

شبیه‌سازی المان محدود فرآیند خم‌شدایی شعله‌ای محور

علی مقدمی

سید جلال همتی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

یکی از عیوب ناشی از سرویس‌دهی تحت دما و فشار بالا در محور ماشین‌های دوار، لنگی موضعی (خمیدگی) است. برای رفع این خمیدگی می‌توان از فرآیند خم‌شدایی شعله‌ای استفاده کرد. در این روش با گرم کردن محور در نقطه حداکثر لنگی طولی، به واسطه گرادیان گرمایی ایجاد شده و تغییر شکل پلاستیک موضعی، تا حدودی لنگی برطرف می‌شود. یکی از محدودیت‌های جدی در مسیر تحقیقات در این زمینه، امکانات سخت‌افزاری گران قیمت و کمیاب بوده که دامنه تحقیقات تجربی و نظری را محدود نموده است. در این مطالعه به شبیه‌سازی المان محدود فرآیند روی محورهای نمونه پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی‌ها توزیع شار گرمایی ورودی به محور در موضع گرم‌کاری به صورت گوسی نرمال فرض شده است در حالی‌که در مطالعات قبلی شار گرمایی شعله به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. برای راستی آزمایی نتایج این مطالعه، آزمون‌های تجربی نیز ترتیب داده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها با فرض شار گوسی همخوانی بهتری با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: خم‌شدایی شعله‌ای روتور، گرمایش نقطه‌ای، خم‌کاری نقطه‌ای.

Finite Element Simulation of Rotor Flame Straightening

A. Moghadami
S. J. Hemmati

Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Abstract

One of the defects resulted from working under high temperature and pressure in the rotor of rotary machines is local run out (bending). To remove this bending, flame straightening process can be used. In this method, by heating the rotor at the maximum bent point, bending is fixed to some extent due to thermal gradient created and local plastic deformation. One of the serious limitations in research in this field is expensive and scarce hardware which has limited empirical and theoretical scope of the research. In this study, finite element simulations of the process on sample rotors are examined. In these simulations, heat flux on the heating point of the rotor is assumed as normal Gaussian distribution, while in previous studies, flame's heat flux was considered as constant. To verify the results of this study, experimental tests have also been arranged. Simulation results with the assumption of Gaussian flux show more consistency with the experimental results.

Keywords: Rotor flame straightening, Hot spotting, Flame bending.

اجزای متحرک، عدم توازن، ناهمگونی متالورژیکی روتور، شوک‌های گرمایی، لقی فونداسیون و نظایر این‌ها می‌توانند عامل خمیدگی و یا تشدیدکننده آن باشند.

معمولاً برای خم‌شدایی از یکی از روش‌های پرس‌کاری سرد، پرس‌کاری گرم و یا گرمایش شعله‌ای استفاده می‌شود. در شکل ۱ به‌طور طرحواره طرز خم‌شدایی شعله‌ای نشان داده شده است [۱]. این فرآیند براساس گرم‌کاری سریع قسمت محدب ناحیه خمیده عمل می‌کند. در این روش، گرادیان دمایی ایجاد شده بین موضع گرمایش با مناطق مجاور آن، باعث اعمال کرنش‌های دایمی کنترل‌شده در روتور و اصلاح خمیدگی آن می‌شود. مناطق پیرامون موضع گرم‌کاری با عایق پوشانده می‌شود. از این فرآیند برای صافکاری انواع تیرهای ساختمانی نیز استفاده می‌شود [۲ و ۳].

بهاد و همکاران [۴ و ۵] ضمن مطالعه عوامل ایجاد خمیدگی روتور، ویژگی‌های ارتعاشی خمیدگی و نحوه اندازه‌گیری آن را بیان نموده‌اند. پورسعیدی و رضوی [۶-۸] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی این فرآیند

۱- مقدمه

روتور (محور)، از جمله مهم‌ترین اجزای توربین‌ها و کمپرسورها است. بعضی از این روتورها با چندین متر طول و چند تن وزن، با دقت و فناوری بالایی ساخته شده‌اند و معمولاً قطعه یدکی نداشته و در صورت بروز عیوبی نظیر خمیدگی و یا سایش باید تعمیر شوند. عوامل مختلفی باعث ایجاد خمیدگی در روتورها می‌شوند. گاهی در اثر ناهم‌محوری و یا اعوجاج پوسته یا روتور، بین روتور و تجهیزات ثابت مجاور، سایش اتفاق می‌افتد. در این حالت در محل سایش، دما به‌طور موضعی بالا می‌رود و انتقال گرما با روتور موجب پدیده‌ای مشابه گرمایش نقطه‌ای^۱ می‌شود. به این ترتیب در موضع گرم شده، به واسطه تنش فشاری وارده از طرف تارهای سرد اطراف آن و افت خواص مکانیکی ماده، یک تغییر شکل فشاری پلاستیک ایجاد می‌شود و روتور در این محل دچار خمیدگی موضعی می‌گردد. تغییر شکل خزشی

^۱Hot spotting

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: jhemati@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹

۲- روش شبیه‌سازی فرآیند گرمایش نقطه‌ای

کل بازه شبیه‌سازی را می‌توان به دو مرحله شامل، مرحله گرمایش و مرحله قطع گرمایش تقسیم نمود. مرحله اول، از زمان نزدیک کردن شعله به محور شروع شده و تا زمان رسیدن دمای مرکز موضع گرمایش به دمای بیشینه معین (T_{max}) ادامه می‌یابد. سپس با خاموش کردن شعله، مرحله دوم شروع می‌شود و تا زمانی که تغییر شکل محور به حد نهایی خود برسد ادامه می‌یابد. به این ترتیب، در مرحله اول با تحلیل کوپل حرارتی-سازه‌ای گذرا، شار گرمایی گوسی به نقاط واقع در ناحیه گرم‌کاری اعمال می‌گردد تا دمای مرکز این ناحیه به T_{max} برسد. در مرحله دوم، تحلیل مرحله اول در غیاب شار گوسی ادامه می‌یابد تا جایی که محور به سمت تعادل گرمایی با محیط پیش می‌رود.

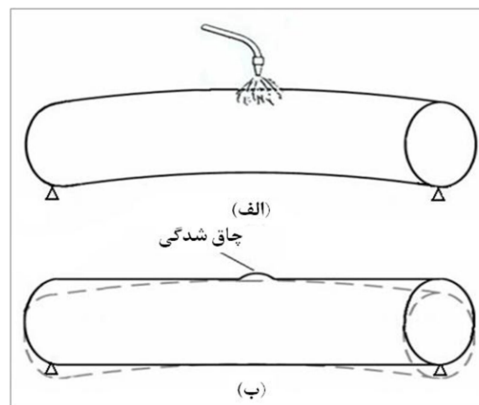
برای مدل‌سازی شار گرمایی شعله خروجی از نازل مشعل در شبیه‌سازی‌ها، از مدل توزیع گوسی نرمال استفاده شده است [۱۲]. در مرکز شعله، شار گرمایی مقدار بیشینه خود را داشته و در فاصله شعاعی (r) از مرکز، با رابطه‌ی زیر کاهش می‌یابد:

$$q'(r) = (k\dot{q}/\pi)\exp(-kr^2) \quad (1)$$

در این رابطه \dot{q} ، شار موثر و k ، ضریب تمرکز شعله نامیده می‌شود که با عکس مربع شعاع گوسی (R) رابطه دارد. در این مدل متغیرهای شار گرمایی موثر و ضریب تمرکز شعله بر اساس شرایط شعله و مشعل تغییر می‌کنند. در این تحقیق، شعاع نقطه گرم‌کاری از آزمون‌های تجربی با ملاحظه وسعت دایره سرخ‌شده، تخمین زده می‌شود. برای تعیین مقادیر \dot{q} و k بایستی در شبیه‌سازی‌ها با چند مرحله سعی و خطا، کالیبراسیون عددی انجام بگیرد.

برای شبیه‌سازی این فرآیند از قابلیت‌های نرم‌افزار ABAQUS استفاده گردیده است. برای این منظور، محوری به قطر ۱۰cm و طول ۲۰۰cm از جنس فولاد زنگ نزن 316 در نظر گرفته شده است. خواص گرمایی و مکانیکی ماده طبق شکل ۲ به صورت تابع دما فرض شده است [۱۳ و ۱۴]. مدل شبکه‌بندی شده محور در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل ملاحظه می‌شود با فرض تقارن هندسی، بارگذاری و تکیه‌گاهی، تنها یک چهارم محور شبکه‌بندی و تحلیل می‌شود. در این مدل به دلیل گرادیان شدید شار گرمایی شعله و دما در موضع گرم‌کاری، شبکه‌بندی این ناحیه ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده در تحلیل‌های گرمایی و سازه‌ای، المان مکعبی هشت گرهی است.

شبکه‌بندی با تعداد پیش‌فرض از المان‌ها شروع شده و با استفاده از مقادیر خیز مربوط به هر مرحله، تعداد المان‌های مدل اصلاح گردیده است. شکل ۴ نمودار خیز عمودی محور به ازای تعداد المان‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این حالت، ابتدا تغییرشکل‌ها، بزرگ و مدل سخت شوندگی، ایزوتروپیک فرض شده است. مدت زمان گرمایش ۷۰ ثانیه برای رسیدن به دمای بیشینه $710^\circ C$ در نظر گرفته شده است. برای این مدل مقدار متغیر k برابر $1/25 \text{ cm}^2$ است. مقدار بیشینه شار نیز برابر 200 W/cm^2 به دست می‌آید. از شکل ۴ ملاحظه می‌شود پس از شبکه‌بندی مدل با حدود چهار هزار المان، خیز محور تغییر محسوسی نداشته است. بنابراین تعداد المان‌ها در این سطح حفظ شده است.



شکل ۱- طرحواره طرز خمش‌زدایی شعله‌ای محور [۱]
(الف) در لحظات اولیه گرمایش و (ب) بعد از خمش‌زدایی

پرداختند. رضوی و همکاران [۹] به طور تجربی نقش دمای بیشینه و زمان گرمایش در این فرآیند را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور در دماها و زمان‌های مختلف، خمش‌زدایی یک روتور اعوجاج‌یافته را انجام دادند و دمای $690 \pm 20^\circ C$ و زمان ۲۱۰ ثانیه را به عنوان مقادیر مناسب برای تأمین اهداف خمش‌زدایی معرفی کردند. ایشان به کمک شبیه‌سازی‌های المان محدود، به بروز پدیده چاق‌شدگی^۱ در موضع گرمایش اشاره کردند و نقش عایق مرطوب بر توزیع دما و میزان چاق‌شدگی را گزارش نمودند.

صدوق و همکاران [۱۱ و ۱۰] نیز به طور تجربی دمای بهینه برای گرمایش نقطه‌ای را $690 \pm 20^\circ C$ اعلام نمودند و در صورت عدم استفاده از عایق ۷۸۰ ثانیه، در صورت استفاده از عایق خشک ۵۴۰ ثانیه و در حالت استفاده از عایق مرطوب زمان گرمایش را ۲۱۰ ثانیه گزارش کردند. ایشان در تحقیق بعدی خود روابطی را برای محاسبه تنش و گرادیان گرمایی بحرانی ارائه نمودند.

موسوی و همکاران [۱] به شبیه‌سازی المان محدود خم‌کاری یک محور به روش گرمایش نقطه‌ای شعله‌ای پرداختند. حل المان محدود مسئله شامل یک تحلیل گرمایی گذرا و سپس یک تحلیل سازه‌ای استاتیکی بود و نتایج تحلیل گرمایی به عنوان بار گرمایی، به تحلیل سازه‌ای اعمال شد. به اعتقاد مولفان می‌توان نتایج به دست آمده را به حالت گرمایش چند نقطه از روتور نیز تعمیم داد. برای اعتبارسنجی نتایج، آزمون‌های تجربی ترتیب دادند که درستی تقریبی مقادیر به دست آمده در مدل‌سازی را تأیید می‌کنند.

در تحقیقات محدود فوق‌الذکر که به متغیرهای مهمی مانند نوع مشعل و شعله اشاره‌ای نگردیده است بنا به فرض یک شار گرمایی ثابت از طریق برخورد محصولات احتراق با سطح محور به آن وارد می‌شود. در این تحقیق، بنا به گزارش سازندگان مشعل، با فرض توزیع گوسی شار گرمایی ورودی از مشعل به محور، به شبیه‌سازی المان محدود پدیده اصلاح گرمایی محور ماشین‌های دوار پرداخته خواهد شد. برای این مطالعه تعدادی آزمون تجربی هم ترتیب داده شده و نتایج به دست آمده با نتایج نظری مقایسه گردیده‌اند.

^۱ Upsetting

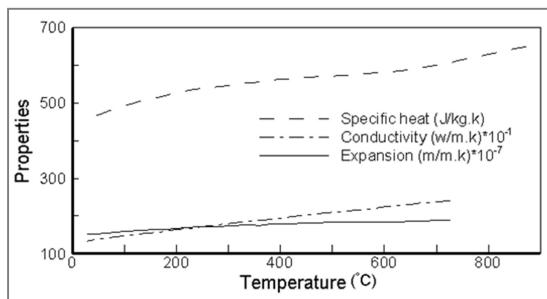
همچنین سعی شد با کمک فاصله‌انداز مناسب (مطابق شکل ۵)، فاصله نوک مخروط مرکزی شعله تا سطح محور بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر باشد تا از مزایای شعله تماسی بهره‌برداری شود. محور نازل مشعل بر سطح محور، عمود نگاه‌داشته شده است. در این حالت تا زمانی گرمایش محور ادامه می‌یابد که توسط ترمومتر لیزری، بیشینه دمای مرکز موضع گرمایش 710°C گزارش شود. این دمایی است که با توجه به دمای تقریبی تبلور مجدد فولاد و نتایج محققان قبلی [۸-۱۱] توصیه شده است. مدت زمان رسیدن مرکز موضع گرمایش به T_{\max} ، ۷۰ ثانیه بود. در این حالت بر اساس شعاع دایره سرخ شده موضع گرمایش و با کالیبراسیون عددی مقادیر \hat{q} و k همان مقادیری تعیین شدند که در تحلیل حساسیت به شبکه به کار رفتند. در شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی، از هیچ‌گونه عایقی در مجاورت موضع گرم‌کاری استفاده نشده است و فرض بر این است که بین محور و هوای اطراف، همرفت آزاد وجود دارد. در شبیه‌سازی‌ها، دمای محیط، 25°C و ضریب همرفت هوا برابر $10\text{ W/m}^2\text{K}$ فرض شده‌اند. شرایط مرزی گرمایی در گره‌های واقع در موضع گرم‌کاری، شار گرمایی ورودی گوسی است. برای گره‌های واقع در سطوح تقارن شار گرمایی صفر و برای سایر گره‌ها، فرض همرفت آزاد با هوا اعمال گردیده است. شرایط مرزی مکانیکی در تکیه‌گاه‌ها، از نوع تکیه‌گاه ساده (جابجایی عمودی رو به پایین و افقی عمود بر محور، صفر و چرخش آزاد) و در سطح تقارن، جابجایی عمود به سطح تقارن صفر است.



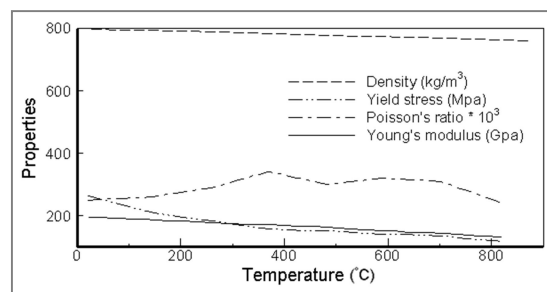
شکل ۵- گرمایش آزمایشی محور

۳- نتایج و بحث

منحنی دما- زمان نقطه مرکز موضع گرمایش، در شکل ۶ ملاحظه می‌شود. دمای این نقطه پس از رسیدن به 710°C ، طی حدوداً ۳ دقیقه به 60°C می‌رسد و سپس به کندی تا رسیدن به دمای محیط کاهش می‌یابد. شکل ۷، توزیع دما در بخشی از تار بالایی محور در لحظه رسیدن دما در مرکز ناحیه گرمایش به T_{\max} و کمی بعد از آن را نشان می‌دهد. در این شکل، پهنای ناحیه گرم شده از گرمای ورودی، حدوداً 10 cm است و مواد دورتر هنوز در دمای محیط قرار داشته‌اند. عمق ناحیه گرم شده در این لحظه طبق شکل ۸، حدوداً 5 cm است. به این ترتیب گرادیان دمای دو طرف قطر محور در این نقطه، حدوداً به 685°C بالغ می‌گردد.

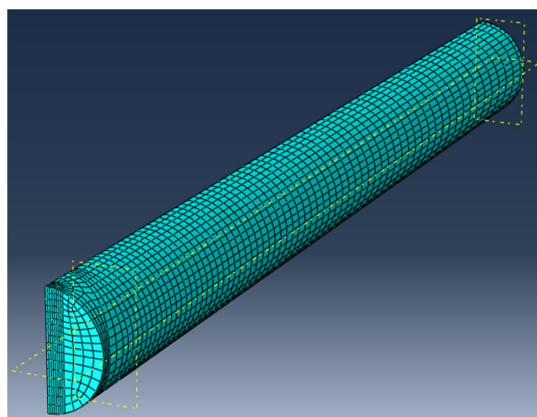


(الف)



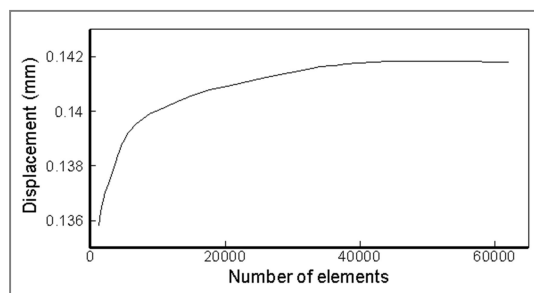
(ب)

شکل ۲- (الف) خواص گرمایی، (ب) خواص مکانیکی فولاد [۱۳ و ۱۴]



شکل ۳- مدل شبکه‌بندی شده محور در تحلیل المان محدود

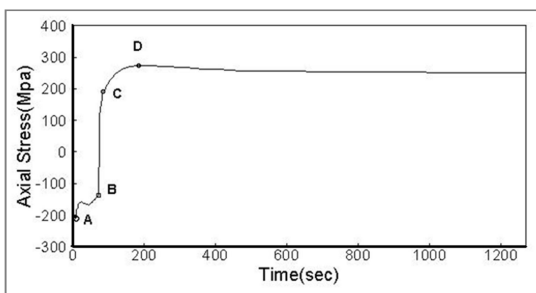
برای تعیین متغیرهای شعله، محوری با مشخصات مشابه با شبیه‌سازی‌ها، به وسیله نازل تک روزنه شماره ۳# از مشعل ساخت شرکت Victor تحت گرمایش قرار گرفت. نسبت حجمی اکسیژن به استیلن طوری تنظیم شده که شعله، به صورت اکسید کننده باشد.



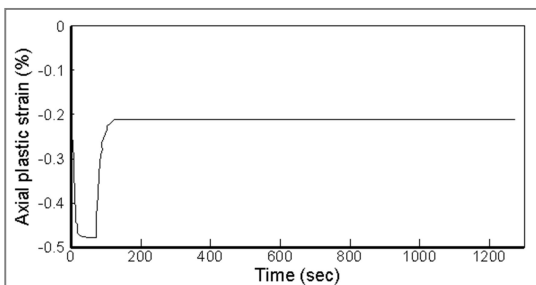
شکل ۴- نمودار خیز به ازای تعداد المان‌ها

و تا نقطه D ماده گرم شده تمایل به منقبض شدن پیدا می کند لیکن از طرف مواد سرد مجاور خود تحت کشش قرار می گیرد. در این حالت تنش کششی، ابتدا به سرعت افزایش می یابد و سپس به تدریج به حدوداً ۲۳۴ MPa می رسد.

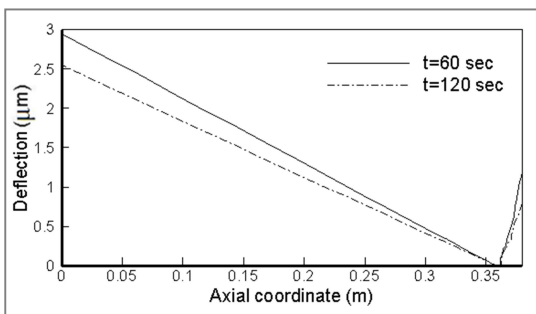
شکل ۱۰، توزیع کرنش پلاستیک محوری بر حسب زمان را در نقطه مرکز موضع گرم کاری نشان می دهد. تا لحظه قطع گرمایش، ماده دچار کرنش محوری فشاری بوده است ولی از لحظه $t=70\text{ sec}$ به بعد با قطع گرمایش و خنک شدن ماده تحت تنش کششی وارده، از میزان کرنش فشاری کم می شود تا این که با کاهش دمای ماده و خارج شدن ماده از حالت الاستیک پلاستیک، تغییر شکل پلاستیک متوقف می گردد. کرنش فشاری پلاستیک در این نقطه منعکس کننده پدیده چاق شدگی است. در منحنی شکل ۱۱، وضعیت خیز نقاط واقع بر نیمه چپ تار بالایی محور رسم شده است. بر اساس این نمودار، فقط ناحیه متاثر از حرارت دچار تغییر شکل های پلاستیک می شود و خارج از این ناحیه بدون تغییر شکل پلاستیک باقی می ماند و محور، فقط در اثر خیز ناحیه متاثر از حرارت، زاویه به خود می گیرد.



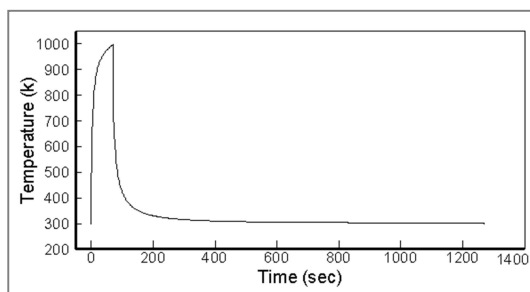
شکل ۹- منحنی تنش - زمان برای مرکز ناحیه گرمایش تا لحظه رسیدن به تعادل دمایی با محیط



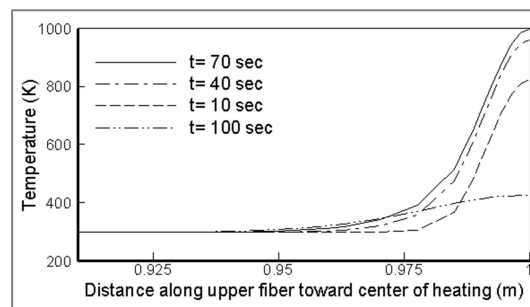
شکل ۱۰- منحنی کرنش - زمان برای مرکز ناحیه گرمایش



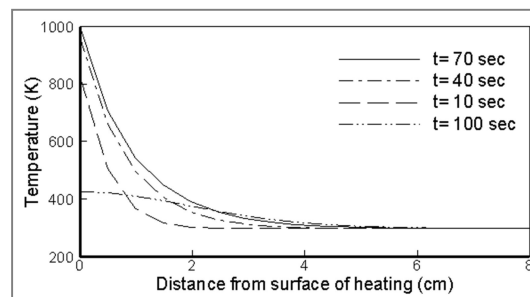
شکل ۱۱- منحنی خیز در تار بالایی شفت بدون استفاده از عایق تحت زمان های گرمایش مختلف



شکل ۶- منحنی دما- زمان برای نقطه مرکز گرمایش تا لحظه رسیدن به تعادل دمایی با محیط



شکل ۷- منحنی های دما- مکان در بخشی از تار بالایی برای لحظات مختلف از شروع گرمایش



شکل ۸- توزیع دما در راستای خط مرکز چاله گرم شده در بخشی از تار بالایی برای لحظات مختلف از شروع گرمایش

در شکل ۹، منحنی تنش محوری-زمان برای نقطه مرکز موضع گرم کاری نشان داده شده است. پس از شروع گرمایش، به دلیل افزایش سریع دمای مرکز، تار بالایی تمایل دارد منبسط شود ولی با مقاومت نواحی سرد مجاور رو به رو می شود و تحت تنش فشاری قرار می گیرد. این فشار، با افزایش دمای مرکز بیشتر می شود تا این که پس از حدوداً ۳ ثانیه در نقطه A به حداکثر خود یعنی حدوداً ۲۱۰ MPa می رسد. از آن جایی که تنش تسلیم کششی ماده در این دما (391°C) حدوداً ۱۶۵ MPa می باشد در نقطه A با فرض یکسان بودن تنش تسلیم فشاری و کششی باید ماده در حالت الاستیک پلاستیک بوده باشد. با افزایش دمای مرکز گرمایش و افزایش کرنش پلاستیک ماده، تنش در این نقطه کمی کاسته می شود. کاهش تنش فشاری تا نقطه B و لحظه $t=70\text{ sec}$ ادامه می یابد. در این لحظه با قطع گرمایش و شروع تبادل گرمایی همرفتی با محیط در این نقطه و رسانش درون محور، دما ابتدا به سرعت (تا نقطه C) و سپس به صورت تدریجی شروع به کاهش می کند

[2] Fong N., Gracie R. and Walbridge S., Finite Element Analysis of Structural Steel Impact Damage And Heat Straightening *Conference of Transportation Association of Canada*, 2014.
 [3] Schäfer D., Rinaldi V., Beg D., Može P., Lacalle R., Portilla J., Ferreño D., Álvarez J.A., Willms R. and Schütz, J., Optimisation and Improvement of the Flame straightening Process (Optistraight) , Final Report, 2012, EUR 25120 EN.
 [۴] بهزاد م، آسایش م. و صمدی م.، تشخیص خمیدگی با آنالیز ارتعاشات و راه‌های عملی خمش‌زدایی در شفت شناورها، هفتمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، انجمن مهندسی دریایی ایران، تهران، ایران، ۱۳۸۴.

[۵] بهزاد م، غریب م. ع. و صمدی م.، بررسی خمیدگی در محورهای دوار و روش‌های رفع آن‌ها، سومین کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات، تهران، ایران، ۱۳۸۴.

[6] Poursaeidi E. and Razavi A. R., An investigation on the causes of a rotor bending and its thermal straightening. *IGE Transactions B: applications*, Vol.21, No. 3, pp. 281-290, 2008.
 [7] Poursaeidi E. and Kamalzadeh Yazdi M., causes of rotor Distortions and applicable common straightening methods for turbie rotors and shafts. *World academy of science, engineering and technology*, Vol. 55, pp. 213-218, 2011.
 [8] Poursaeidi E. and Kamalzadeh Yazdi M., Application of Hot Spotting Method for the Straightening of a Large Turbine Rotor, *IJE TRANSACTIONS A: Basics*, Vol. 31, No. 1, pp. 110-119, 2018.
 [۹] رضوی ع، پورسعیدی ا. و رش‌احمدی س.، خمش‌زدایی روتورهای نیروگاهی با استفاده از عملیات گرم کردن موضعی. بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، ۱۳۸۴.

[۱۰] صدوق ع، رش‌احمدی س. و رضوی ع.، بررسی اثر شدت توان توقیف‌کنندگی در عملیات حرارتی سطحی موضعی بر میزان خمش‌زدایی روتورهای نیروگاهی. ششمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۸۲.

[۱۱] صدوق ع، رضوی ع. و رش‌احمدی س.، کاربرد عملیات حرارتی سطحی موضعی در خمش‌زدایی روتورهای نیروگاهی. ششمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۸۲.

[12] Hemmati S. J., and Shin J. G., Estimation of flame parameters for flame bending process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 5, pp. 799-804, 2007.
 [13] *British Stainless Steel Association*. www.bssa.org.uk, visited on 10.06.2015.
 [14] Byun T. S., Hashimoto N. and Farrell K., Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels. *ActaMaterialia*, Vol. 52, pp. 3889-3899, 2004.

در آزمون‌های تجربی وضعیت خمیدگی محور، قبل و بعد از خمش‌زدایی تجربی، روی دستگاه تراش بررسی شد و در موقعیت حداکثر لنگی اولیه، عملیات گرم‌کاری انجام گرفت. نقطه حداکثر لنگی کمی از وسط محور فاصله داشت. در این موقعیت به فواصل ۲۵cm از هم، لنگی محور اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱ مقادیر لنگی درج شده‌اند. از مقادیر این جدول ملاحظه می‌شود پیش‌بینی شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت معقولی داشته است.

جدول ۱- مقادیر لنگی تجربی و عددی محور

موقعیت کمیت	۰/۲۵ (m)	۰/۵ (m)	۰/۷۵ (m)	۱/۰ (m)	۱/۲۵ (m)	۱/۵۰ (m)	۱/۷۵ (m)
لنگی تجربی اولیه*	۰/۳۱	۰/۹۹	۱/۶۵	۲/۲۰	۲/۰۹	۱/۳۱	۰/۵۳
لنگی تجربی نهایی*	۰/۲۸	۰/۹۳	۱/۵۶	۲/۰۵	۱/۹۸	۱/۲۴	۰/۴۹
لنگی عددی*	۰/۲۶	۰/۹۱	۱/۵۲	۲/۰۵	۱/۹۸	۱/۲۴	۰/۴۹
خطا (%)	۹/۲	۲/۲	۲/۶	-۰/۵	-	-	-

* مقادیر لنگی به میلی‌متر

۴- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اصلاح گرمایی خمیدگی محور به روش گرمایش شعله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور شبیه‌سازی‌ها، در نرم‌افزار ABAQUS انجام شدند. برای مدل‌سازی شار حرارت معادل شعله، از مدل توزیع گوسی نرمال استفاده شد. برای ارزیابی نتایج عددی، آزمون تجربی ترتیب داده شد و تطابق معقولی بین نتایج ملاحظه گردید. زمان گرمایش برای رسیدن به دمای بیشینه ۷۱۰°C در نقطه مرکز گرمایش، حدوداً ۷۰sec می‌باشد. این زمان که به طور تجربی از گرمایش شعله‌ای و اندازه‌گیری با ترمومتر لیزری به دست آمده است با گزارش موسوی و همکاران [۱۱] مطابقت دارد ولی از زمان گزارش شده در سایر مراجع [۸-۱۱] کمتر است. یکی از دلایل این امر احتمالاً بزرگ‌تر بودن قطر محور مورد مطالعه در مراجع مذکور و همچنین نوع نازل به کار رفته در آن مراجع است که البته به نوع آن اشاره نشده است. شبیه‌سازی‌های مشابه در این تحقیق با تحقیق [۱] میزان خیز محور را بیشتر گزارش می‌کند که با نتایج تجربی این تحقیق و داده‌های مرجع [۱] همخوانی بهتری دارد. گرچه فرض توزیع گوسی و توزیع ثابت شار، به پهنای ناحیه گرم کاری تقریباً یکسانی ختم می‌شود موضعیت میدان دما بیشتر است که منجر به افزایش خیز محور می‌شود.

۵- مراجع

[۱] موسوی ترشیزی س. ا.، محمدیان ح. و صفریور پ.، مدل‌سازی المان محدود خمش‌زدایی روتورهای نیروگاهی با اعمال گرمادهی موضعی. شانزدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، کرمان، ایران، ۱۳۸۷.