

# بررسی علل شکست محور کمپرسورهای نوع Screw

عبدالرضا شهریور و علیرضا عبدالملکی  
پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده حفاظت صنعتی و محیط زیست

## چکیده

برای تولید هوای فشرده در پالایشگاه ها عموماً از کمپرسورهای نوع Screw استفاده می شود. با توجه به مشکلات و از کارافتادگی های متعدد رخ داده برای این کمپرسورها و قیمت بسیار زیاد آنها، در این تحقیق علل از کارافتادگی یکی از این کمپرسورها، مورد بررسی قرار گرفت. در این رویداد، روتور ماده کمپرسور، پس از مدت حدود ۶۰۳ ساعت سرویس دهی دچار شکست شد. این روتورها برای بررسی علت اصلی شکستگی مورد مطالعات متالورژیکی قرار گرفت و مشخص شد که پدیده ای که باعث بروز شکست شده است، پدیده خستگی در اثر اشکال در سیستم خنک کننده بدنه کمپرسور بوده که بر اثر آن، افزایش دما صورت گرفته و دو روتور نر و ماده با یکدیگر درگیر شده و در نتیجه پدیده خستگی اتفاق افتاده است.

## Investigation of the Fracture Causes of the Screw Compressors Shaft

A. Shahrivar & A. Abdolmaleki  
Research Institute of Petroleum Industry  
P.O.Box: 18745-4193, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Screw compressors are used to produce the compressed air in the refineries. Because of the frequent failures and high prices of these compressors, this research was done to determine the failure causes in one of these compressors. In this study and after about 603 working hours, female rotor compressor had been fractured. Metallurgical and other experiments showed that the defect in cooling water system caused increasing the temperature and touching and striking two male and female rotors with each other. Then the fatigue phenomenon and finally the fracture of the female rotor happened.

### مقدمه

به طور کامل تعویض شود و اینکار موجب وارد شدن هزینه های بسیار سنگین مالی به پالایشگاه خواهد شد. قسمت HP کمپرسور مذکور پس از انجام تعمیراتی در سرویس قرار گرفته و بعد از حدود ۷۶ روز کاری به علت شکسته شدن روتور ماده از سرویس خارج شد. لازم به ذکر است که مرحله HP کمپرسور نصب شده از نوع تعمیری بوده است. با توجه به اینکه مرحله HP دارای سه کمپرسور A، B و C بوده و این کمپرسورها به طور همزمان در سرویس قرار نمی گیرند، طبق مدارک موجود، مدت سرویس دهی این سه کمپرسور مطابق با جدول می باشد:

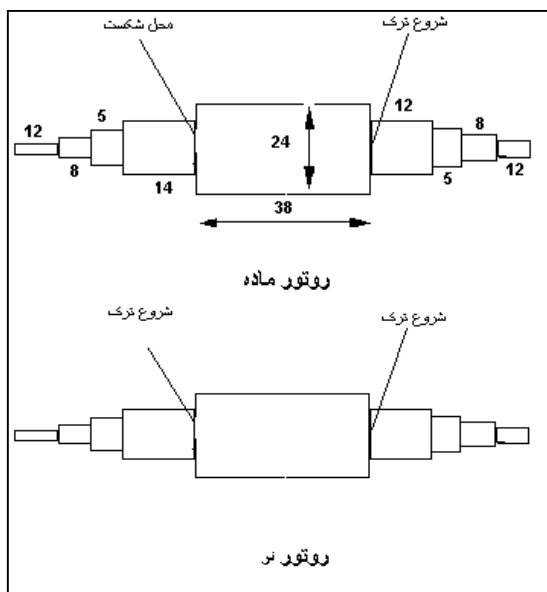
در پالایشگاه های نفت معمولاً برای تهیه هوای فشرده برای مصارف واحدهای دیگر، از تعدادی کمپرسورهای Screw استفاده می شود. هر کدام از این کمپرسورها دارای دو روتور چرخشی Screw، بنام های روتور نر (Male) و روتور ماده (Female) می باشد که به همراه شافت های مربوطه به صورت یکپارچه ساخته شده اند.

این کمپرسورها از دو مرحله با فشار بالا (High Pressure) و فشار پائین (Low pressure) تشکیل شده است. گاهی هنگام تعمیر ممکن است که هر یک از این مراحل HP و LP



**شکل ۱- نحوه قرار گرفتن روتورهای نر و ماده در داخل بدنه کمپرسورهای Screw**

این روتورها از فولاد ساده کربنی ساخته شده است. در شکل ۲ ابعاد شافت و روتورها و نواحی ترک دار و شکسته شده به صورت شماتیکی نشان داده شده است سرعت چرخش روتور نر بین ۳۸۵۰ تا ۵۲۱۵ دور در دقیقه بوده که این معادل با سرعتی بین ۴۶۲۰ تا ۶۲۶۰ دور در دقیقه برای توربین متصل به این کمپرسور می باشد. لازم به توضیح است که کمپرسور مورد بحث این مقاله کمپرسور A مربوط به مرحله HP کمپرسور می باشد. این کمپرسور در تابستان حدود ۶۸۰۰ و در زمستان حدود ۷۷۴۰ مترمکعب هوا در ساعت را فشرده می نماید.



**شکل ۲- ابعاد روتور، شافت ها و محل های ترک دار و شکسته شده (برحسب سانتیمتر)**

**جدول ۱- مدت زمان کارکرد کمپرسورهای A و B و C مرحله HP از زمان تعمیر تا لحظه بروز حادثه**

| کمپرسور | زمان کارکرد برحسب ساعت |
|---------|------------------------|
| A       | ۶۰۳                    |
| B       | ۳۱۲                    |
| C       | ۵۶۷                    |

کمپرسوری که دچار حادثه شده ، کمپرسور A بوده که مجموعاً در مدت ۷۶ روز کاری حدود ۶۰۳ ساعت در سرویس بوده است . براساس اسناد و مدارک مربوط به این کمپرسور ، جنس بدنه (case) از نوع چدن است که به دلیل گرم شدن کل کمپرسور در حین سرویس دهی ، بدنه آن با آب گردشی خنک می شده است. نیروی محرکه اصلی این کمپرسور ها از توربین بخار به روتور نر وارد شده و توسط چرخ دنده هایی که در انتهای روتورها وجود دارد باعث حرکت روتور ماده خواهد شد. در هنگام چرخش این روتورها هیچ گونه تماسی بین روتورهای نر و ماده و بدنه کمپرسور وجود ندارد بنابراین هیچ ماده روان کننده ای نیز بین آنها تزریق نمی شود. فاصله بین دو محور در هنگام چرخش براساس مطالعات صورت گرفته ، تقریباً ۰,۰۱ اینچ و یا ۰,۲۵ میلیمتر می باشد [۱].

### مشخصات فیزیکی و طراحی روتورها

روتور نر (Male) دارای چهار پره و روتور ماده (Female) دارای ۶ فاصله ، مطابق با پره های روتور نر می باشد شکل ۱ این موضوع را بخوبی نشان می دهد .

## مشاهدات ظاهری

محل شکستگی اصلی که باعث از کار افتادن کمپرسور شده است ، دقیقاً در فصل مشترک شافت و روتور ماده در سمت مخالف چرخ دنده اتفاق افتاده است . به عبارت دیگر محل شکست در انتهای آزاد روتور ماده قرار دارد. قطر شافت در محل شکستگی ۱۱ سانتیمتر می باشد. سطح شکسته شده بسیار صاف بوده و عمود بر محور شافت می باشد. در شکل ۳ ، تصویر تهیه شده از محل شکستگی نشان داده شده است:

وجود آورده است. در مشاهدات صورت گرفته از ناحیه قرار گرفتن شافت ها در داخل یا تاقان ها دیده می شود که در این نواحی ، سطح خارجی شافت ها براق و سالم می باشد، به عبارت دیگر هیچ گونه داغ کردگی و یا سیاه شده گی ظاهری در ناحیه مربوط به یاتاقان های روتورهای نر و ماده مشاهده نمی شود. بنابراین احتمال گیر کردن این دو روتور در داخل یاتاقان ها به طور کامل مردود می باشد. از دیگر مشاهدات قابل تعمق در این دو روتور آن است که علاوه



شکل ۴- آثار اکسیداسیون شدید در سطح روتور ها

بر شکستگی اصلی رخ داده در شافت ، در سه ناحیه دیگر اتصال شافت به worm نیز ترک به وجود آمده است ، محل ایجاد این ترکها در شکل شماره ۳ نشان داده شده است . در نمونه برداری به عمل آمده از روتور ماده که در آن شکستگی رخ داده بود، مشاهده شد که در نقطه مقابل محل شکست ، بر روی شافت ترکی به عمق حدود ۱۰ میلی متر به وجود آمده است. در شکل شماره ۵ مقطع عرضی این ترک نشان داده شده است . در محل اتصال شافت به worm در روتور نر نیز در هر دو طرف ، ترک دیده می شود.



شکل ۳- تصویر وضعیت ظاهری روتورهای نر و ماده بعد از انهدام

با مشاهده دقیق سطح شکسته شده، دیده می شود که ناحیه ای نسبتاً خشن ، دقیقاً در مرکز محور وجود دارد که قطر این ناحیه حدود ۳ سانتیمتر است. مشاهده این سطح نشان دهنده آن است که ترک از اطراف محور به طرف مرکز رشد کرده و پس از آنکه قطر باقیمانده شافت به سه سانتیمتر رسیده ، شافت تحمل نیروهای وارده برخورد را نداشته و دچار شکست سریع (Fast Fracture) شده است.

با مشاهده دقیق روتورهای نر و ماده در ناحیه پره دار دیده می شود که آثار بسیار شدیدی از اکسیداسیون و پوسته پوسته شدن دیده می شود. گاهی ضخامت این پوسته ها به حدود دو میلی متر نیز می رسد. در شکل ۴ این موضوع نشان داده شده است. به نظر می رسد که این دو روتور ابتدا با همدیگر درگیر شده و دمای سطح افزایش یافته و سپس اکسیداسیون و پوسته پوسته شدن رخ داده است. این پوسته ها به قدری زیاد است که سبب تغییر شکل و ابعاد در ناحیه پره روتورها شده و آسیب کلی را به

### آزمایش خواص کششی

برای بررسی خواص کششی آلیاژ روتور کمپرسور، سه نمونه در جهت طول شافت روتور با طول gage معادل ۵۰ میلیمتر، بر اساس استاندارد ASTM E8 انتخاب شد. در جدول ۳ نتایج آزمایش کشش نشان داده شده است:

جدول ۳- نتایج آزمایش سه نمونه کشش از آلیاژ روتور کمپرسور

| خواص کششی نمونه | استحکام تسلیم پائینی (Mpa) | حداکثر استحکام کششی (Mpa) | میزان ازدیاد طول نسبی در ۵۰ میلیمتر (%) | میزان کاهش سطح مقطع (%) |
|-----------------|----------------------------|---------------------------|---|-------------------------|
| اول             | ۳۹۸                        | ۵۶۰                       | ۳۰/۴                                    | ۵۷                      |
| دوم             | ۳۱۳                        | ۵۷۰                       | ۲۸/۸                                    | ۵۶                      |
| سوم             | ۳۱۳                        | ۵۸۳                       | ۲۸/۲                                    | ۵۵                      |

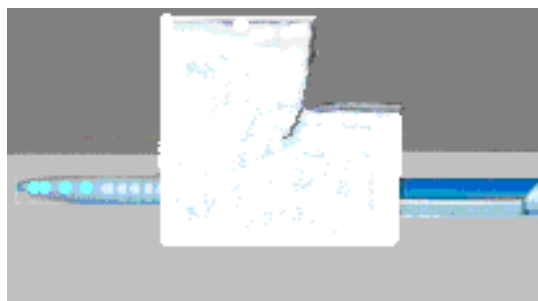
با توجه به جدول ۳ مشاهده می شود که متوسط استحکام تسلیم فولاد به کار رفته در ساخت شافت حدود ۳۰۸ MPa و متوسط استحکام نهایی آن حدود ۵۷۱ MPa می باشد.

### بررسی ریزساختار آلیاژ شافت

به منظور بررسی ریز ساختار میکروسکوپی آلیاژ و نحوه رشد ترک های حادث شده در آن ، نمونه ای از محل ایجاد ترک در نقطه مقابل محل شکست شافت انتخاب شد. در شکل ۶ تصویر این نمونه که مورد آزمایش مایع نافذ (PT) نیز قرار گرفته نشان داده شده است.

### مشاهدات ریزساختاری قبل از اچ کردن

در مشاهدات انجام شده از سطح نمونه قبل از اچ دیده شد که مقدار نسبتاً زیادی ناخالصی در ساختار مشاهده می گردد. در شکل ۶ یک تصویر از نواحی مختلف آلیاژ در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر نشان داده شده است که مقدار زیادی ناخالصی در آن رؤیت می شود. شکل ظاهری این ناخالصی ها اکثراً به صورت بیضی شکل بوده و تعداد محدودی نیز به صورت دایره دیده می شود. به منظور تعیین جنس این ناخالصی ها، از سیستم میکروآنالیز EDS میکروسکوپ الکترونی استفاده شد که در قسمت بعدی توضیح داده می شود. ذکر این نکته ضروری است که وجود ناخالصی در



شکل ۵- مقطع عرضی ترک ایجاد شده در نقطه مقابل محل شکستگی روتور ماده

### آزمایشات و بررسی های انجام شده آنالیز شیمیایی

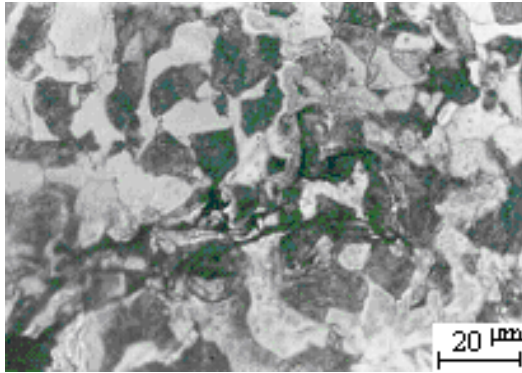
به منظور تعیین نوع گرید آلیاژ به کار رفته در ساخت روتورها ، نمونه ای از روتور ماده انتخاب شد و به روش کوانتومتری اقدام به تعیین جنس آن شد. در جدول ۲ آنالیز شیمیایی آن همراه با استاندارد مربوطه آورده شده است . چنانچه مشاهده می شود نوع آلیاژ روتور مطابق با استاندارد AISI 1040 می باشد که یکی از معمولترین آلیاژهای فولاد ساده کربنی در ساخت شافت ها می باشد.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی شافت روتور در مقایسه با استاندارد AISI (مقادیر باقیمانده مربوط به آهن است)

| عناصر نمونه         | کربن      | سیلیسیم   | منگنز     | کروم | نیکل | فسفر  | گوگرد |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|------|------|-------|-------|
| روتور کمپرسور       | ۰/۴۲      | ۰/۲       | ۰/۷       | ۰/۱۳ | ۰/۰۴ | -     | -     |
| استاندارد AISI 1040 | ۰/۳۷-۰/۴۴ | ۰/۱۰-۰/۰۶ | ۰/۰۶-۰/۰۹ | -    | -    | <۰/۰۳ | <۰/۰۵ |

### آزمایش سختی

به منظور تعیین میزان سختی آلیاژ روتور و تغییرات سختی در سطح و مغز شافت روتور ، اقدام به اندازه گیری عدد سختی به روش HRB شد. نتایج نشان داد که اختلاف قابل ملاحظه ای بین سطح و مغز وجود ندارد. به عبارت دیگر این موضوع نشان دهنده یکسان بودن ریز ساختار سطح و مغز می باشد و همچنین نشان دهنده آن است که هیچ گونه عملیات حرارتی سخت کاری سطح بر روی شافت صورت نگرفته است.



**شکل ۸- نحوه پیشروی ترک در ریزساختار آلیاژ افت کمپرسور با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر محلول اچ نیتال ۲٪**

اگر به شکل ۸ دقت کنید، مشاهده می شود که نحوه رشد ترک در ساختار آلیاژ به صورت درون دانه ای (Transgranular) می باشد. این نحوه پیشروی ترک غالباً مربوط به آلیاژهای داکتیل می باشد. از مشاهده های ریز ساختاری دیگر در این نمونه آن است که هیچ اثری از جوشکاری و یا سخت کردن سطحی در سطح خارجی شافت روتور دیده نمی شود.

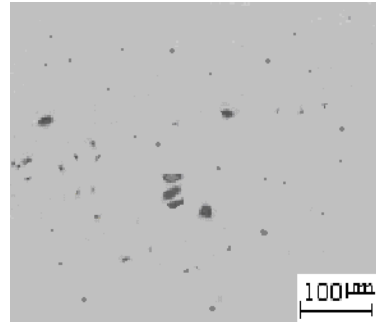
#### **آزمایش مایعات نافذ (P.T.)**

به منظور تشخیص بهتر ترک ها در مناطقی که ترک بر روی شافت به وجود آمده و هنوز به مرحله شکست نرسیده است، از مایعات نافذ استفاده شد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته مشخص شد که در سه محل اتصال شافت به Worm، ترک دیده می شود و این ترکها در سرتاسر محیط شافت وجود دارد. در شکل ۴ مقطع عرضی یکی از این ترکها پس از انجام آزمایش های مایعات نافذ نشان داده شده است و دیده می شود که عمق نفوذ ترک در داخل شافت حدود ۱۰ میلی متر می باشد.

#### **بررسی سطوح شکست**

برای بررسی سطح شکست ایجاد شده در شافت، به دلیل وجود آلودگی های مختلف روی سطح شکست، ابتدا اقدام به تمیزکاری سطح شکست شد. به منظور تمیزکاری سطح شکست، از محلول شش نرمال اسید کلریدریک همراه با بازدارنده هگزا متیل تترا آمین استفاده شد و در دستگاه Ultrasonic Cleaner در

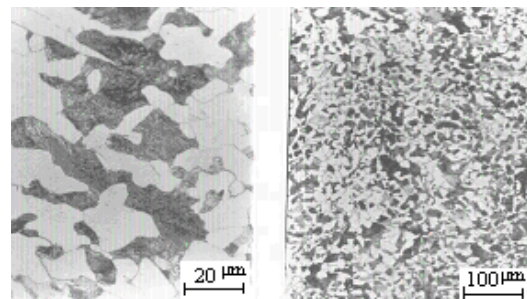
ریزساختار میکروسکوپی آلیاژ باعث تضعیف شدن خواص کششی و بالاخص خواص خستگی خواهد شد. در قسمت بحث و بررسی نتایج این موضوع مورد بحث قرار خواهد گرفت.



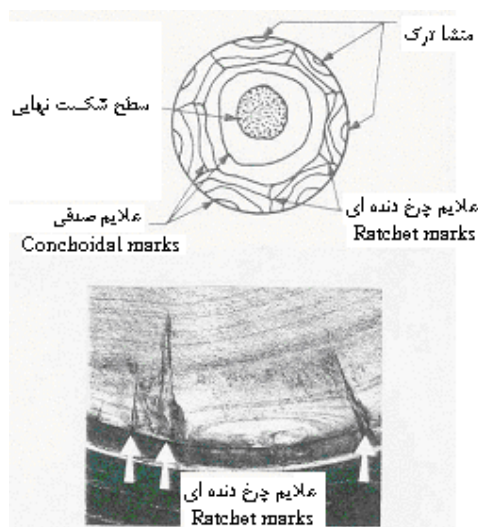
**شکل ۶- ریز ساختار آلیاژ شافت قبل از اچ کردن در بزرگنمایی صدبرابر. این تصاویر وجود مقدار زیادی ناخالصی را در ریز ساختار آلیاژ نشان می دهد.**

#### **مشاهدات ریزساختاری بعد از اچ کردن**

ریزساختار آلیاژ شافت کمپرسور، شامل دانه های فریت و پرلیت بوده که درصد هر یک از این فازها حدود ۵۰٪ می باشد. این ریزساختار برای فولاد AISI 1040 یک ساختار بسیار نرمال بوده و وضعیت دانه ها حاکی از آن است که آلیاژ شافت باید از نوع کار شده (Wrought) باشد. در شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی فولاد شافت در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۵۰۰ برابر و در شکل ۸ نحوه پیشروی ترک در داخل ریزساختار آلیاژ نشان داده شده است.



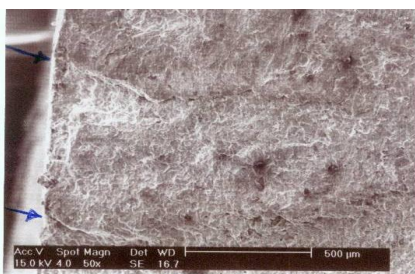
**شکل ۷- ریزساختار میکروسکوپی فولاد به کار رفته در ساخت شافت کمپرسور**



**شکل ۹- علائم چرخ دنده ای (Ratchet Marks) بر روی سطح شکست نمونه ای از فولاد کم آلیاژ**

موجود در آلیاژ و سطح شکسته شده دیده می شود. این ناخالصی ها در ریز ساختار آلیاژ توسط میکروسکوپ نوری نیز دیده می شد. به منظور تعیین جنس این ناخالصی ها تعدادی از آنها انتخاب شد و توسط سیستم میکروپروپ EDS میکروسکوپ الکترونی مورد آنالیز شیمیائی قرار گرفت. در شکل ۱۱ آنالیز تهیه شده از این ناخالصی ها، نشان داده شده است.

همانگونه که از آنالیزهای گرفته شده دیده می شود، عمده عنصر تشکیل دهنده این ناخالصی ها از سیلیسیم، آلومینیوم و اکسیژن می باشد. این بدان معنا است که جنس این ناخالصی ها می تواند  $SiO_2$  و یا  $Al_2O_3$  باشد. همانگونه که در قسمت متالوگرافی دیده شد، شکل ظاهری این ناخالصی ها بیضی شکل و یا گرد می باشد که از مشخصات اصلی ناخالصی های اکسیدی و سیلیکاتی می باشد. لازم به توضیح است که یکی از عمده ترین ناخالصی ها در

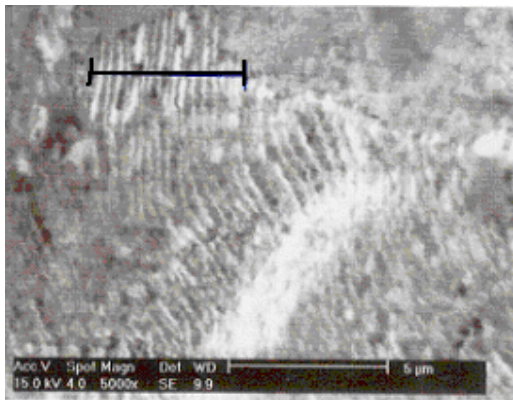


دمای  $30^{\circ}C$  به مدت ۱۴ دقیقه عملیات تمیزکاری سطح شکست صورت گرفت. بررسی سطح شکست در دو مقیاس انجام شد، ابتدا توسط استریومیکروسکوپ که حداکثر قابلیت بزرگنمایی ۶۰ برابر را دارد، یک بررسی کلی بر روی سطح شکست انجام شد. در مشاهدات انجام شده توسط استریومیکروسکوپ علائم چرخ دنده ای (Ratchet Marks) که نشان دهنده محل های جوانه زنی ترک در پیرامون شافت می باشند، قابل رؤیت بود. تمام لبه خارجی سطح شکست به دقت بررسی شد و مشخص گردید که در کل محیط این شافت حدود ۴۰ Ratchet Marks دیده می شود. به عبارت دیگر می توان گفت که حداقل حدود ۴۰ ترک در پیرامون شافت جوانه زده و به داخل مغز شافت پیشروی کرده اند. در شکل ۹ به طور بسیار واضح و مشخص نمونه ای از این علائم به صورت شماتیکی و واقعی برای فولاد کم آلیاژ نشان داده شده است [۳۰].

برای بررسی دقیق سطح شکست از میکروسکوپ الکترونی (SEM)

استفاده شد. نمونه ای از سطح شکست شافت روتور بگونه ای انتخاب شد که از لبه تا مغز شافت در آن دیده می شد. در بررسی های انجام شده با بزرگنمایی های کم، علائم چرخ دنده ای (Ratchet Marks) و ناخالصی های موجود در سطح شکست بخوبی نمایان بود. در شکل ۱۰ تصاویر علائم چرخ دنده ای (Ratchet Marks) دیده می شود و در شکل ۱۱ ناخالصی های

یا محور می باشد [۴]. در بررسی های به عمل آمده در سطح شکست این شافت ، علائم Striations در سه منطقه مختلف (نزدیک لبه، وسط و نزدیک انتهای رشد ترک ) مشاهده شد. در شکل ۱۳ تصویر مربوط به این Striations نشان داده شده است. این علائم در بزرگنمایی های بالا ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر دیده شد. چنانکه در این تصویر دیده می شود متوسط فاصله هر دو Striation حدود ۰/۳ میکرومتر اندازه گیری می شود.



**شکل ۱۳- تصویر striations موجود در سطح شکست نمونه**

### بحث و بررسی نتایج

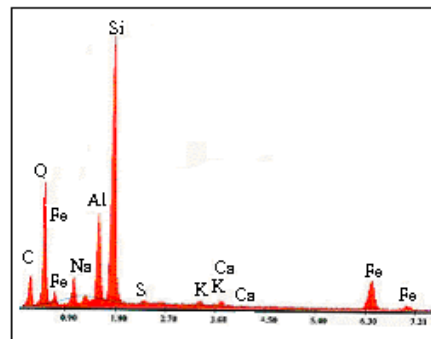
براساس اطلاعات جمع آوری شده ، دیده می شود که روتورهای کمپرسور مذکور تنها پس از فقط ۶۰۳ ساعت سرویس دهی در طی ۷۶ روز کاری دچار شکست شده است . مشاهدات ظاهری سطح شکسته شده حاکی از آن است که ، پدیده ای که سبب بروز شکست در این روتور شده است، پدیده خستگی (Fatigue) می باشد. یکی از مهمترین علائم ظاهری بروز پدیده خستگی صاف بودن سطح شکست و عمود بودن سطح شکست نسبت به محور شافت می باشد ، که در این روتور بخوبی نمایان است. براساس بررسی های میکروسکوپ الکترونی صورت گرفته بر روی سطح شکست ، علائم Striations در نواحی مختلف سطح نمایان شد که از علائم میکروسکوپی بروز پدیده خستگی می باشد. با اساس اندازه گیری های انجام شده بر روی سطح شکست ، ترک به وجود آمده در شافت ، حدود ۴۰ میلی متر به طرف مغز

**شکل ۱۰- تصویر دو علامت چرخ دنده ای ( Ratchet Marks ) بر روی سطح شکست شافت روتور کمپرسور که توسط میکروسکوپ الکترونی SEM گرفته شده است (محل Ratohet Mark با فلش نشان داده شده است )**



**شکل ۱۱- تصاویر ناخالصی های موجود در سطح شکست توسط SEM**

فولادها MnS می باشد. از مشخصات اصلی ناخالصی های سولفیدی آن است که دارای شکل کشیده و کرمی شکل هستند. اما در این آلیاژ وجود ندارد. این موضوع هم از نظر شکل ظاهری ناخالصی ها و هم از روی آنالیزهای صورت گرفته قابل اثبات می باشد.



**شکل ۱۲- آنالیز شیمیایی ناخالصی های موجود در ریزساختار و سطح شکست شافت روتور کمپرسور**

یکی از مهمترین بررسی های شکست شناسی که بر روی سطوح شکست ناشی از پدیده خستگی صورت می گیرد، مشاهده و رؤیت علائمی بنام Striations می باشد. مشاهده این علائم اثبات کننده بروز پدیده خستگی در آلیاژ می باشد. ضمناً بین هر دو Striation نشان دهنده میزان رشد ترک در هر چرخش شافت و

شافت رشد کرده است و پس از آن آلیاژ باقیمانده توانایی تحمل نیروی وارده را نداشته و دچار شکست نهایی شده است. براساس شکست شناسی به عمل آمده در سطح شکست این شافت، دیده شد که متوسط فاصله Striations ها در این آلیاژ حدود  $0.3$  میکرومتر می باشد. به عبارت دیگر، در هر چرخش کامل شافت طول ترک موجود در شافت حدود  $0.3$  میکرومتر پیشروی کرده است. لازم به توضیح است که نرخ رشد ترک در ریزساختار ثابت نبوده و ابتدا بسیار کم و در انتها زیاد می باشد. به طور کلی نرخ رشد ترک در آلیاژها به عواملی چون میزان تنش اعمالی و طول ترک وابستگی شدید دارد. در دو رابطه ذیل نرخ رشد ترک شرح داده شده است.

$$\frac{da}{dN} \propto f(\sigma, a) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^m \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روابط:

$$\frac{da}{dN} = \text{میزان رشد ترک به ازاء هر سیکل}$$

$$\sigma = \text{تنش اعمالی عمود بر صفحه رشد ترک}$$

$$a = \text{طول ترک}$$

$$\Delta K = \text{محدوده ریب شدت تنش } (\Delta K = K_{\max} - K_{\min})$$

$m$  و  $A$  = ثوابت که برای هر آلیاژ متفاوت می باشند.

در فولادها به ازاء هر سیکل نرخ رشد ترک از  $0.1$  میکرومتر ( $10^{-4}$  mm) تا حدود  $0.5$  میلی متر می تواند باشد [۵]. بر اساس محاسبات انجام شده نرخ رشد ترک در این شافت  $0.3$  میکرومتر در هر سیکل اندازه گیری شده است که در مقایسه با سایر فولاد های کربنی از سرعت ترک نسبتاً کمی برخوردار می باشد.

در این شافت پس از جوانه زنی، ترک حدوداً  $40$  میلی متر رشد کرده تا شکست نهایی صورت گرفته است. اگر بخواهیم از لحظه شروع ترک تا لحظه شکست، تعداد سیکل ها را محاسبه کنیم می توان گفت که تعداد کل سیکل های رشد ترک تا لحظه

شکست برابر است با کل طول ترک منجر به شکست تقسیم بر طول رشد ترک در هر سیکل یعنی:

$$\frac{40/0.000 (\mu m)}{133333} = \text{سیکل}$$

$$0.3 (\mu m)$$

به عبارت دیگر در این کمپرسور پس از آنکه اولین جوانه های ترک به وجود آمده است. پس از گذشت حدود  $133333$  سیکل، شکست نهایی انجام شده است. سرعت روتورها در لحظه شکست دقیقاً مشخص نمی باشد، اما براساس مشخصات فنی حداقل و حداکثر سرعت روتورها می تواند به ترتیب  $3850$  و  $5215$  دور در دقیقه باشد. محاسبات نشان می دهد که از زمان شروع اولین ترک در سطح خارجی شافت، حدوداً  $25$  تا  $34$  دقیقه کمپرسور به کار خود ادامه داده و سپس دچار شکست شده است. با قبول این موضوع و همچنین عمر کارکرد این روتورها ( $603$  ساعت پس از راه اندازی و تعمیرات) می توان نتیجه گرفت که به هیچ وجه در ابتدای راه اندازی کمپرسور (پس از تعمیرات) ترکی در شافت وجود نداشته است. زیرا اگر کوچکترین ترکی وجود داشت با توجه به سرعت حرکت روتورها، فقط حداکثر  $25$  تا  $34$  دقیقه بهره برداری از کمپرسور امکان پذیر بود.

در اینجا لازم است که اندکی در خصوص پدیده خستگی و نقش آن در شکست قطعات بحث شود. پدیده خستگی را به جرأت می توان عامل اصلی  $95\%$  شکستهای تجهیزات صنعتی به حساب آورد [۶]. شکست خستگی در فلزات و آلیاژها دارای سه مرحله مختلف می باشد:

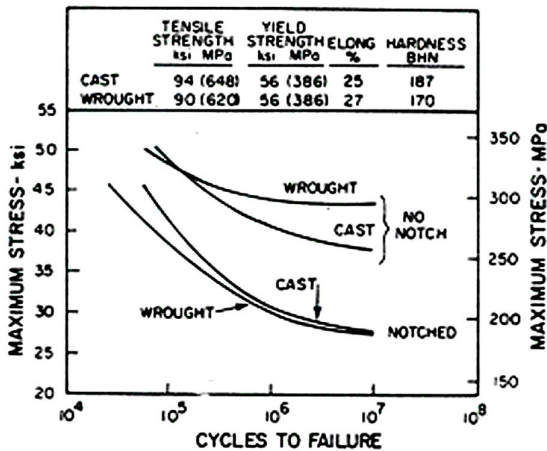
الف- مرحله جوانه زنی ترک (Crack Initiation)

ب- مرحله رشد ترک (Crack Propagation)

ج- مرحله شکست نهایی (Final (Fast) Fracture)

عمر سرویس دهی یک قطعه فلزی که تحت تأثیر نیروهای سیکلی قرار دارد، بستگی به عمر هر یک از این سه مرحله خواهد داشت. مرحله شکست نهایی، همانگونه که از نامش مشخص است، در زمان بسیار اندکی انجام می گیرد. در واقع می توان گفت که شکست به صورت آنی انجام می شود و عملاً عمری برای این مرحله نمی توان فرض نمود. عمر قطعات تحت پدیده





### نمودار ۱ - منحنی خستگی فولاد AISI 1040 در حالت‌های مختلف

نامحدود داشته باشد، باید حد خستگی آن مشخص شده و سعی شود که در عمل، کمتر از آن نیرو اعمال شود.

با توجه به آنکه در مدارک و مشخصات فنی این کمپرسورها، عمر مشخص و محدودی برای سرویس دهی آنها در نظر گرفته نشده است، همچنین با توجه به آنکه غالباً عمر این روتورها بسیار طولانی است لذا به نظر می رسد که تنش اعمالی در حین سرویس دهی باید کمتر از حد خستگی آلیاژ به کار رفته در ساخت روتورها باشد. بر اساس خواص مکانیکی به دست آمده از آزمایش ها صورت گرفته بر روی شافت روتورها، با اندکی تقریب می توان گفت که حد خستگی آلیاژ مورد استفاده در ساخت روتورها ۲۷۰ MPa می باشد.

بر اساس توضیحات بالا و با توجه به طراحی روتورها که در زیر حد خستگی بوده است می توان نتیجه گرفت که عمر خستگی روتورها پایان نمی یابد و تا بی نهایت ادامه خواهد داشت. اما بر اساس آزمایش ها و مشاهدات صورت گرفته، نتیجه شده است که علت اصلی شکست روتورها، بروز پدیده خستگی می باشد. در مجموع می توان نتیجه گرفت که در سرویس دهی این روتورها، مشکلی بروز کرده است که سبب کاهش عمر خستگی روتورها شده است. به طور کلی مشکلاتی که می تواند عمر خستگی یک آلیاژ مهندسی را کاهش دهد، عبارتند از:

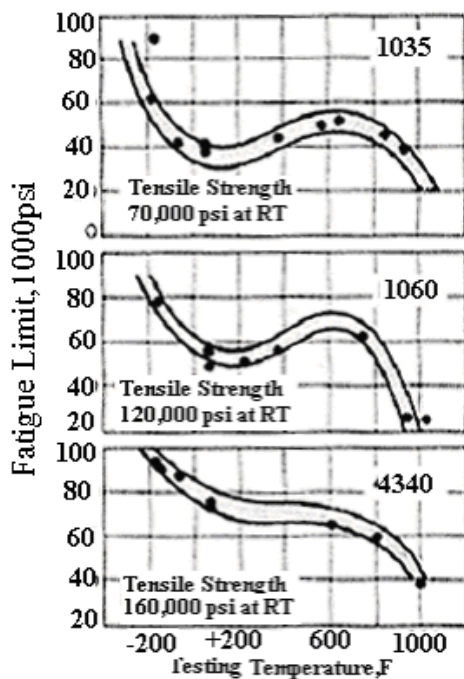
خستگی، در مرحله رشد ترک، محدود بوده و شدیداً بستگی به میزان تنش اعمالی بر قطعه دارد. همانگونه که بحث شد در فولادهای کربنی در هر سیکل اعمال نیرو، طول ترک می تواند در حدود  $10^{-4}$  تا  $10^{-5}$  میلی متر افزایش یابد. بنابراین عمر قطعه فلزی، در حین رشد ترک، محدود بوده و در مقایسه با کل عمر قطعه بسیار کم خواهد بود. در این روتورها، دیده شد که عمر مرحله رشد ترک خستگی حدود ۲۵ تا ۳۴ دقیقه بوده است. با توضیحات ارائه شده می توان نتیجه گرفت که تقریباً عمر خستگی یک قطعه فلزی رابطه مستقیمی با عمر مرحله جوانه زنی ترک دارد. به عبارت دیگر عمر مرحله جوانه زنی ترک بسیار طولانی است و تقریباً با عمر سرویس دهی قطعه فلزی برابری می کند.

### اصول حاکم بر طراحی قطعات تحت خستگی

در هنگام انتخاب تمامی فلزات و آلیاژهای مهندسی که تحت نیروهای سیکلی و یا چرخشی قرار دارند باید به خواص خستگی آنها توجه کافی شود. به طور طبیعی هر آلیاژ مهندسی دارای یک منحنی خستگی می باشد. در این منحنی رابطه بین تنش اعمالی و عمر سرویس دهی آن آلیاژ نشان داده می شود. در نمودار ۱ منحنی خستگی برای فولاد AISI 1040 (که در واقع همان آلیاژ به کار رفته در ساخت روتور می باشد) نشان داده شده است [۷]. همانگونه که در نمودار ۱ نشان داده شده است، برای تمامی فولادها و نیز فولاد AISI 1040 این منحنی موازی محور افقی شده است به عبارت دیگر در تنشهای کمتر از تنش مشخصی که به آن حد خستگی (Fatigue Limite) گفته می شود، فولاد می تواند بی نهایت سیکل اعمال نیرو را تحمل کند و دچار شکست نشود. مثلاً برای فولاد AISI 1040 در حالت کار شده (Wrought) و بدون شیار سطحی، این حد خستگی حدود ۳۰۰ MPa می باشد. در تنشهای زیر ۳۰۰ MPa، فولاد مزبور به هیچ وجه بر اثر پدیده خستگی شکسته نخواهد شد. در طراحی و انتخاب آلیاژ مناسب برای جلوگیری از شکستهای خستگی، اطلاع از میزان حد خستگی آلیاژ، یک امر حیاتی است. اگر بخواهیم یک شافت و یا محور، عمر بسیار طولانی و عملاً

می شود. در نمودار ۲ اثر افزایش درجه حرارت بر روی حد خستگی سه فولاد 1035 ، 1060 ، 4340 نشان داده شده است [۸].

براساس آزمایشات متالوگرافی انجام شده، مشخص شد که در سطح خارجی شافت روتور شکسته شده اثری از تغییر خواص متالورژیکی سطح دیده نمی شود. بنابراین می توان گفت که سطح این شافت (بخصوص در نواحی ترکدار) از ابتدای سرویس دهی تا لحظه شکست، تغییرات متالورژیکی خاص و قابل مشاهده ای نداشته است و این عامل نیز نمی تواند علت اصلی شکست شافت باشد.



### نمودار ۲ - اثر افزایش درجه حرارت بر روی حد خستگی سه فولاد مختلف کربنی

همانگونه که در نمودار ۲ دیده می شود، در فولادهای ساده کربنی مثل 1060 و 1035 AISI، صرفاً در محدوده دمایی ۹۳°C تا ۳۱۵ مقدار کمی حد خستگی افزایش نشان می دهد که امر به دلیل بروز پدیده Strain aging در فولادهای ساده کربنی می باشد [۸]. در فولادهای آلیاژی و یا کم آلیاژ چنانچه دما

الف- افزایش تنش اعمالی به بیش از حد خستگی

ب- تغییر خواص متالورژیکی سطح شافت و یا محور

ج- افزایش درجه حرارت سرویس دهی

در ادامه در خصوص هر یک از این مشکلات توضیحاتی ارائه می شود.

چنانچه به هر علتی تنش اعمالی بر روی محورها و شافت ها افزایش یابد و از حد طراحی و یا حد خستگی فراتر رود، عمر خستگی آلیاژ محدود خواهد شد. براساس نمودار ۱ رابطه بین تنش اعمالی و عمر سرویس دهی به صورت لگاریتمی بوده و با افزایش مقدار کم تنش، عمر خستگی به شدت محدود خواهد شد. از عواملی که می تواند سبب افزایش تنش بر روی محورها و یا شافت ها می شود، می توان درگیر بودن با یاتاقان ها، وجود جسم خارجی، غیربالانس بودن محور و سرعت غیرمجاز را نام برد. در خصوص روتورهای کمپرسور مورد بحث، می توان افزایش تنش اعمالی را کاملاً مردود اعلام دانست زیرا:

۱- یاتاقان ها کاملاً سالم بوده و درگیری وجود نداشته است.

۲- به دلیل فیلتر شدن هوا و عدم مشاهده آثاری از برخورد جسم خارجی در ناحیه worm روتورها، درگیر شدن دو روتور بر اثر جسم خارجی کاملاً منتفی است.

۳- لرزه نگاری های صورت گرفته حاکی از بالانس بودن روتورها در حین سرویس دهی، می باشد.

۴- بر اساس مدارک موجود در این کمپرسورها هیچ گونه افزایش سرعتی (over speed) صورت نگرفته است.

خواص خستگی شافت ها و محورها شدیداً بستگی به خواص متالورژیکی سطحی آنها دارد، زیرا تمام ترکهای خستگی از سطح و یا اندکی زیر سطح آغاز می شود، بنابراین هر عاملی که سبب تضعیف خواص سطحی گردد می تواند باعث کاهش شدید عمر خستگی را ایجاد کند. مثلاً انجام عملیات حرارتی های سطحی غیرصحیح، جوشکاری و یا ایجاد شیارهای سطحی می تواند موجب تغییر خواص متالورژیکی سطح شافت ها و یا محورها باشد. به طور کلی افزایش درجه حرارت در تمامی فلزات و آلیاژها سبب افت خواص مکانیکی همچون استحکام کششی، سختی، خزش و خستگی خواهد شد، اما باعث افزایش داکتیلیته آلیاژها

از  $315^{\circ}\text{C}$  فراتر رود، مقاومت به خستگی این فولادها به شدت کاهش خواهد یافت و شافت ها و محورهای تحت خستگی سریعاً دچار شکست خواهند شد. یکی دیگر از اثرات مخرب افزایش درجه حرارت بر روی خواص خستگی آلیاژهای مهندسی آن است که، با افزایش درجه حرارت، بر اثر اکسیداسیون موضعی مرزخانه های آلیاژ، جوانه زنی ترکهای خستگی به شدت تسریع خواهد شد و این امر می تواند به شدت بر روی عمر خستگی آلیاژهای مهندسی تأثیر بگذارد [۹].

در رابطه با کمپرسور مورد مطالعه، همانگونه که در قسمت مقدمه آمد، فاصله بین دو روتور نر و ماده در ناحیه worm بسیار کم می باشد و به هیچ وجه نباید این دو روتور با یکدیگر تماس برقرار کنند. بر اساس مرجع [۱] فاصله تقریبی این روتورها در اینگونه کمپرسورها حدود  $0.25$  میلی متر می باشد. با توجه به رابطه (۳)  $\Delta L = L\alpha.\Delta T$  و با عنایت به ابعاد روتور در ناحیه worm ملاحظه می شود که چنانچه دمای روتورها فقط  $55^{\circ}\text{C}$  افزایش یابد، تماس دو روتور نر و ماده کمپرسور با یکدیگر بیشتر شده و در نتیجه اصطکاک زیادی به وجود می آید که خود سبب افزایش بیش از پیش دمای روتورها خواهد شد. بر اساس مشاهدات ظاهری به عمل آمده بر روی پوسته های اکسیدی تشکیل شده در سطح ناحیه worm روتورها و به دلیل ضخامت زیاد این پوسته ها، می توان گفت که دمای سطح روتورها بسیار بالا رفته است و شاید حتی به حالت سرخی رسیده باشد. با درگیر شدن دو روتور به دلیل افزایش درجه حرارت، دو مشکل اساسی به وجود می آید، یکی آنکه درگیر شدن دو روتور باعث افزایش تنش اعمالی شده و بنابراین عمر خستگی کاهش خواهد یافت و دیگر اینکه افزایش حرارت شدیداً باعث کاهش حد خستگی آلیاژ شده و عمر خستگی را کاهش می دهد. بروز هر دو پدیده فوق به طور همزمان، سبب خواهد شد که جوانه زنی ترک بسیار سریع آغاز شود و به داخل شافت روتور پیشروی کند. همانگونه که بحث شد، پس از شروع ترک، این روتورها حداکثر ۲۵ تا ۳۴ دقیقه می توانند به سرویس خود ادامه دهند و سپس شکسته خواهند شد.

بر اساس مطالب عنوان شده و بررسی های صورت گرفته، می توان علت اصلی شکست این روتورها را ابتدا درگیر شدن دو روتور با یکدیگر و سپس افزایش درجه حرارت غیر عادی آنها و همچنین اکسیداسیون موضعی مرزخانه ها و ایجاد جوانه های ترک و پیشروی ترکها در داخل شافت روتور دانست. اما علت درگیر شدن دو روتور با یکدیگر را می توان در سه عامل جستجو کرد: الف- خراب شدن یاتاقان ها و غیر بالانس شدن روتورها در محل خود.

ب- ورود ذرات به داخل کمپرسور به گونه ای که امکان درگیری دو روتور با هم فراهم شود.

ج- اشکال در سیستم خنک کننده بدنه کمپرسور

در قسمت بحث و بررسی، به دلایل مختلف مطرح شد که دو علت الف و ب کاملاً مردود است و بنابراین علت اصلی درگیر شدن دو روتور کمپرسور را می توان به اشکال در سیستم خنک کننده بدنه کمپرسور نسبت داد.

### پیشنهادات

به منظور افزایش عمر سرویس دهی روتورهای این گونه کمپرسور ها، رعایت موارد ذیل پیشنهاد می شود:

الف- از انجام هر گونه اصلاح و تعمیراتی در ناحیه شافت روتورها به روش جوشکاری شدیداً پرهیز شود.

ب- در هنگام تعمیرات کمپرسورها، ناحیه فصل مشترک شافت و worm از نظر وجود ترک به روش غیرمخرب UT و یا MT مورد بازرسی دقیق، قرار گیرد.

ج- از افزایش سرعت روتورها بیش از حد مجاز جداً جلوگیری شود.

د- از مناسب بودن سیستم خنک کننده، اطمینان حاصل کرد و بهتر است که برای جلوگیری از افزایش درجه حرارت، سیستم هشدار دهنده مناسب نصب شود.

### نتیجه گیری نهایی

## منابع

- [1].H.P. Bloch and F.K. Geitner, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting , Second Ed. , Gulf Publishing Co., PP.645, 1994.
- [2]. Failure Analysis and Prevention , Vol. 11, ASM Handbook , ASM, PP.628,2002.
- [3]. C.R.Brooks and A. Choudhury, Metallurgical Failure Analysis , Mc Graw-Hill, PP.238, 1993.
- [4].R.M.Pelloux and A.S. Warren , Fatigue Striations and Failure Analysis, International Conference and Exhibits on Failure Analysis, 8-11, Canada, PP. 45-49 ,July 1991.
- [5].R.W.Hertzberg,Deformation and Fracture Mechancics of Engineering Materials , John Wiley and Sons Inc, 1996.
- [6]. G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy , Second Ed. , Mc Graw- Hill, PP.447-448 ,1976.
- [7]. H.E. Boyer, Atlas of Fatigue Curves, Second Printing , ASM ,PP.73 ,1986.
- [8]. Properties and Selection of Metals , Vol 1, Metals Handbook , 8th Ed ., ASM, PP-447 ,1961.
- [9]. R.E.Peterson, Fatigue of Metals in Engineering and Design , Sec. Ed , ASTM , PP-447 ,1963.

