

## عوامل افزایش سختی ژورنال روتور توربین گاز مدل GE-F5 و تدوین پروسه تعمیرات آن به روش عملیات حرارتی تمپرینگ

وحیدرضا نعمتی، علی احمدی

شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، امور تحقیقات و آزمایشگاهها

Email: vrnemati@yahoo.com, ali.ahmadi12345@gmail.com

واژه‌های کلیدی: سختی، روتورهای نیروگاهی، ژورنال، عملیات حرارتی تمپرینگ

### چکیده

افزایش سختی موضعی نشیمنگاه روتورهای نیروگاهی در مواردی عملکرد روتورها را مختل می‌کند. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد. در این مقاله اصلاح محل‌های تحت سایش ژورنال توربین گاز از نوع GE - F5 که به علت ایجاد اختلال در سیستم روانکاری مابین شفت روتور و یاتاقان دچار افزایش سختی موضعی شده به روش عملیات حرارتی تمپرینگ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این منظور، پس از آزمایش رپلیکا و سختی سنجی بر روی ژورنال جهت بررسی دامنه سختی سطحی مشخص گردید علت اصلی افزایش سختی با پراکندگی ۲۲۶-۵۶۶ ویکرز عمدتاً استحاله فازی مارتزیتی بوده و بعضاً عوارض تنش‌های مکانیکی در حوالی محل‌های آسیب دیده. با توجه به مطالب فوق به منظور اصلاح وضعیت شفت آسیب دیده عملیات حرارتی تمپرینگ تدوین و اجرا شد. هدف این عملیات شامل کاهش سختی محل‌های آسیب دیده در حد قابل قبول (۳۵۰-

۲۴۰ ویکرز) و عدم کاهش یا کاهش معقول سختی محل‌های سالم می‌باشد. پروسه مورد نظر با انتخاب دمای C ۶۹۰ و ۵ ساعت نگهداری در این دما جهت تأمین اهداف مذکور اجرا شد. حذف نواحی دارای حداکثر سختی و کاهش دامنه پراکندگی آن در ژورنال و کاهش تنش‌های قطعه از جمله نتایج به دست آمده می‌باشد.

### ۱- مقدمه

تعمیر قطعات آسیب دیده و استفاده مجدد از آنها به عنوان یک روش قابل توجیه اقتصادی مورد توجه صنایع مختلف بوده و صنعت برق نیز به عنوان یکی از مهمترین گروه‌ها در این راستا مطرح می‌باشد. قطعات بکار رفته در نیروگاهها از نظر طراحی و تولید دارای فن آوری بالایی بوده و بنابر این در صورت بازسازی این قطعات می‌توان مبالغ زیادی از هزینه‌های یک واحد نیروگاهی را صرفه جویی نمود. یکی از قطعات مهم و منحصر به فرد در هر واحد نیروگاهی روتور

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

### ۲- مستندات علمی (Scientific Document)

#### ۲-۱- فرایند عملیات حرارتی تمپرینگ

به علت تنشهای ایجاد شده در ضمن سریع سرد کردن قطعات تقریباً تمامی قطعات سخت شده ترد و شکننده اند، از این رو از فرایند تمپرینگ برای بهبود خواص آن به کار می رود. تمپرینگ عبارت است از حرارت دادن فولاد سخت شده (حاوی تنش های داخلی) تا دمایی زیر دمای  $A_{e1}$  نگه داشتن آن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق. آنچه که در این فرایند مهم است، درجه حرارت و زمان نگهداری قطعه در دمای انتخاب شده که هر دو وابستگی شدیدی به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر دارند. در اثر عملیات حرارتی تمپرینگ تنشهای داخلی کاهش یافته و تافنس افزایش می یابد، در مقابل سختی و استحکام تا حدودی کاهش می یابد. بدیهی است انتخاب دما و زمان نگهداری نامناسب تمپرینگ، نه تنها اهداف مورد نظر (زدایش تنش، کاهش سختی و ...) را تامین نمی کند بلکه ممکن است باعث افزایش سختی (سختی ثانویه) و یا کاهش بیش از حد سختی در قطعه شود. در حقیقت می توان گفت که اثرات تمپرینگ تنها تابع درجه حرارت نبوده بلکه به زمان اجرای پروسه نیز مربوط می باشد [1].

#### ۲-۲- اهداف عملیات حرارتی تمپرینگ

هدف از انجام عملیات حرارتی تمپرینگ بر روی شفت مورد نظر عبارتست از:

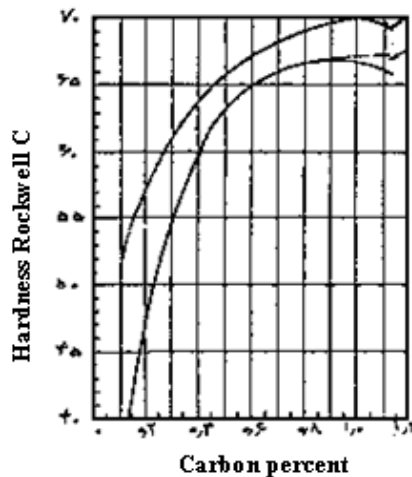
- ۱- از بین بردن و یا کاهش تنشهای ایجاد شده در حین حادثه در زمان سرویس دهی قطعه.
- ۲- افزایش چقرمگی (Toughness) و مقاومت فولاد در برابر ضربه.
- ۳- کاهش سختی ایجاد شده در حین سرویس دهی قطعه.
- ۴- ایجاد پایداری در حالت دینامیک.
- ۵- کاهش دامنه تغییرات سختی در منطقه آسیب دیده.

توربین می باشد. با توجه به امکانات موجود در کارگاه از میان روشهای مرمتی موجود در این مقوله روش عملیات حرارتی تمپرینگ بعنوان در دسترس ترین، سریعترین و اقتصادی ترین روش انتخاب و به اجرا درآمد. همانطور که می دانیم اصطکاک منجر به اتلاف انرژی مکانیکی شده که بخش اعظمی از این انرژی اصطکاکی تبدیل به گرما می شود. پدیده تبدیل انرژی اصطکاکی به گرما که به فرایند گرمایش اصطکاکی نیز موسوم است منجر به افزایش دمای دو جسم خصوصاً در نواحی تماس می گردد. این افزایش دما می تواند اثرات بسزایی بر تغییرات ریزساختاری، خواص مواد تحت سایش، اکسیداسیون سطح و حتی ذوب سطحی دو قطعه در حال تماس داشته باشد. مشکل افزایش دما در شفت روتور در منطقه نشیمنگاه موسوم به ژورنال، به دلیل ایجاد اختلال در سیستم روانکاری و تماس مستقیم محور با یاتاقان خود ایجاد می گردد. حاصل این تماس بدون روانکاری ایجاد اصطکاک و افزایش قابل توجه دما در محدوده بالای نقطه یوتکتیک می باشد که با سرد شدن سریع نهایتاً افزایش سختی با دامنه پراکندگی فراوان را در پی دارد. از این رو روتورهائی با شرایط فوق الذکر به ندرت در شرایط سرویس کاری قرار می گیرند. در این پروژه که شامل دو بخش کارگاهی و آزمایشگاهی می باشد دو موضوع زیر مورد توجه قرار گرفته است:

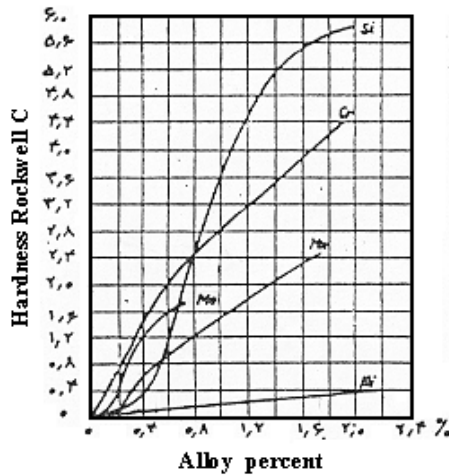
۱- بررسی علت افزایش سختی در سطح ژورنال بیش از حد استاندارد

۲- تدوین و اجرای پروسه عملیات حرارتی به منظور کاهش میزان سختی محلهای استحاله یافته (محلهایی که در اثر این حادثه تحت استحاله فازی مارتنزیتی قرار گرفته و دارای حداکثر سختی هستند) در حد قابل قبول و حفظ میزان سختی محلهای استحاله نیافته (محلهایی که آسیب ندیده و عموماً دارای ساختار اولیه بینیتی بودند) در محدوده استاندارد.

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱: افزایش سختی با توجه به افزایش درصد کربن فولاد



شکل ۲: افزایش سختی با توجه به درصد عناصر آلیاژی فولاد

جدول ۱: تاثیر عدد اندازه دانه بر روی مقدار Hc

|                      |     |     |     |     |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| عدد اندازه دانه ASTM | ۴   | ۶   | ۸   | ۱۰  |
| افزایش مقدار Hc      | ۰.۶ | ۰.۹ | ۱.۲ | ۱.۵ |

### ۳- روش انجام کار (Methodology)

این پروژه شامل دو فاز تحقیقاتی و صنعتی می‌باشد. فاز اول شامل بررسیها و آزمایشات اولیه در کارگاه تعمیرات روتور می‌باشد که به منظور ارزیابی کیفی وضعیت روتور در محل آسیب دیده ژورنال (شکل ۳) انجام شده و فاز دوم که شامل مراحل اجرایی عملیات حرارتی تمپرینگ می‌باشد. در این مرحله روند انجام هر دو فاز همراه با نتایج مربوطه بطور جداگانه ارائه می‌شود.

۶- کاهش خطر ناشی از شکست ترد ماده (تنشهای پسماند می‌توانند شکست ترد قطعه را حتی در شرایط کاری فراهم نمایند) [۲].

### ۲-۳- تدوین پروسه عملیات حرارتی تمپرینگ

دمای مناسب جهت تمپرینگ فولادهای کربنی و کم آلیاژی با توجه به ترکیب شیمیایی و سختی نهایی مورد نظر به طور تقریبی قابل محاسبه می‌باشد، این روش بر اساس فرمول پیشنهادی Gordon و با فرض اینکه ریز ساختار فولاد پس از سریع سرد شدن عمدتاً مارتنزیتی می‌باشد به صورت زیر ارائه شده است [۳]، اصول متالورژیکی مربوط به علت انتخاب دمای ۶۹۰ درجه سانتیگراد در خصوص محل ژورنال این روتور نیز استفاده از همین روش محاسباتی و تجربیات قبلی در خصوص روتورهای نیروگاهی می‌باشد. (لازم به ذکر است وجود عناصر آلیاژی کاربید ساز نظیر مولیبدن، تنگستن و خصوصاً وانادیم در این روتور گستره دمایی را تا حدودی نسبت به سایر فولادها افزایش می‌دهد) [۳،۵].

$$(1) \quad T = 30 (H_c - H_a)$$

T: درجه حرارت تمپرینگ بر حسب درجه فارنهایت  
H<sub>c</sub>: سختی محاسبه شده از روی ترکیب شیمیایی بر حسب راکول C

H<sub>a</sub>: سختی مورد نظر پس از تمپرینگ بر حسب راکول C  
چنانچه در رابطه ۱ درجه حرارت تمپرینگ به سانتی گراد تبدیل شود رابطه فوق به صورت زیر در خواهد آمد:

$$(2) \quad T = 16.67 (H_c - H_a) - 17.8$$

قابل ذکر است که مقدار H<sub>c</sub> با توجه به درصد کربن و سایر عناصر آلیاژی به کمک شکل‌های ۱ و ۲ بدست می‌آید. از طرفی همانطور که می‌دانیم با ریز شدن دانه های فولاد مقاومت آن در برابر نرم شدن در ضمن انجام تمپرینگ افزایش می‌یابد لذا اثر اندازه دانه حتماً باید در مقدار H<sub>c</sub> در نظر گرفته شود که این مقادیر از جدول شماره ۱ قابل استخراج است.

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

#### ۱-۳- بررسیهای اولیه

همچون سایش سطح خارجی، خوردگیهای موضعی، تخلخلها و ناهمواریهای سطحی، خراشیدگی و ریز ترکهای سطحی همگی دلالت بر این پدیده مخرب دارند.

نتایج حاصل از بررسیهای اولیه که شامل بازرسی چشمی محل‌های آسیب دیده ژورنال روتور می باشد (شکل ۳)، نمایانگر آن است که محل‌های مزبور عمدتاً تحت تأثیر پدیده سایش (Rubbing) بوده و علائم موجود بر روی ژورنال



شکل ۳: محل ژورنال روتور (ناحیه آسیب دیده)

#### ۲-۳- آزمایشات اولیه

آزمایشات اولیه شامل آزمایش کوانتومتری، سختی سنجی بر روی منطقه آسیب دیده و ناحیه سالم به عنوان مرجع و رپلیکا (متالوگرافی غیر مخرب) می باشد که به طور اختصار توضیح داده می شود.

#### ۱-۲-۳- آزمایش کوانتومتری

ابتدا به منظور شناخت نوع فولاد مورد استفاده در روتور مزبور آزمایش آنالیز شیمیایی انجام می شود، نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی ما رادر جهت دستیابی به کد فولاد روتور براساس استانداردهای مختلف جهانی و همچنین خواص مکانیکی کمک می کند. که در جدولهای ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲: نتیجه آنالیز کوانتومتری مربوط به فولاد روتور تحت بررسی

| نام عناصر       | %C   | Si   | Mn   | P,S   | Cr   | Mo   | V    | Ni   |
|-----------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| درصد وزنی عناصر | 0.28 | 0.43 | 0.85 | 0.024 | 1.09 | 1.28 | 0.55 | 0.28 |

جدول ۳: محدوده ترکیب شیمیایی استاندارد مربوط به فولاد روتور توربین (B50A491E)

| نام عناصر       | %C          | Si          | Mn      | P,S   | Cr          | Mo      | V           | Ni  |
|-----------------|-------------|-------------|---------|-------|-------------|---------|-------------|-----|
| درصد وزنی عناصر | 0.25 - 0.35 | 0.15 - 0.35 | 0.7 - 1 | 0.024 | 0.85 - 1.25 | 1 - 1.5 | 0.45 - 0.55 | 0.5 |

جدول ۴: خواص مکانیکی فولاد روتور

| Tensile strength(>N/mm2) | Yield strength (>N/mm2) | Elongation % | Hardness (HB)  |
|--------------------------|-------------------------|--------------|----------------|
| 754 - 793                | 588                     | 18           | 229 - 277      |
|                          |                         |              | 240 - 290 (HV) |

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

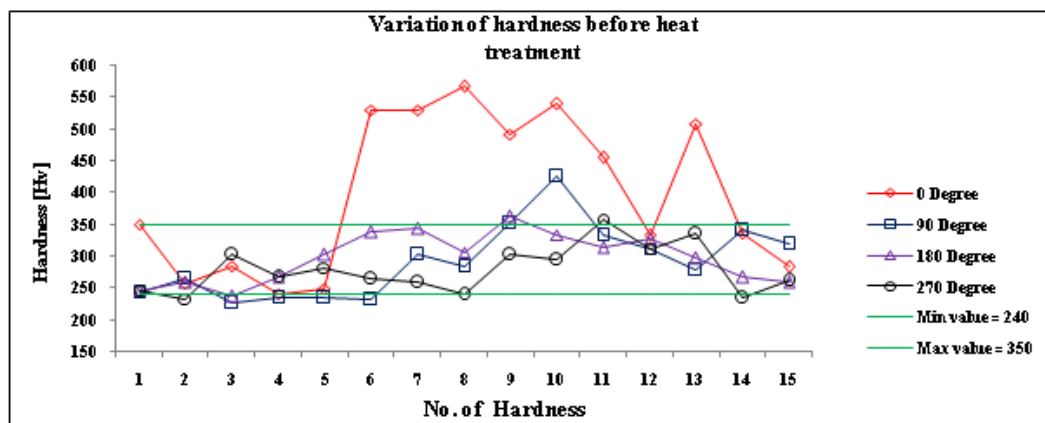
#### ۳-۲-۲- آزمایش سختی سنجی

هدف از انجام آزمایش سختی سنجی ، بررسی میزان تغییرات سختی در محل‌های آسیب دیده و مقایسه آن با محل‌های سالم روتورمی باشد. با تعیین میزان سختی در مناطق آسیب دیده ( محل ژورنال ) نقاط دارای حداکثر سختی جهت بررسی‌های متالوگرافی علامت گذاری و مشخص می شود. در حقیقت این آزمایش پیش نیاز آزمایش رپلیکا در محل مورد نظر می

باشد. نتایج تغییرات حاصل از آزمایش سختی سنجی در جدول شماره ۵ و شکل شماره ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است مطابق دستورالعمل سازندگان روتورها میزان سختی روتور پس از بازسازی تا مقدار ۳۵۰ ویکرز مجاز شناخته می شود.

جدول ۵ : جدول تغییرات سختی روتور در ناحیه آسیب دیده (HV)

|           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Angle 0   | 350 | 257 | 285 | 241 | 249 | 530 | 566 | 492 | 540 | 455 | 332 |
|           | 508 | 336 | 284 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Angle 90  | 243 | 265 | 226 | 234 | 235 | 231 | 302 | 284 | 352 | 425 | 332 |
|           | 312 | 277 | 341 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Angle 180 | 246 | 259 | 237 | 266 | 303 | 338 | 343 | 306 | 362 | 334 | 314 |
|           | 326 | 289 | 248 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Angle 270 | 246 | 233 | 303 | 266 | 282 | 265 | 258 | 240 | 303 | 295 | 358 |
|           | 312 | 335 | 234 |     |     |     |     |     |     |     |     |



شکل ۴ : نمودار تغییرات سختی در محل آسیب دیده

#### ۳-۲-۳- آزمایش رپلیکا ( متالوگرافی غیر مخرب )

جهت بررسی ریز ساختار ناحیه آسیب دیده، لازم است از محل‌های مورد نظر که توسط آزمایش سختی سنجی مشخص شده اند آزمایش رپلیکا به عمل آید. نحوه انجام این آزمایش به شرح ذیل می باشد :

P پس از حذف عوارض سطحی و عیوب محل مورد نظر توسط سمباده چتری مش های 60 , 180 , 240 و در ادامه با سمباده های مش 400 , 600 , 800 , 1000 و 1200 عمل سمباده زنی ادامه پیدا می کند سپس عملیات پولیش توسط خمیر الماسه های ۶ ، ۳ و ۱ میکرون همراه با نمدهای مربوطه انجام می گردد، پس از اچ شدن سطح پولیش شده نهایی ،

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- ۲) نصب ورقه های مسی بر روی روتور به منظور جلوگیری از آسیبهای احتمالی سطحی
- ۳) نصب المنت های مقاومتی در منطقه تحت عملیات حرارتی
- ۴) نصب ترموکوپل ها در منطقه تحت عملیات حرارتی ( شکل ۸).
- ۵) عایق کاری کل منطقه تحت عملیات حرارتی
- ۶) اجرای عملیات عمودی کردن روتور ( شکل ۹ )
- ۷) اجرای سیکل عملیات حرارتی از قبل طراحی شده بر اساس پروسه ( شکل ۱۰).



شکل ۷: پاشش محلول کربنات کلسیم

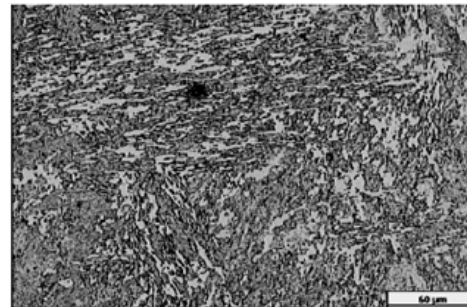


شکل ۸: نصب ترموکوپل و المنتها در منطقه عملیات حرارتی

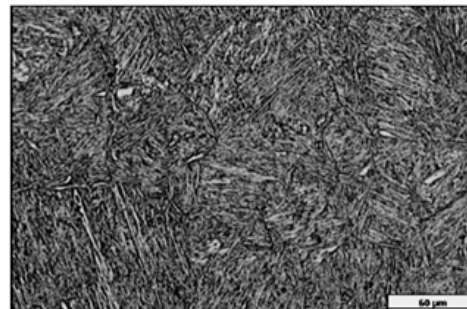


فویل رپلیکا بر روی سطح چسبانده می شود. پس از گذشت زمانی در حدود ۱۵ دقیقه فویل از سطح جدا شده آماده برای انجام مراحل بعدی می باشد.

برای بررسی رپلیکا ابتدا سطح آن را با پوششی از طلا پوشش داده سپس با میکروسکوپ نوری آن را مورد بررسی قرار می دهیم [۴]. نتایج مربوط به این مرحله در شکل‌های ۵ و ۶ نشان می دهد که افزایش سختی موضعی در سطح محل ژورنال به طور عمده ناشی از رخداد استحاله فازی مارتنزیتی می باشد ( به دلیل افزایش بیش از حد دما در آن مواضع و سرمایش شدید مناطق اطراف آن). بنابراین پروسه عملیات حرارتی تمپرینگ بر مبنای کاهش سختی محل‌های صدمه دیده در حد قابل قبول ( ۳۵۰ - ۲۴۰ ویکرز ) با حفظ سختی در حد استاندارد در محل‌های سالم بر طبق مراحل زیر به مورد اجرا گذاشته شد.



شکل ۵: ریز ساختار مرجع مربوط به فولاد روتور



شکل ۶: ریز ساختار منطقه آسیب دیده روتور

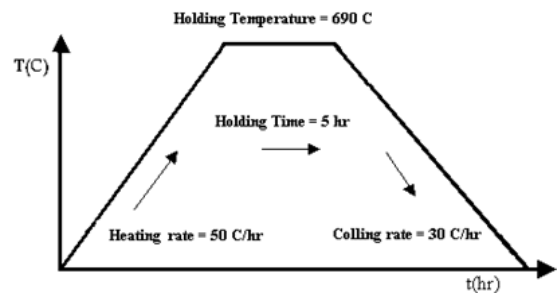
#### ۴- مراحل اجرایی عملیات حرارتی تمپرینگ در محل

##### ژورنال روتور توربین گاز GE-F5

- ۱) پاشش محلول کربنات کلسیم به منظور جلوگیری از رخداد اکسیداسیون ( شکل ۷).

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شکل ۹: اجرای عملیات عمودی کردن روتور



شکل ۱۰: سیکل عملیات حرارتی

است. این نتیجه با تصاویر حاصل از آزمایش رپلیکا در محل آسیب دیده تا حدودی قابل بررسی است. در مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ به هم ریختگی ساختاری و تغییرات قابل توجه این ساختار نسبت به ساختار اخذ شده از محل سالم (ساختار مرجع) به وضوح مشخص است. مشاهده می‌شود که لایه های بینیتی در اثر بروز این حادثه کاملاً از بین رفته و مورفولوژی آن شبیه به ساختار مارتنزیتی در این گونه فولادها است. همچنین بررسی نتایج آزمایش سختی سنجی از دیگر مواردی است که مؤید رخداد استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت در مواضع خاصی از روتور می‌باشد، مطابق نتایج سختی سنجی دامنه تغییرات سختی روتور تا حداکثر ۵۶۶ ویکرز صعود کرده است. این میزان سختی دقیقاً منطبق بر میزان سختی نشان داده شده در منطقه فازی مارتنزیت می‌باشد [۳، ۸]. نکته دیگری که محوریت اصلی این پروژه محسوب می‌شود وجود تنوع سختی با دامنه پراکندگی فراوان در سطح ژورنال می‌باشد. در ادامه بحث به بررسی پارامترهای متالورژیکی و مکانیکی موثر بر تنوع سختی پرداخته می‌شود. این پارامترها عبارتند از:

- بررسی اثر چگونگی تولید فولاد از نقطه نظر تنوع عدد اندازه دانه

عدم کنترل پارامترهای عملیات حرارتی آستنیت‌زدن فولاد در حین پروسه تولید، منجر به تنوع اندازه دانه ها ( عدد اندازه دانه ASTM ) می‌گردد به گونه ای که عدد اندازه دانه در روتورها بین ۹ - ۵ اندازه گیری و گزارش شده است [۵]. تنوع در ابعاد دانه ها، منجر به تنوع شدت سختی پذیری شده، به گونه ای که برخی از نقاط شفت روتور که دارای ابعاد دانه ای کوچکتری هستند سختی پذیری را کاهش داده و این بدان مفهوم است که حتی با اعمال یک سیستم حرارتی یکسان نسبت به مکانهای دانه درشت فولاد، میزان استعداد فولاد در قسمتهای دانه درشت به ترغیب استحاله های مارتنزیتی به شدت افزایش می‌یابد و برعکس [۳]. این امر که

## ۵- بحث و نتیجه گیری

براساس گزارش ارسالی از نیروگاه و پیگیری های انجام شده در مورد علت حادثه مشاهده می‌شود به علت عدم تشکیل فیلم روغن بین شفت و یاتاقان و اختلال در سیستم روغن رسانی از طریق کاهش جریان روغن شفت روتور ابتدا در تماس مستقیم با بایت یاتاقان قرار گرفته و سپس با از بین رفتن سریع بایت ها ( به دلیل نقطه ذوب پایین )، در معرض تماس مستقیم با فلز یاتاقان بوده است.

در این مرحله هدف آن است تا فعل و انفعالات ایجاد شده در طول رخداد حادثه از نظر متالورژیکی مورد بررسی قرار گیرد. اصطکاک شدید و به دنبال آن افزایش قابل توجه دما در حد ایجاد تغییرات در ریزساختار در حد استحاله فازی در سطح ژورنال روتور ملاحظه می‌شود. با توجه به دیگرام استحاله فازی مربوط به فولاد روتور مزبور، این نوع فولادها در دماهای فراتر از ۷۵۰ درجه سانتیگراد مستعد به تشکیل فاز آستنیت شده و در صورت تشکیل آستنیت، چنانچه شرایط سردکردن برای فولادهای مزبور حتی در هوای عادی محیا شود، استعداد زیادی به ایجاد ساختار مارتنزیتی را خواهند داشت. در این حادثه سطح روتور پس از افزایش قابل توجه دما و توقف اضطراری آن سرد شدن سریع در مجاورت هوا همراه با توده سرد منطقه مجاور را تجربه نموده که باعث تشدید انتقال حرارت از سطح فولاد روتور شده، این امر کمک بسزایی در تشدید شدت سرد کنندگی محیط و به تبع آن ترغیب رخداد استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت را داشته

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- بررسی اثر سرعت سرمایش و تنشهای تماسی و استحاله ای

علاوه بر بررسی اثرات پارامترهای متالورژیکی که در قسمت های قبلی ذکر شد نباید اثرات مکانیکی در این پروژه را نادیده گرفت. در این قسمت عمدتاً پارامترهایی همچون تنشهای استحاله ای ناشی از تغییرات ساختاری در سطح ژورنال و همچنین تنشهای مکانیکی ناشی از سایش مورد بررسی قرار می گیرد. محصول این تنشها ایجاد کار سختی ( Work hardening ) در سطح ژورنال می باشد، بدین صورت که با ایجاد تغییر شکل پلاستیکی موضعی ناشی از تنشهای تماسی در برخی از نواحی ژورنال، نقاط مزبور دچار نوعی تغییر و تحولات ریز ساختاری می شوند. این تغییر و تحولات شامل افزایش عیوب کریستالی نظیر جاهای خالی، نابجائیهها و ... می باشد که محصول نهایی همه عیوب فوق، ایجاد میدانهای تنشی اعم از میدانهای تنشی فشاری و کششی در اطراف خود می باشد، اندرکنش میدانهای تنشی مزبور با یکدیگر اثرات بسزایی بر روی افزایش سختی بر روی ژورنال می گذارد. از مطالب فوق می توان نتیجه گرفت که کاهش سختی در ژورنال پس از عملیات حرارتی تمپرینگ (شکل ۱۰) می تواند متاثر از موارد زیر باشد:

- کاهش و یا خروج اتمهای فوق اشباع کربن از شبکه مارتنزیت در طول عملیات حرارتی تمپرینگ
- کاهش و یا از بین رفتن اعوجاج ایجاد شده در ساختار به هنگام تشکیل مارتنزیت
- کاهش و یا از بین رفتن نابجائیهها و عیوب کریستالی حاصل از شبکه اعوجاج یافته مارتنزیت و به دنبال آن کاهش اثرات کار سختی
- افزایش اندازه رسوبات کاربیدههای آلیاژی [۳].

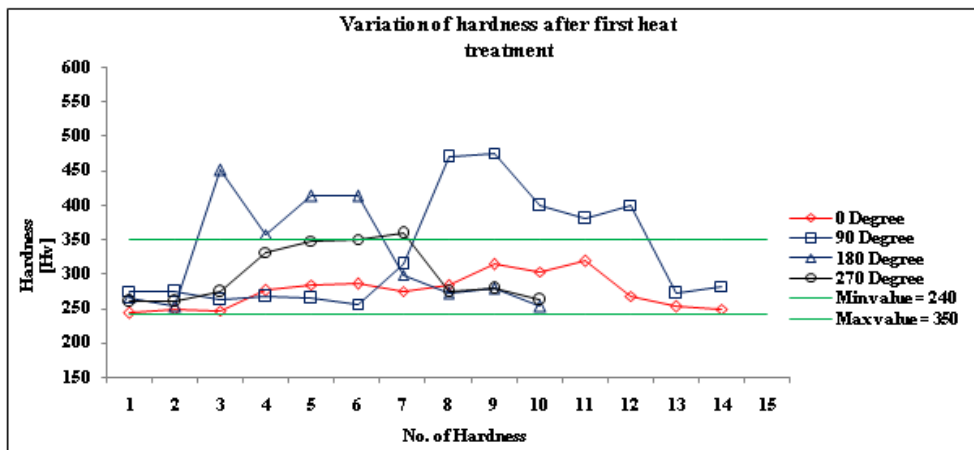
ناشی از عدم کنترل پارامترهای عملیات حرارتی در حین پروسه تولید است در فولادهای روتور به چشم می خورد و می تواند رفتار استحاله ای ژورنال را در قبال این گونه حوادث (سایش ژورنال و افزایش دما و سریع سرد شدن) در مکان های مختلف تحت تاثیر قرار دهد.

#### - بررسی اثر سرعت گرمایش

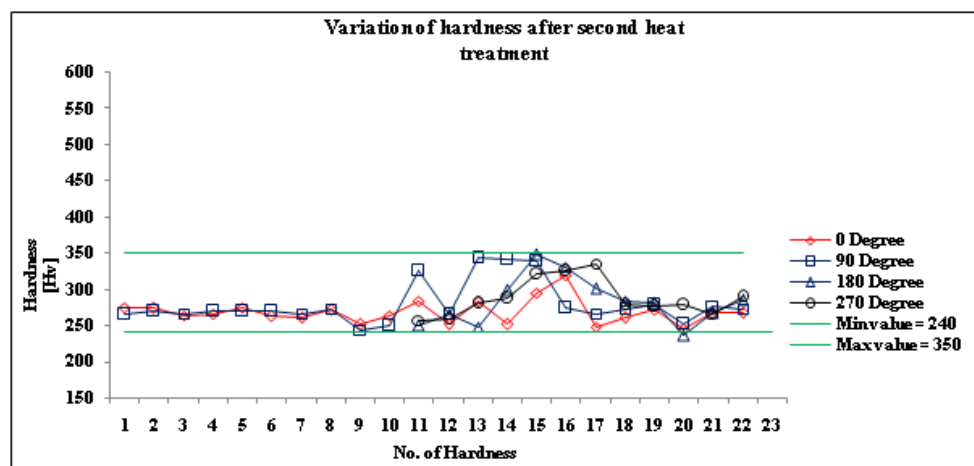
در این بخش، بررسی اثر سرعت گرمایش بر روی دماهای بحرانی و تاثیراتش بر اجزای ریز ساختاری (ذرات کاربیدی) مورد بررسی قرار می گیرد که این پدیده نیز منجر به نوع سختی می شود.

از آنجائیکه در این تحقیق سرعت گرمایش خیلی سریع و زمان توقف در دمای حداکثر، خیلی کوتاه است در نتیجه اثرات استحاله اهمیت پیدا می کند. سرعت گرم شدن بالا باعث می شود استحاله های نفوذی از قبیل تبدیل پرلیت و یا بینیت به آستنیت مشکل شود. اثر سرعت گرم شدن با مقادیر بالاتر را عناصر کاربیدزا از قبیل  $W, V, Mo, Cr$  از بین می برد زیرا این عناصر سرعت نفوذ پایین تری دارند و نفوذ کربن را به تاخیر می اندازند (استحاله نفوذی را کندتر از حد معمول می کنند). از طرف دیگر سرعت گرمایش بالا همراه با زمان توقف کوتاه در دمای بالا باعث تشکیل آستنیت ناهمگن می شود که دلیل این موضوع، انحلال سریع کاربیدهایی از قبیل سمیتیت از پرلیت یا فاز دیگر می باشد. به دلیل عدم فرصت کافی برای نفوذ یا همگن شدن، بعضی از مناطق بطور موضعی غنی از کربن شده و به علت سریع سرد شدن بعدی پس از این حادثه و سختی پذیری بالای این فولاد، این نوع ناهمگنی باعث تشکیل مناطقی با مارتنزیت پرکربن بطور موضعی می شود و به همین دلیل سختی بطور وسیع در منطقه آسیب دیده از پراکندگی زیادی برخوردار است [۷].

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



الف



ب

شکل ۱۰: نمودار تغییرات سختی در محل آسیب دیده پس از عملیات حرارتی تمپرینگ

### ۶- جمع بندی نتایج

نسبت به سایر فولادهای این گروه بالاتر می باشد به همین علت دمای ۶۹۰ درجه سانتی گراد و زمان نگهداری ۵ ساعت به عنوان دما و زمان بهینه جهت ایجاد یک انطباق نسبی سختی بین محل‌های آسیب دیده و سالم می باشد.

۳- از تجارب حاصل از اجرای سیکل‌های مختلف در عملیات حرارتی تمپرینگ چنین نتیجه گیری می شود که افزایش دما و زمان تمپرینگ به ترتیب تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و ۶ ساعت جهت کاهش بیشتر سختی قابل افزایش است (با حفظ سختی سایر نقاط آسیب ندیده در حد قابل قبول).

۱- نتایج حاصل از بررسیها و آزمایشات اولیه (رپلیکا و سختی سنجی) نشان داد که افزایش سختی بحرانی در سطح محل ژورنال ناشی از رخداد استحاله فازی مارتنزیتی می باشد (به دلیل افزایش بیش از حد دما و سرعت سرمایش بیش از حد بحرانی) ولی افزایش سختی موضعی در برخی نقاط در اثر عوارض تنش‌های مکانیکی (سایش) می باشد.

۲- در طول اجرای سیکل عملیات حرارتی تمپرینگ مشاهده می شود که با افزایش دما و زمان میزان سختی روبه کاهش می گذارد ولی در خصوص روتورهای با ترکیب شیمیایی فوق و مقادیر بیش از ۰.۵ درصد وانادیم دمای تمپرینگ

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

### مراجع

- 1) Heat Treater's guide, ASM International, 2<sup>nd</sup> Edition, June 1998
- 2) ASM Handbook, "Heat Treating", Vol. 4, August 1991, PP. 33-34.
- ۳) محمدعلی گل‌عذار، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۷
- 4) ASM Handbook, "Metallography and Microstructures", Vol. 9, March 2000
- 5) R.i.Jaffee, "Rotor forgings for Turbines and Generators", Proceedings of International workshop sponsored by Electric Power Research Institute, California, USA, September, 1980.
- ۶) سید حسن حائریان، "بررسی پارامترهای مؤثر بر عملیات حرارتی فولادهای کم آلیاژی نیکل-کروم-مولیبدن-وانادیم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
- ۷) Viswanathan R.  
Damage Mechanisms and life Assessment of High Temperature Components" ASM International pub 1983.
- 8) ASM International, Light microscopy of carbon steels, August 1999.