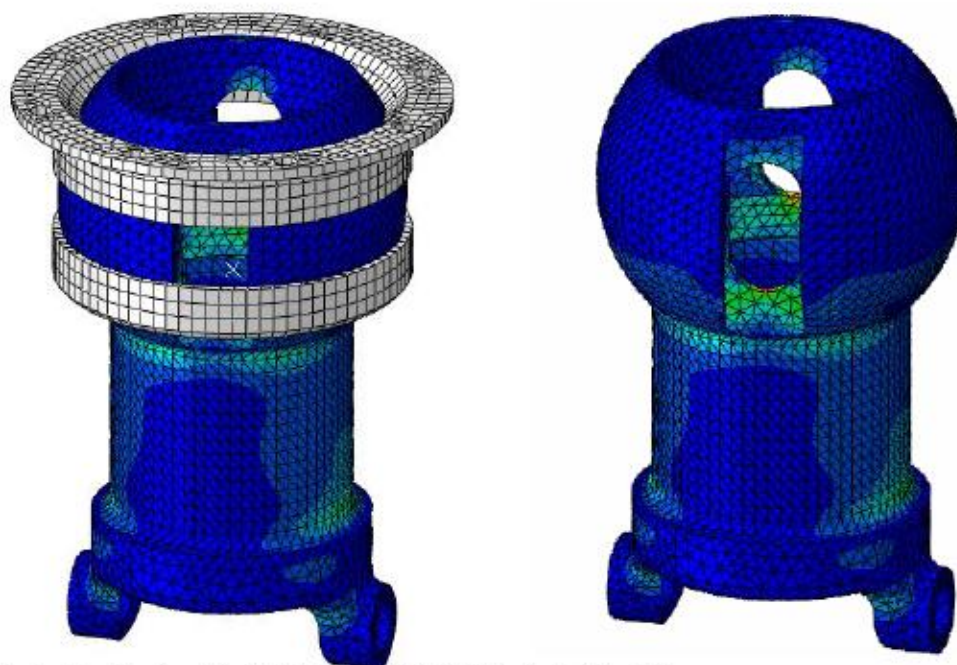
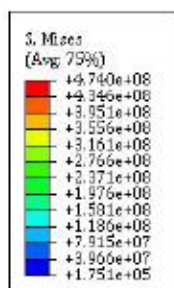
برای بررسی تغییرات استحکامی ایجاد شده یک لایه پوشش به ضخامت ۱۱۰ میکرون، بعد از کاهش ضخامت سطح به اندازه ضخامت لایه پوشش به سطح کروی sleeve اضافه گردید. جهت اتصال پوشش به قطعه از قید tie استفاده شده است. نحوه اعمال بار نیز مطابق با حالت بدون پوشش انجام شده است. سطوح تماس دو قطعه نیز بدلیل ایجاد لایه پوشش تغییر داده شده است.



شکل ۱ المان بندی، شرایط مرزی و نحوه اعمال بار

### ۳-۳ نتایج اعمال نیروی کششی بدون پوشش

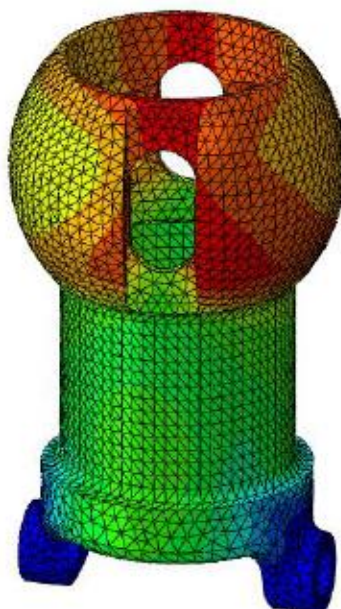
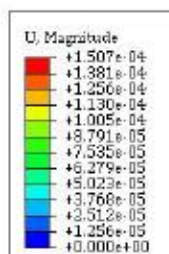
برای اطمینان از انتخاب مناسب اندازه المان‌ها همگرایی نتایج با توجه به اندازه المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل کانتور تغییرات تنش نمایش داده شده است همان طور که مشاهده می‌گردد در قسمت شیار دار محدوده کروی قطعه بیشترین تنش بدست آمده است. در شکل کانتور جابجایی قطعه تحت بارگذاری نمایش داده شده است. مقدار جابجایی هم در قسمت دارای شیار بیشتر می‌باشد.



ODB: without\_casting.odb Abaqus/Standard 6.13.1 Tue Jan 27 09:01:21 Iran Standard Time 2015

Step: Step 1  
 Increment 5: Step Time = 0.5000  
 Primary Var: S, Mises  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

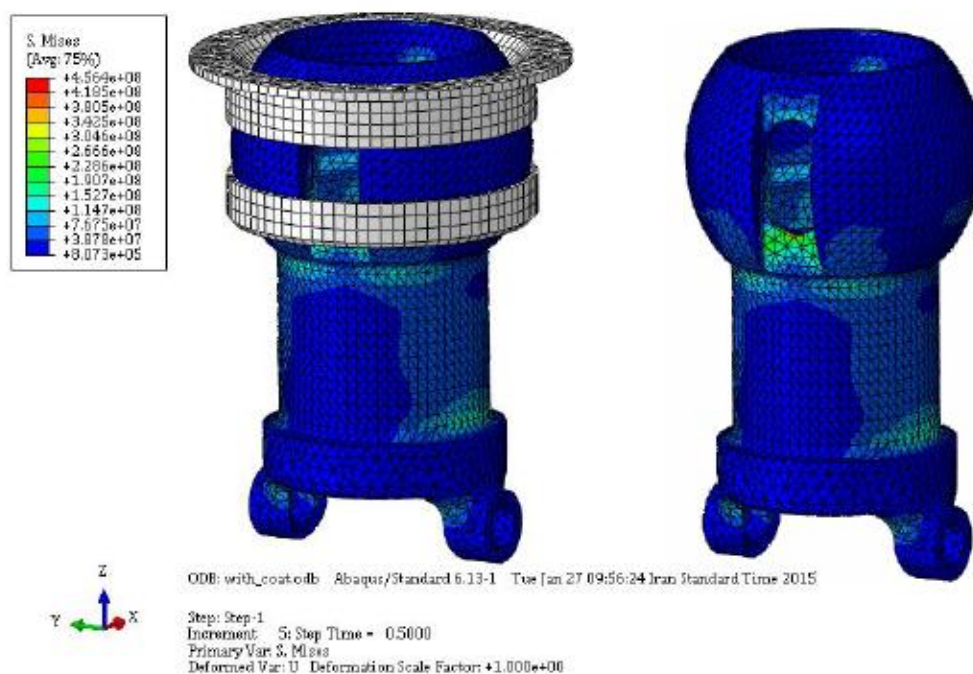
شکل ۲ کانتور تغییرات تنش



شکل ۳ کانتور تغییرات جابجایی

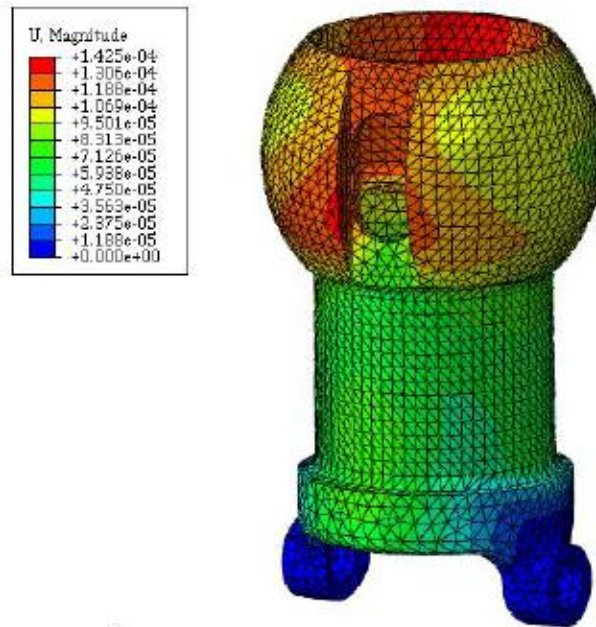
## ۴-۳ نتایج اعمال نیروی کششی با پوشش

جهت مقایسه نمونه بدون پوشش و با پوشش در همان شرایط اعمال بار کانتور تنش بدست آورده شده است که در شکل نمایش داده شده است. با مقایسه بیشینه تنش در دو حالت با و بدون پوشش مشاهده می‌گردد مقدار بیشینه تنش در حالت با پوشش مقدار کمی در حدود ۴ درصد کاهش پیدا کرده است و این امر هم می‌تواند بدلیل اضافه شدن پوشش یا مدول الاستیک بیشتر از آلومینیوم باشد



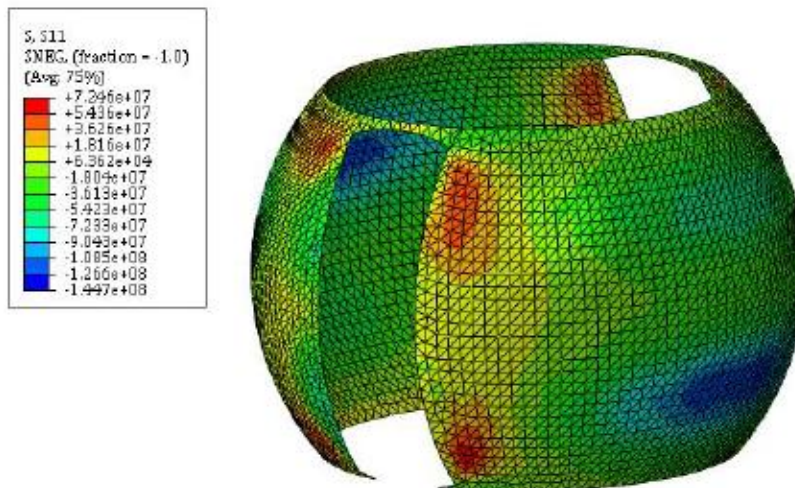
شکل ۴ کانتور تنش قطعه با پوشش

علاوه بر کانتور تغییرات تنش، کانتور تغییرات جابجایی نیز در حالت با و بدون پوشش مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل کانتور تغییرات جابجایی قطعه با پوشش نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد مقدار بیشینه جابجایی در حالت با پوشش حدود ۵ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵- کانتور تنش قطعه با پوشش

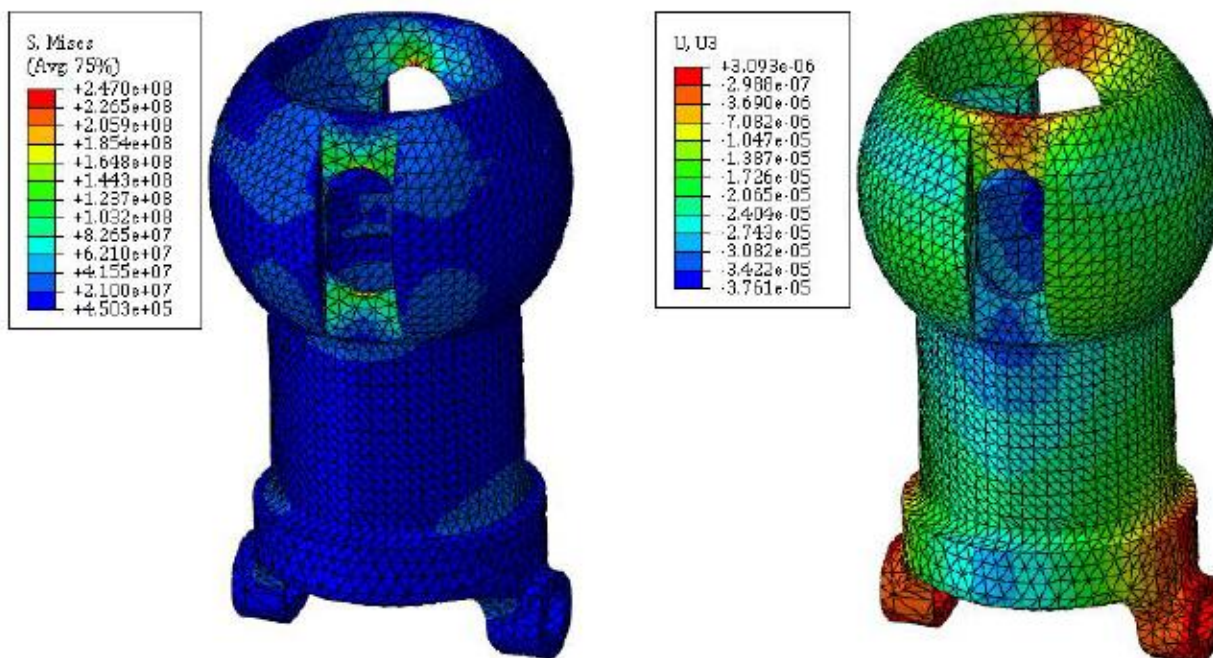
پارگذاری برای هر دو حالت به گونه‌ای اعمال گردیده است که تنش بیشینه در پوشش در حدود مقدار بیشینه تعریف شده باشد. در شکل کانتور تغییرات تنش در پوشش نمایش داده شده است.



شکل ۶- کانتور تنش در پوشش

### ۳-۵ نتایج اعمال نیروی فشاری بدون پوشش

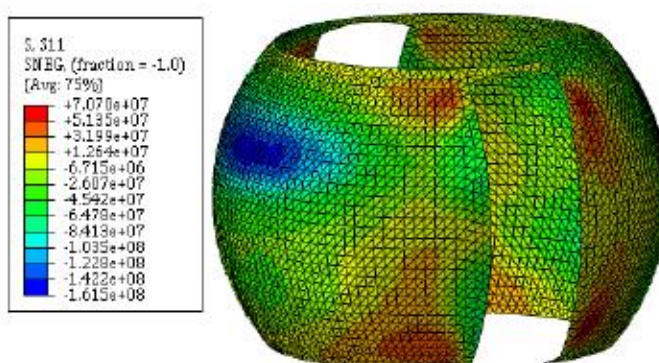
برای ارزیابی تغییر خواص مکانیکی در حالت با و بدون پوشش قطعه sleeve تحت پارگذاری فشاری نیز مورد بررسی قرار گرفت که کانتور تنش و جابجایی تحت این نوع پارگذاری در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ کانتور تنش و جابجایی تحت بارگذاری فشاری

### ۳-۶ نتایج اعمال نیروی فشاری با پوشش

با مقایسه نتایج قطعه تحت بارگذاری فشاری برای حالت با و بدون پوشش ملاحظه می‌گردد اختلاف بین بیشینه تنش در دو حالت در حالتی که تنش در لایه پوشش کم‌تر از مقدار جدایش باشد حدود ۴ درصد می‌باشد و مانند حالت بارگذاری کششی تنش قطعه با پوشش کم‌تر از بدون پوشش می‌باشد. در شکل ۲ کانتور تنش در پوشش در حالت بارگذاری فشاری نمایش داده شده است.



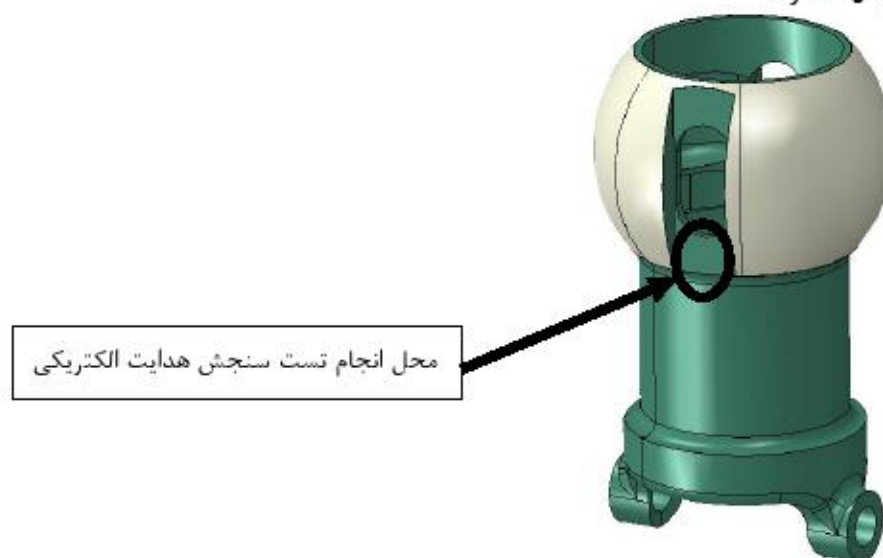
شکل ۲ کانتور تنش در پوشش تحت بارگذاری فشاری



## ۴- بررسی های دستگاهی:

## ۴-۱ هدایت الکتریکی:

بعد از انجام آنالیزهای نرم افزاری، نمونه اصلی با پوشش اندایز سخت مورد آزمایش هدایت الکتریکی قرار گرفت. میزان هدایت الکتریکی برای این قطعه که دارای پوشش اندایز سخت می باشد حدود  $40\%/IACS$  بود. بعد از پوشش برداری، پوشش دهی با فرآیند HVOF و انجام عملیات سنگ زنی قطعه جدید نیز تحت انجام تست هدایت الکتریکی قرار گرفت، میزان هدایت الکتریکی برای این قطعه نیز همان مقدار  $40\%/IACS$  بود. آزمون سنجش هدایت الکتریکی بر روی منطقه ایی نزدیک به محل پوشش داده شده (شکل ۹) انجام شد تا تاثیر دمای فرآیند پوشش دهی بر روی آن دیده شود.



شکل ۹) کانتور تنش ون مایز ساپورت با پوشش WC-17CO

همانطور که در استانداردها آورده شده و در جدول ۴ مشاهده میشود، تغییر عملیات حرارتی و به تبع آن تغییر ساختار قطعه میزان هدایت الکتریکی تغییر می کند، ولی با توجه به تست هدایت الکتریکی عدم تغییر خاصیت الکتریکی نشان از عدم تغییر ماهیت قطعه دارد.

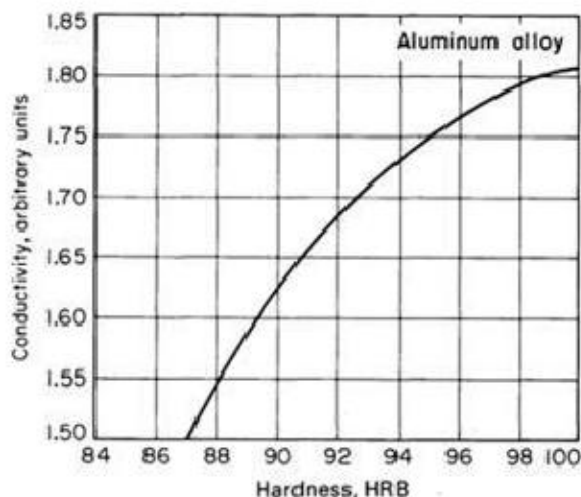
جدول ۴) خواص الکتریکی آلومینیوم با عملیات حرارتی مختلف.

	هدایت الکتریکی %IACS at 20°C	مقاومت الکتریکی nΩ.m
O Temper	50%	34
T3,T4,T451	34%	51
T6,T651,T652	40%	43

## ۵- سختی سنجی:

یک نمونه کوپن تست نیز در کنار قطعه اصلی، از همان جنس و با همان ضخامت و خواص، تحت عملیات پوشش دهی و سنگ زنی تا رسیدن به ضخامت پوشش مورد نظر قرار گرفت. این نمونه مانت سرد شد. بعد از انجام مانت سرد تمام زیر لایه آلومینیومی زیر پوشش جدید از محلی درست زیر پوشش به طرف عمق زیر لایه سختی سنجی

شد. با فاصله گرفتن از پوشش هیچگونه تغییرات سختی مشاهده نشد. به منظور اطمینان، یک نمونه قطعه اصلی که عمر کارکردی آن تمام شده است نیز تحت عملیات پوشش برداری و پوشش دهی و سنگ زنی مانند نمونه های دیگر قرار گرفت. قسمتی از نمونه با استفاده از تیغه الماسه پرش داده شد و به مانند کوپن تست مورد ارزیابی سختی سنجی قرار گرفت. نتایج حاصله موید عدم تغییر خواص سختی زیرلایه بر روی قطعه اصلی نیز می باشد. همانطور که در استاندارد ها آورده شده است، فاکتورهای بسیاری میزان هدایت فلز را تحت تاثیر قرار می دهند که بطور برجسته شامل دما، ترکیب شیمیایی، عملیات حرارتی و میکرو ساختار، اندازه دانه، سختی و تنش های باقیمانده می باشد. به طور مثال شکل ۱۰ رابطه سختی به هدایت الکتریکی را نشان می دهد.



شکل ۱۰) رابطه سختی و هدایت الکتریکی در آلیاژ آلومینیوم که میتوان برای پایش عملیات حرارتی آلیاژ بوسیله eddy current از آن استفاده کرد.

همانطور که در بالا ذکر شد، میزان دمای اعمال شده در حین فرآیند پوشش دهی هیچگونه تغییری در ساختار ایجاد نکرده است. میزان سختی نیز موید این مطلب، در صورتیکه با توجه به منابع، ساختارهای بدست آمده از عملیات حرارتی های مختلف بر روی آلومینیوم باعث تغییر در خواص هدایتی فلز پایه میشود. انجام تست های پروازی یا قطعه فوق یا پوشش پاشش حرارتی و انجام تست های زمینی مخصوص قطعات گردنده بعد از پرواز و اعمال گشتاورها و محاسبه ی نیرو ها، نشان از عدم تغییر خاصیت پوشش بعد از پرواز و بهتر شدن عملکرد قطعه دارد.

## ۶- نتیجه گیری:

برای ارزیابی تغییر استحکام مکانیکی قطعه sleeve با و بدون پوشش در این گزارش از مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار آپاکوس استفاده شده است. با مقایسه نتایج مشاهده گردید بدلیل بالاتر بودن مدول یانگ پوشش نسبت به آلومینیوم در تنشی که لایه دچار آسیب می شود اندکی تنش بیشینه در حالت با پوشش نسبت به بدون پوشش کم تر می باشد. این نتیجه برای حالت های بارگذاری کششی و فشاری مشاهده گردید.

باتوجه به تحلیل های نرم افزاری و تست های دستگاهی و انجام تست های پروازی و زمینی قطعه ایی از وسیله پرنده دیده میشود که با بکار بردن روش پاشش حرارتی و تغییر پوشش قطعه هیچگونه تغییری در خاصیت ذاتی قطعه ایجاد نمیشود و خود پوشش نیز توانایی قابل قبولی برای تحمل شرایط بحرانی بارگذاری دارد. در نتیجه با جایگزینی پوشش های قدیمی مانند کرم سخت و آندایز سخت یا پوشش های سخت نوین میتوان عمر کارکردی و کیفیت محصول را ارتقاء بخشید.

۷- منابع:

- ۱ سند آنالیز قطعه سواش پلیت ساپورت با پوشش و بدون پوشش، رضا فتاحی.
- 2- J.Stocks,the theory and application of the Sulzer metco Diamond HVOF thermal spray process, Sulzer metco,2003.
- 3- T.Sahra oui, N.Fenineche, G. Montavon" Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coating for gas turbine shaft repair (heavy duty)", Journal of Materials Processing Technology, 152, 2004, 43-55.
- 4- ASM Metals HandBook Volume 02 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Mat