



Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal

<http://masm.araku.ac.ir>

ISSN: 2783-4220



Experimental study and examination of failure zone factors and causes of destruction of thick metal sheets of rail cranes: mechanical properties, chemical analysis and metallography

Saeid Nickabadi ^{a*}, Hossein Rostami ^b, Seyed Hasan Bathaee ^c

^{a*} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Imam Khomeini Maritime Sciences, Nowshahr, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology (NIT), Babol, Iran

^c Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Nickabadi S, Rostami H, Bathaee S H. Experimental study and examination of failure zone factors and causes of destruction of thick metal sheets of rail cranes: mechanical properties, chemical analysis and metallography. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(2):267-285.

 <https://10.52547/masm.3.2.267>

KEYWORDS

Thick metal sheet, Rail crane,
Failure zone,
Stress relief,
Mechanical properties.

ABSTRACT

In this research, several samples of thick sheet metal from the fracture area and its surroundings related to a crane have been examined and studied in order to investigate the causes of destruction in this research. The studied sample is related to a German-made rail crane that was built in 1974. In order to investigate the causes of destruction, first the fracture surface and the external surface of the sample were studied by a stereo microscope. Then, the chemical analysis of the sample was determined by the emission spectroscopy method. In order to investigate the microstructure, metallographic samples were prepared from a cross section and studied by an optical microscope. To determine the mechanical properties, hardness and tensile tests were performed at ambient temperature. To complete the studies, the fracture surface was examined by scanning electron microscope. Based on the studies conducted and the results obtained from the experiments, the main cause of failure is fatigue corrosion. Relatively deep corrosion pits on the surface along with surface cracks in the uncovered areas indicate the occurrence of corrosion, which has led to failure by considering the service time, the presence of working stresses (mainly cyclical) and overload conditions at certain times.

Extended Abstract

1. Introduction

Probabilistic methods to evaluate the reliability of structures have attracted a lot of attention in the past decades. But in the field of engineering, since the mid-80s, most of the researches have been directed towards its application in marine structures and bridges under random loads. The development of laboratory methods has led to the improvement of the results related to the measurement of crack growth under laboratory conditions, and the development of technology has helped to measure cracks in the real structure. At the same time, the advances in numerical tests, especially the efforts related to the reliability of structures for cumulative damage problems under time-varying loads, have made it possible to determine the fatigue assessment in the form of reliability [1-5].

* Corresponding author. Tel.: 09113853694

E-mail address: saeidnickabadi@gmail.com

DOI: <https://10.52547/masm.3.2.267>

Received: August 11, 2023; Received in revised form: September 04, 2023; Accepted: September 19, 2023

© Author



In the following years, this method was used by the designers of marine structures in order to estimate the remaining fatigue life and also to determine the schedule for periodic visits [6]. In the last decade, there has been a significant interest in adapting and applying these methods to steel bridges, thus focusing on girders and sheet-girder structures under traffic loads [7]. The nature of live load in bridges is significantly different from wave loading in marine structures, and this difference has led to revisions in the formulation of reliability problems, along with these developments, improved fatigue and failure assessment methods for various structures such as nuclear power plants [8] and ships [9] were presented. Another factor that caused interest in the topic of fatigue design and its evaluation was due to the writing of a new generation of regulations at the national and international level, for example, a copy of the European regulations for fatigue design was prepared [10] and at the same time other documents were also prepared in order to replace The fracture mechanics evaluation methods were updated [11]. Both among the regulatory bodies and among the owners and executives, the need to introduce probabilistic methods for predicting the fatigue life was felt. In this context, the significant efforts of the joint committee of safety devices in the development of the probabilistic model regulations [12] should be mentioned.

A failure analysis process is almost an art derived from a science; Because the analysis may be based on the analyst's ability to detect important symptoms, this hypothesis is strengthened when two analysts provide two different conclusions about the same incident [13], component failure may be influenced by one of the four design factors of the manufacturing process materials and Incorrect use or a combination of any of these factors occurs, therefore, the purpose of investigating the cause of parts failure is to identify each of the aforementioned factors and as a result, eliminate the defects and deficiencies that have arisen. On the other hand, the severity of the impact of these factors will vary depending on the use of the part and the type of loads applied to it. One of these factors is caused by practically 90% of all mechanical failures. It is fatigue that occurs under an intermittent stress. The value of this stress is so small that it is located in the elastic region in non-cyclic loading and does not cause failure. In fact, this phenomenon is a failure process caused by the growth of cracks caused by periodic stress and can lead to sudden failures. The failure of crankshafts is usually caused by bending fatigue, torsional fatigue or a combination of the two. The stresses caused by cyclic bending during its rotation or the misalignment between the main journals and the torsion caused by the transmission of power by the shaft can all cause the initiation and growth of cracks. Some axial and torsional vibrations are also created under certain conditions and should be considered in determining the cause of failure, although vibration has an important role in failure analysis, but it is usually ignored. A vibration absorber can prevent damage caused by vibration [14]. Cracks caused by bending fatigue usually start from the throat area, and special lubrication holes can change their path. The oil hole is not the source of failure, but it is a place of stress concentration where the cracks meet. Cracks caused by torsional fatigue in the journals and the spiral around them. They start with an angle of about 45 to the axis of the shaft [15]. Another possibility of cracking in the throat area is local carbon burning caused by grinding when reducing the diameter of the crankshaft. Or it may be that very brittle martensite is formed in these surfaces and the cracks start from there [16]. Other factors affecting the failure of the crankshaft are: improper radius defects, insufficient lubrication throat, and foreign particles torn from the crankshaft [17]. When microstructural defects or inclusions are not observed, it can be concluded that the failure is probably caused by external factors and is not due to the existence of an intrinsic internal defect, but if internal defects are observed, it is important to address their role [18]. A complete understanding of the effects of inclusions on crack initiation and fatigue limit has not yet been achieved because the effect of inclusions on the fatigue properties of steel depends on various factors such as the chemical composition, size, distribution and shape of the inclusions, the adhesion of the inclusions to the substrate and the elastic constant of the inclusions and the substrate. Sulfide inclusions are drawn during deformation such as rolling or forging. The destructive effects of these stretched inclusions on mechanical properties are much greater, especially when the direction of stress is perpendicular to the stretching direction of the inclusions [19].

2. The sample

Some samples of thick metal sheets from the fracture area and its surroundings related to a crane have been examined and studied in order to investigate the causes of destruction in this research. The studied sample is related to a German-made rail crane that was built in 1974. Figures 1 and 2 show a picture of the studied samples and their failure level.



Figure 1 The sample studied in the current research



Figure 2 A view of the fracture surface of the studied sample

In order to investigate the causes of destruction, first the fracture surface and the external surface of the sample were studied by a stereo microscope. Then, the chemical analysis of the sample was determined by the emission spectroscopy method. In order to investigate the microstructure, metallographic samples were prepared from a cross section and studied by an optical microscope. To determine the mechanical properties, hardness and tensile tests were performed at ambient temperature. To complete the studies, the fracture surface was examined by scanning electron microscope.



مطالعه تجربی و بررسی عوامل منطقه شکست و علل تخریب ورقه‌های فلزی ضخیم جرثقیل ریلی: خواص مکانیکی، آنالیز شیمیایی و متالوگرافی

سعید نیک‌آبادی^{الف*}، حسین رستمی^ب، سید حسن بطحائی^ج

^{الف*} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی، نوشهر، ایران، saeidnickabadi@gmail.com
^ب دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، Hoseinrostami133@yahoo.com
^ج کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، h.bathae@modares.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این پژوهش، چندین نمونه ورق فلزی ضخیم از منطقه شکست و اطراف آن مربوط به یک جرثقیل جهت بررسی علل تخریب مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه مورد بررسی مربوط به یک جرثقیل ریلی ساخت آلمان است که در سال ۱۹۷۴ ساخته شده است. جهت بررسی علل تخریب، ابتدا سطح شکست و سطح خارجی نمونه توسط میکروسکوپ استریو مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، آنالیز شیمیایی نمونه توسط روش طیف‌سنجی نشری تعیین شد. جهت بررسی‌های ریزساختاری، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی تهیه شد و توسط میکروسکوپ نوری مطالعه شد. جهت تعیین خواص مکانیکی، آزمون‌های سختی سنجی و کشش در دمای محیط انجام شد. جهت تکمیل مطالعات، سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید. بر اساس مطالعات انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، عامل اصلی شکست، خوردگی خستگی است. حفره‌های نسبتاً عمیق خوردگی در سطح به همراه ترک‌های سطحی در نواحی بدون پوشش نشان‌دهنده وقوع خوردگی است که با در نظر گرفتن زمان سرویس، وجود تنش‌های کاری (عمدتاً سیکلی) و شرایط بارگذاری بیش‌ازحد مجاز در مقاطع زمانی خاص منجر به شکست شده است.</p>	<p>ورقه ضخیم فلزی، جرثقیل ریلی، منطقه شکست، تنش کاری، خواص مکانیکی.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸</p>

۱- مقدمه

روش‌های احتمالاتی به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها در دهه‌های گذشته توجه زیادی را معطوف به خود ساخته است. اما در حوزه مهندسی، از اواسط دهه ۸۰ میلادی به بعد بیشتر پژوهش‌ها به سمت کاربرد آن در سازه‌های دریایی و پل‌ها تحت بارهای تصادفی سوق پیدا نموده است. پیشرفت روش‌های آزمایشگاهی منجر به بهبود یافتن نتایج مربوط به اندازه‌گیری رشد ترک تحت شرایط آزمایشگاهی شده و پیشرفت فناوری کمک به اندازه‌گیری ترک‌ها در سازه واقعی شده است. هم‌زمان پیشرفت‌هایی که در آزمون‌های عددی به‌ویژه تلاش‌های مربوط به قابلیت اطمینان سازه‌ها برای مسائل آسیب تجمعی تحت بارهایی که با زمان تغییر می‌کنند صورت گرفته است، امکان تعیین ارزیابی خستگی در قالب قابلیت اطمینان را فراهم نموده است [۱-۵]. در سال‌های بعد این روش توسط طراحان سازه‌های دریایی به‌منظور تخمین عمر باقی‌مانده خستگی و همچنین مشخص نمودن برنامه برای بازدیدهای دوره‌ای به کار گرفته شد [۶]. در دهه گذشته علاقه قابل توجهی برای ایجاد سازگاری و

به‌کارگیری این روش‌ها در پل‌های فلزی پدیدار شد، بنابراین تمرکز بر روی شاه‌تیرها و سازه‌های تیر ورقی تحت بارهای ترافیکی بیش از گذشته به وجود آمد [۷]. ماهیت بار زنده در پل‌ها به میزان قابل‌توجهی با بارگذاری موج در سازه‌های دریایی متفاوت است و این تفاوت منجر به تجدیدنظر در فرمول‌بندی مسائل قابلیت اطمینان گشت. هم‌زمان با این پیشرفت‌ها روش‌های بهبودیافته‌ای برای خستگی و ارزیابی شکست برای سازه‌های گوناگون مانند نیروگاه‌های هسته‌ای [۸] و کشتی‌ها [۹] ارائه شد. عامل دیگری که موجب علاقه‌مندی در مبحث طراحی خستگی و ارزیابی آن شد ناشی از نگرش نسل جدیدی از آئین‌نامه‌ها در سطح ملی و بین‌المللی بود به‌عنوان مثال نسخه‌ای از آئین‌نامه اروپا برای طراحی خستگی آماده شده [۱۰] و هم‌زمان سایر مدارک نیز به‌منظور جایگزینی روش‌های ارزیابی مکانیک شکست به‌روز شد [۱۱]. چه در میان نهادهای نظارتی و چه در میان مالکین و مجریان نیاز به معرفی روش‌های احتمالاتی برای پیش‌بینی عمر خستگی احساس می‌شد در این زمینه باید تلاش‌های قابل‌توجه کمیت‌مشارک ایمنی سازه‌های در پیشرفت آئین‌نامه مدل احتمالاتی [۱۲] ذکر شود.

یک فرآیند تحلیل خرابی تقریباً یک هنر برگرفته از علم است؛ زیرا تحلیل ممکن است مبتنی بر توانایی تحلیل‌گر در تشخیص علائم مهم باشد. این فرضیه زمانی تقویت می‌شود که دو تحلیل‌گر درباره یک حادثه دو نتیجه‌گیری متفاوت ارائه می‌دهند [۱۳]. خرابی قطعات ممکن است تحت تأثیر یکی از چهار عامل طراحی مواد، فرآیند تولید، استفاده نادرست یا ترکیبی از هر یک از این عوامل رخ دهد لذا هدف از بررسی علت شکست قطعات مشخص نمودن هر یک از عوامل مزبور و در نتیجه رفع نواقص و کاستی‌های به وجود آمده است. از طرفی شدت تأثیر این عوامل بسته به کاربرد قطعه و نوع بارهای اعمالی بر آن متفاوت خواهد بود. یکی از این عوامل که عملاً ۹۰٪ تمام خرابی‌های مکانیکی نیز ناشی از آن می‌شود؛ خستگی است که تحت یک تنش تناوبی اتفاق می‌افتد. مقدار این تنش به قدری کوچک است که در بارگذاری غیرسیکلی در ناحیه الاستیک واقع شده و باعث خرابی نمی‌گردد. در واقع این پدیده یک فرآیند خرابی است که توسط رشد ترک‌های ناشی از تنش تناوبی ایجاد شده و می‌تواند منجر به خرابی‌های ناگهانی شود. شکست میل‌لنگ‌ها معمولاً توسط خستگی خمشی، خستگی پیچشی یا ترکیبی از این دو اتفاق می‌افتد تنش‌های ناشی از خمش سیکلی در طی چرخش آن یا وجود عدم هم‌راستایی بین محورهای اصلی و پیچش ناشی از انتقال قدرت توسط میل‌همگی می‌توانند باعث شروع و رشد ترک شوند هر چند ارتعاشات محوری و پیچشی نیز تحت شرایط خاصی ایجاد شده و باید در تعیین علت خرابی مورد توجه واقع شوند هر چند ارتعاش دارای نقش مهمی در تحلیل خرابی است لکن معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود یک جاذب ارتعاش می‌تواند جلوی خسارات ناشی از ارتعاش را بگیرد [۱۴]. ترک‌های ناشی از خستگی خمشی معمولاً از ناحیه گلوبی آغاز می‌شوند و حفرات مخصوص روغن کاری می‌توانند مسیر آن‌ها را تغییر دهند حفره روغن منشا شکست نیست اما یک محل تمرکز تنش است که ترک‌ها در آنجا به همدیگر می‌رسند ترک‌های ناشی از خستگی پیچشی در حلزونی اطراف آن‌ها با زاویه حدود ۴۵ نسبت به محور میل شروع می‌شوند [۱۵]. یکی دیگر از احتمالات ایجاد ترک در ناحیه گلوبی ایجاد کربن سوزی موضعی ناشی از سنگ زدن هنگام کاهش قطر میل‌لنگ است. یا اینکه ممکن است در این سطوح مارتنزیت بسیار ترد ایجاد شده و ترک‌ها از آنجا شروع شوند [۱۶]. عوامل دیگر موثر در شکست میل‌لنگ عبارتند از: عیوب شعاع نامناسب، گلوبی روغن کاری ناکافی و ذرات خارجی کنده‌شده از میل‌لنگ [۱۷]. زمانی که عیوب ریزساختاری یا آخال مشاهده نشود می‌توان نتیجه گرفت که شکست احتمالاً ناشی از عوامل خارجی بوده و به دلیل وجود یک عیب ذاتی داخلی نیست اما در صورت مشاهده عیوب داخلی پرداختن به نقش آن‌ها دارای اهمیت است [۱۸]. هنوز درک کاملی از اثرات آخال‌ها بر شروع ترک و حد خستگی حاصل نشده است زیرا تأثیر آخال‌ها بر خواص خستگی فولاد به عوامل گوناگونی همچون ترکیب شیمیایی اندازه، توزیع و شکل آخال، چسبندگی آخال به زمینه و ثابت الاستیک آخال و زمینه بستگی دارد. آخال‌های سولفیدی در طی تغییر فرمی مثل نورد یا فورج کشیده می‌شوند. اثرات مخرب این آخال‌های کشیده شده بر خواص مکانیکی، به‌خصوص زمانی که جهت اعمال تنش عمود بر جهت کشیدگی آخال‌ها باشد بسیار بیش‌تر است [۱۹]. همچنین فاصله آخال از سطح نمونه نیز بر عمر نمونه موثر است. به‌طوری‌که هر چه آخال به سطح نمونه نزدیک‌تر باشد تأثیر منفی آن بر عمر خستگی بیشتر است. شکل آخال نیز بر خواص مکانیکی به‌ویژه خستگی موثر است؛ به‌طوری‌که آخال‌های صفحه‌ای یا دارای شکل نامنظم و لبه‌های تیز در هر دو حالت بارگذاری موازی و عمود بر جهت کار مکانیکی دارای اثرات منفی تری نسبت به آخال‌های میله‌ای شکل هستند؛ زیرا سبب تمرکز تنش بیش‌تری در اطراف آخال می‌شوند. آخال‌های میله‌ای شکل تنها در بارگذاری عمود بر جهت کار مکانیکی دارای اثرات منفی

قابل توجهی بر خواص خستگی هستند [۲۰]. بررسی خستگی در مورد قطعاتی که در معرض تنش‌های سیکلی قرار می‌گیرند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، خصوصاً در مواردی نظیر قطعات موتور هواپیما که ایمنی از مهم‌ترین ملاحظات طراحی است همچنین این عامل نقش اساسی در ازکارافتادگی و گسیختگی اجزائی مانند قالب‌ها، چرخنده‌ها، بلبرینگ‌ها و میل‌ها دارد؛ بنابراین اثر تعیین‌کننده‌ای در عمر و دوام و هزینه تولید خواهد داشت پیشرفت‌های اخیر در ساخت آلیاژها و روش‌های عملیات حرارتی منجر به تولید مواد با استحکام ذاتی بالا و نسبت استحکام به وزن کم شده است. این مواد در جاهایی که سبکی اهمیت دارد به کار می‌روند تا ضخامت و ابعاد اجزا کمتر شده (قطعات نازک) که در نتیجه نسبت سطح به حجم در محصولات اخیر بیش‌تر شده و اهمیت نقایص سطحی بیش‌تر خودنمایی می‌کند. منظور از سطح ساختار و وضعیت سطح و زیرسطح است. مکانیزم گسیختگی در خستگی، خزش، سایش و خوردگی تنشی به‌شدت به خصوصیات مکانیکی فیزیکی و شیمیایی سطح بستگی دارد که اساساً وابسته به روش ساخت است اگر اضافه تنش در نظر گرفته نشده و یا عیوب قابل رؤیت (چه در ماده و چه ناشی از ساخت) عامل گسیختگی نباشد مبدأ گسیختگی معمولاً ترک‌های کوچک سطح است که در زمان محدودی رشد کرده و به اندازه بحرانی خود همراه با گسیختگی ناگهانی می‌رسند. بنابراین سطح تولیدشده در فرایندهای مختلف ساخت توزیع اولیه‌ای از ترک‌های کوچک یا محل‌های مناسب برای ایجاد ترک دارد که با قرار گرفتن در محیط‌هایی با تنش‌های اتفاقی یا سیکلی (خستگی) یا محیط‌هایی با شرایط شیمیایی (خوردگی تنشی) و حرارتی (خزش) خاص این ترک گسترش یافته و گسیختگی را در پی خواهد داشت [۱]. کاسترو و فیلد [۲] استحکام خستگی پرچرخه را مهم‌ترین خصوصیت مکانیکی قطعه دانستند که متأثر از ماشین‌کاری است به گونه‌ای که دوام واقعی به شرایط خاص برش به‌کاررفته و شدت فرایند براده برداری بستگی دارد. در مورد اثر تفکیکی پارامترهای ماشین‌کاری پژوهش متکار و همکاران [۲۱] بر روی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که افزایش سرعت برش و زاویه براده ابزار بر عمر خستگی قطعه تراشیده شده می‌افزاید. جالب این است که افزایش زاویه براده منحنی تغییرات عمر با سرعت برش را بدون تغییر فقط در جهت افزایش جابجا می‌کند اما گرینفیلد و آلن [۲۲] متوجه شدند که حد خاصی برای زبری سطح فولاد سخت شده E19 تحت سنگ‌زنی وجود دارد که با کاهش زبری سطح از این مقدار دیگر بهتر شدن کیفیت سطح تأثیری در استحکام خستگی دور بالای قطعات ندارد. آزمایش‌های کاستر [۳] نشان داد که اثر زبری سطح بر استحکام خستگی از ماده‌ای به ماده دیگر متفاوت است. تیلور و کلانسی [۲۳] بر مبنای مجموعه‌ای از آزمایش‌ها دریافتند که زبری سطح تأثیر قابل توجه‌ای در عمر خستگی قطعات دارد به گونه‌ای که قطعه با سطح صاف‌تر، عمر خستگی خیلی بیش‌تری دارد. تحقیق ایشان نشان داد که زبری سطح نسبتاً کم قطعه کار که از سنگ‌زنی ملایم به جا می‌ماند عمر خستگی را نسبت به نمونه‌های به‌خوبی پرداخت‌شده کمتر می‌کند. اما سطوح سنگ‌زده شده مقاومت به خستگی کمتری را نسبت به سطوح فرزکاری شده در شرایط زبری سطح مشابه نشان می‌دهند. در توضیح علت این پدیده به علامت‌های منحنی شکل ناشی از حرکت پیشروی به‌جامانده در سطح فرزکاری شده اشاره می‌شود که نشانی از ترک‌ها در جهاتی عمود بر محور قطعه است. ایشان توصیه می‌کنند که پارامتر سطح Rz در توصیف عملکرد خستگی مناسب‌تر از Ra است زیرا بهتر بازتاب دهنده بدترین نقایص سطح خواهد بود. ساساهارا [۲۴] اثر شرایط برش شامل شکل و شعاع نوک ابزار و پیشروی را بر زبری سطح، تنش پسماند و سختی سطح بررسی کرده و در نهایت نموداری برای عمر قطعات تراشیده شده از فولاد Ck45 بر حسب سختی سطح و تنش پسماند ارائه کرده است. در تحقیقی دیگر سمیکری و همکاران [۲۵] برای بررسی اثر فرایند براق‌کاری از تحقیقی بر اساس آزمایش استفاده کرده‌اند این فرایند کیفیت سطح و عمر خستگی قطعات را به کمک ایجاد تنش پسماند فشاری بهبود می‌دهد. ایشان در نهایت گستره‌هایی را برای تعیین عمر خستگی قطعات بر اساس سختی و زبری سطح پیشنهاد کرده‌اند. جاوید و همکاران [۲۶] تأثیر پیشروی و شعاع نوک ابزار را بر یکپارچگی سطح و عمر خستگی قطعات ماشین‌شده بررسی کرده‌اند. هدف این تحقیق مشخص کردن رابطه بین کیفیت سطح، شرایط ماشین‌کاری و رفتار خستگی در مورد آلیاژ فولاد 34CrNiMo6 بوده است. اما آن‌ها تأثیر این پارامترها را در عمر مقایسه نکرده‌اند. به‌عنوان یک تحقیق جامع، نوویک و همکاران [۲۷] به مرور پژوهش‌هایی پرداخته‌اند که در مورد محدوده وسیعی از جنس‌ها برای قطعه کار، اثر ماشین‌کاری (روش‌های سنتی و غیرسنتی) و زبری/یکپارچگی سطح ماشین‌شده را بر عملکرد خستگی قطعه بررسی می‌کنند. آن‌ها مدعی هستند که در بررسی نتایج ارائه‌شده در تاریخچه برخی تناقضات در مورد رابطه زبری سطح قطعه کار با عمر خستگی دیده می‌شود در بیشتر موارد ذکرشده زبری سطح کوچک‌تر به معنی عمر خستگی بیشتر است اما برای محدوده زبری در محدوده ۲/۵ تا ۵μm در مقایسه با زبری، عمر خستگی بیشتر به تنش پسماند و

ريزساختار سطح بستگى دارد آن‌ها مدعى شده‌اند در غياب تنش پسماند، زبرى سطح ماشين كارى شده بزرگ‌تر به اندازه $0.1 \mu\text{m}$ تاثير زيادى بر عمر خستگى دارد. دماهاى بالاتر از 400°C اثرات هر دو عامل تنش پسماند و زبرى سطح را بر عمر خستگى کاهش مى‌دهد كه علت آن آزادسازى تنش و تغيير در وضعيت شروع ايجاد ترك از سطح به عمق ماده است به طور معمول وجود ناخالصى‌هاى از نظر اندازه يك مرتبه بزرگ‌تر از زبرى سطح ماشين شده اثرات وضعيت هندسى سطح را بى تاثير خواهد كرد.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- نمونه مورد بررسی

چند نمونه ورق فلزی ضخیم از منطقه شکست و اطراف آن مربوط به یک جرثقیل جهت بررسی علل تخریب در این پژوهش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نمونه مورد مطالعه مربوط به یک جرثقیل ریلی ساخت آلمان است که در سال ۱۹۷۴ ساخته شده است. در شکل‌های ۱ و ۲ تصویری از نمونه‌های مورد مطالعه و سطح شکست آن‌ها نشان داده شده است. ورقه‌های ضخیم فلزی پس از برش و بررسی منطقه شکست برای انجام آزمایش‌های تجربی شامل آزمون‌ها و تصویربرداری آماده‌سازی شده‌اند.



شکل ۱ نمونه مورد مطالعه در پژوهش حاضر



شکل ۲ نمایی از سطوح شکست نمونه مورد مطالعه

جهت بررسی علل تخریب، ابتدا سطح شکست و سطح خارجی نمونه توسط میکروسکوپ استریو مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، آنالیز شیمیایی نمونه توسط روش طیف‌سنجی نشری تعیین شد. جهت بررسی‌های ریزساختاری، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی تهیه شد و توسط میکروسکوپ نوری مطالعه شد. جهت تعیین خواص مکانیکی، آزمون‌های سختی سنجی و کشش در دمای محیط انجام شد. جهت تکمیل مطالعات، سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید.

۲-۲-۲-۲- آزمون‌ها و تجهیزات مورد نیاز

۲-۲-۲-۱- آزمون کشش

خواص کششی قطعات چاپ‌شده طبق استانداردهای ASTM D638-Type V با استفاده از دستگاه آزمون کشش یونیورسال Roell Zwick / Z100 ساخت کشور آلمان (شکل ۳) مورد ارزیابی قرار گرفتند. ظرفیت نیروسنج دستگاه مورد استفاده برابر با ۱۰۰KN بود.



شکل ۳ دستگاه آزمون کشش

۲-۲-۲-۲- آزمون سختی سنجی ماکرو

مقاومت یک ماده‌ی جامد در برابر یک فرورونده را اصطلاحاً سختی می‌نامند. سختی سنجی فلزات در دو مقیاس سختی ماکرو و سختی میکرو انجام می‌پذیرد. سختی ماکرو برای اندازه‌گیری سختی کلی جسم و سختی میکرو جهت اندازه‌گیری سختی فازهای موجود در یک ساختار، سختی پوشش‌های فلزی، سختی نقاط مختلف در سطح و یا عمق نمونه و سختی ورق‌های نازک به کار می‌رود. روش‌های متداول سختی ماکرو عبارت‌اند از: سختی برینل^۱، سختی ویکرز^۲ و سختی راکول^۳. سختی میکرو به دو روش سختی ویکرز و سختی نوپ^۴ انجام می‌شود. تفاوت روش‌های سختی، نوع فرورونده و نیروی اعمالی می‌باشد که برحسب جنس نمونه‌ها انتخاب می‌گردد. از دستگاه 1 Buehler MICROMET (USA) در این پژوهش استفاده شده است که در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴ دستگاه سختی سنجی 1 Buehler MICROMET

¹ Brinell hardness

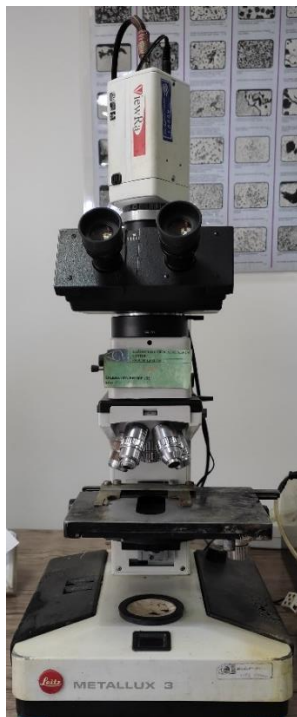
² Vickers hardness

³ Rockwell hardness

⁴ Knoop hardness

۲-۲-۳- آزمون متالوگرافى (ميكروسكوپ نورى)

به منظور بررسى وجود تخلخل و درصد آن و آخال‌هاى موجود در قطعه از ميكروسكوپ نورى استفاده شده است. ميكروسكوپ‌هاى نورى داراى بزرگنمايى‌هاى متفاوتى مى‌باشند كه عموماً با وجود عدسى‌هاى گوناگون، تصوير نمونه مورد نظر چند برابر مى‌شود. اصول كلي در تمامى انواع ميكروسكوپ‌ها بر اساس عبور نور با طول موج‌هاى متفاوت از چندين عدسى محدب مى‌باشد كه هر چقدر طول موج نور بكار رفته در ميكروسكوپ مزبور کوتاه‌تر باشد قدرت تفكيك و يا جداكنندگى آن ميكروسكوپ بيشتر است. براى مثال قدرت تفكيك چشم انسان $1/0 \text{ mm}$ مى‌باشد و ميكروسكوپ نورى $0/24 \mu\text{m}$ است. شكل (۵) ميكروسكوپ نورى مدل Leitz Metallux 3 (Germany) كه در اين پژوهش استفاده شده است نشان مى‌دهد.



شكل ۵ ميكروسكوپ نورى مدل Leitz Metallux 3

۲-۲-۴- آناليز EDAX

جهت بررسى ميزان عناصر موجود در نمونه مورد مطالعاتى از آناليز EDAX استفاده شد. آناليز EDAX يا EDS (طيف سنجى پراش انرژى پرتو ايكس)، يك افزونه در دستگاه‌هاى SEM جهت تشخيص درصد عناصر در نمونه‌هاى جامد است. اين آناليز مى‌تواند با استفاده از انرژى اشعه ايكس منحصربه‌فرد ساطع شده از نمونه، نوع عنصر و درصد وزنى يا اتمى آن را تشخيص دهد. اين روش مى‌تواند عناصر سبكي همانند اكسيژن و كربن و يا هالوزن‌ها را تشخيص دهد. آزمون EDAX در يك محفظه خلاء انجام مى‌شود.

۳- نتايج آزمائش‌ها و آزمون‌ها

در اين بخش به تحليل و بررسى نتايج مطالعات انجام شده توسط ميكروسكوپ‌هاى استريو و الكترونى روبشى و همچنين آناليزهاى شيميايى، آزمون‌هاى سختى سنجى ماكرو، آزمون كشش و بررسى ساختار ميكروسكوپى پرداخته شده است.

۳-۱- مطالعات ميكروسكوپى استريو

مطالعات ميكروسكوپى، وجود خوردگى در هر دو سطح داخلى و خارجى را نشان مى‌دهد. در سطح داخلى، آثار زنگ‌زدگى و

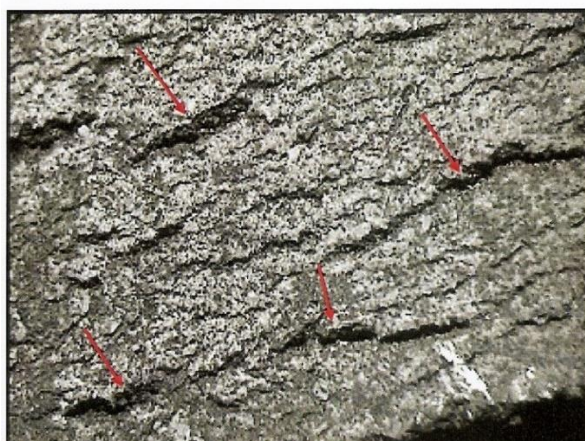
خوردگی عمومی^۵ دیده می‌شود که در شکل ۶ نمایان است. در سطح خارجی، پوشش رنگ پوسته‌پوسته شده و در بعضی از نقاط از بین رفته است که در این اثر در شکل ۷ و ۸ قابل مشاهده است. در این سطح، در منطقه فاقد پوشش، ترک‌های متعدد قابل مشاهده است.



شکل ۶ آثار زنگ‌زدگی در سطح داخلی



شکل ۷ آثار پوسته‌پوسته شدن در سطح خارجی



شکل ۸ مشاهده ترک‌های متعدد در سطح خارجی در منطقه‌ای که پوشش از بین رفته

⁵ General corrosion

۲-۳- آناليز شيميايى

نتايج مربوط به آناليز شيميايى نمونه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتايج، تركيب شيميايى با استاندارد آلمانى (S275JR) (DIN 10025 Grade St44-2) مطابقت دارد. همچنين تركيب شيميايى استاندارد آلياژ در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ آناليز شيميايى نمونه مطالعاتى

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Fe
۰/۱۵	۰/۳۲	۱/۲۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵۵	Base

جدول ۲ حدود مجاز تركيب شيميايى استاندارد برآى آلياژ

C	Si	Mn	P	S	N
۰/۲۴	۰/۶۰	۱/۷۰	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۰/۰۱۱

۳-۳- آزمون سختى سنجى ماكرو

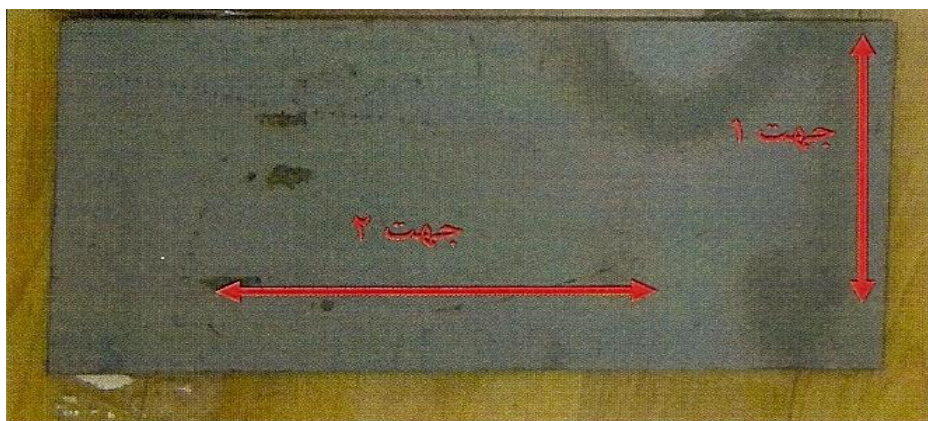
آزمون سختى سنجى ماكرو در منطقه نزديك به سطح شكست و دور از آن انجام شد كه نتايج آن در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به نتايج ارائه شده افزايش نسبى سختى در مجاورت سطح شكست مشاهده مى شود.

جدول ۳ نتايج حاصل از آزمون سختى ماكرو

میزان سختى (HV)				نيروى اعمالى (Kgf)	محل سختى سنجى
میانگین	نقطه ۳	نقطه ۲	نقطه ۱		
۲۰۶	۲۰۶	۲۰۵	۲۰۶	۱۰	نزديك سطح شكست
۱۸۱	۱۸۱	۱۸۲	۱۸۰	۱۰	دور از سطح شكست

۴-۳- آزمون كشش

از آنجايى كه جهت نورد در ورق مشخص نمى باشد. خواص مكانيكى نمونه در دو جهت عمود بر هم مورد بررسى قرار گرفته است كه در شكل ۹ نشان داده شده است. بر اساس نتايج به دست آمده، استحكام كششى با حدود مجاز استاندارد برآى درجه ۶ مذکور مطابقت دارد. نتايج آزمون كشش در دماى محيط در جدول ۴ و ۵ آورده شده است.



شكل ۹ جهات عمود برهم در ورقه مورد مطالعه در آزمون كشش

⁶ Grade

جدول ۴ نتایج آزمون کشش در دمای محیط در جهت ۱

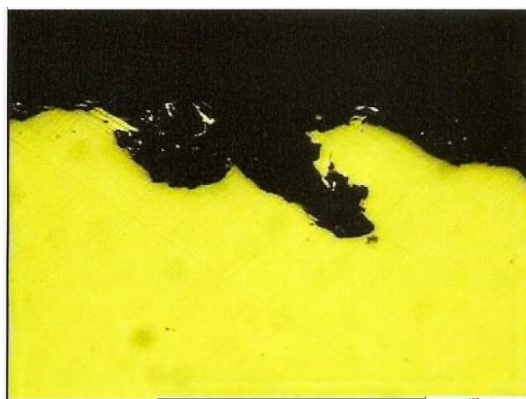
کاهش سطح مقطع %	ازدیاد طول نسبی A %	استحکام نهایی R_{max} MPa	استحکام تسلیم %. ۰/۲ MPa	سطح مقطع (mm)	قطر (mm)
۶۴	۳۶	۴۱۹	۲۷۸	۷۹/۰۱	۱۰/۰۳
-	min ۲۲	۴۱۰-۵۶۰	min ۲۷۵	حدود مجاز استاندارد DIN 10025 برای آلیاژ St44-2	

جدول ۵ نتایج آزمون کشش در دمای محیط در جهت ۲

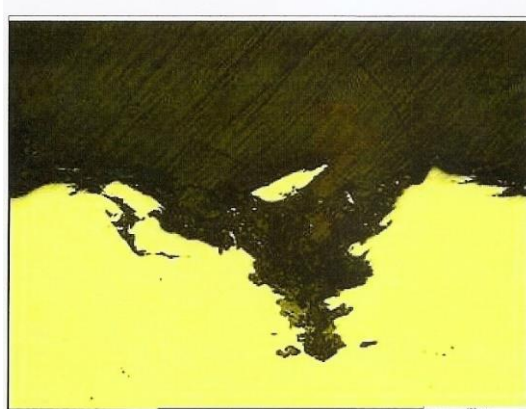
ازدیاد طول نسبی A %	استحکام نهایی R_{max} MPa	استحکام تسلیم %. ۰/۲ MPa	سطح مقطع (mm)	ابعاد (mm)
۲۴	۴۲/۵	۳۰۴	۳۱۴/۷۶	۲۲/۸۰ × ۱۲/۲۰
min ۲۲	۴۱۰-۵۶۰	min ۲۷۵	حدود مجاز استاندارد DIN ۱۰۰۲۵ برای آلیاژ St44-2	

۳-۵- بررسی ساختار میکروسکوپی

به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی، ابتدا نمونه تهیه شده از مقطع عرضی قیل از حکاکی (اچ شیمیایی) مورد مطالعه قرار گرفت. در سطح خارجی، حفره‌های ناشی از خوردگی مشاهده گردیده است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱، وجود حفره در ناحیه‌ای دیگر از سطح به همراه اشاعه ترک میکروسکوپی از آن نشان داده است.

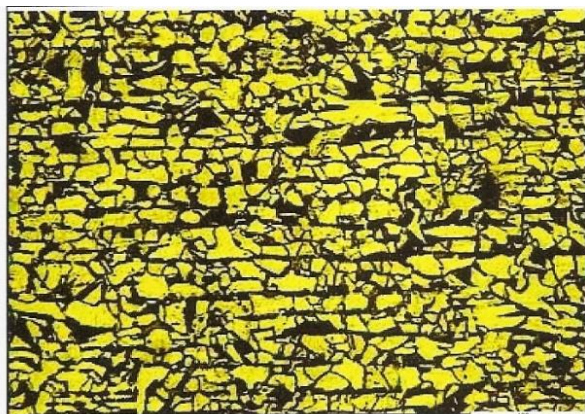


شکل ۱۰ مشاهده حفره‌های خوردگی در سطح خارجی



شکل ۱۱ وجود حفره در سطح خارجی و اشاعه ترک میکروسکوپی از حفره‌های سطحی

در شكل ۱۲ ساختار ميكروسكوپى بعد از اچ در مركز نمونه شامل زمينه فریت^۷ همراه با دانه‌هاى ردیف شده پرلیت نشان داده شده است. در شكل ۱۳ نیز، ردیف شدن دانه‌هاى پرلیت^۸ در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است.

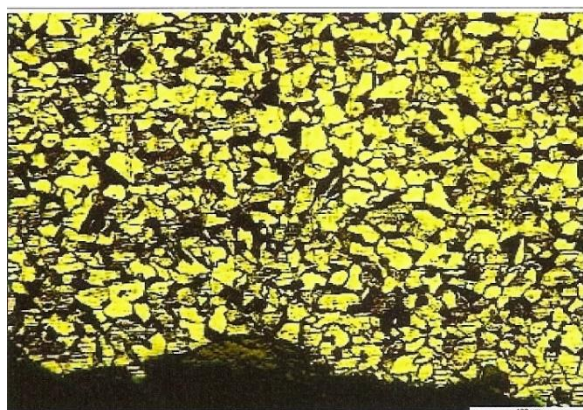


شكل ۱۲ ساختار در مركز نمونه شامل زمينه فریت همراه با دانه‌هاى ردیف شده پرلیت



شكل ۱۳ مشاهده ریزدانه پرلیت در زمينه فریت

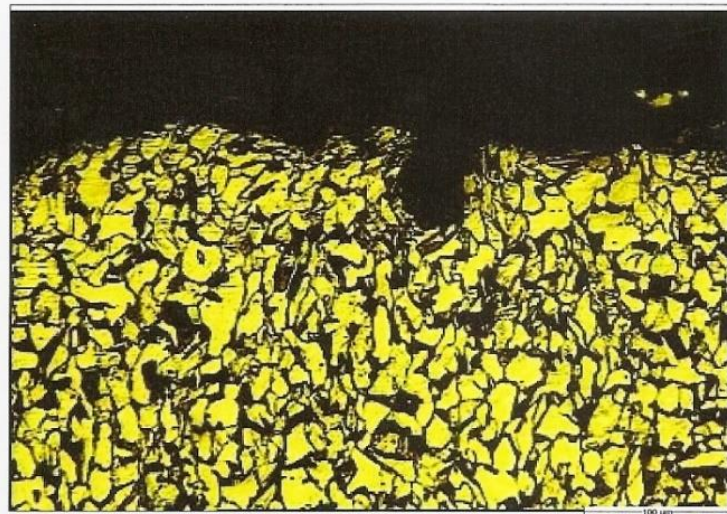
در شكل ۱۴ ساختار ميكروسكوپى در سطح داخلى شامل زمينه فریت همراه با دانه‌هاى پراكنده پرلیت نمایش داده شده است.



شكل ۱۴ ساختار در سطح داخلى شامل زمينه فریت همراه با دانه‌هاى پراكنده پرلیت

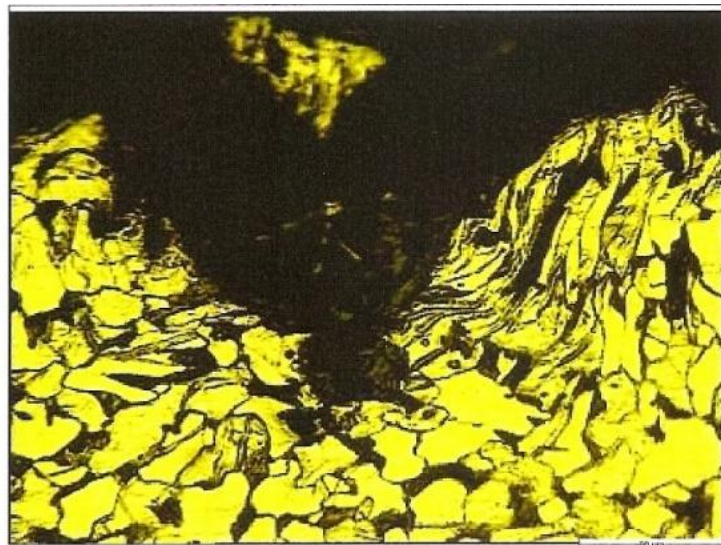
⁷ Ferrite
⁸ Pearlite

در شکل ۱۵ نیز ساختار در سطح خارجی نیز شامل دانه‌های فریت به همراه پرلیت است که پرلیت به صورت پراکنده در زمینه فریت توزیع شده است.



شکل ۱۵ ساختار در سطح خارجی شامل دانه‌های فریت همراه با توزیع پراکنده پرلیت

اما در شکل ۱۶ در سطح خارجی، در اطراف حفره‌ها کشیدگی ساختار نیز قابل مشاهده است.

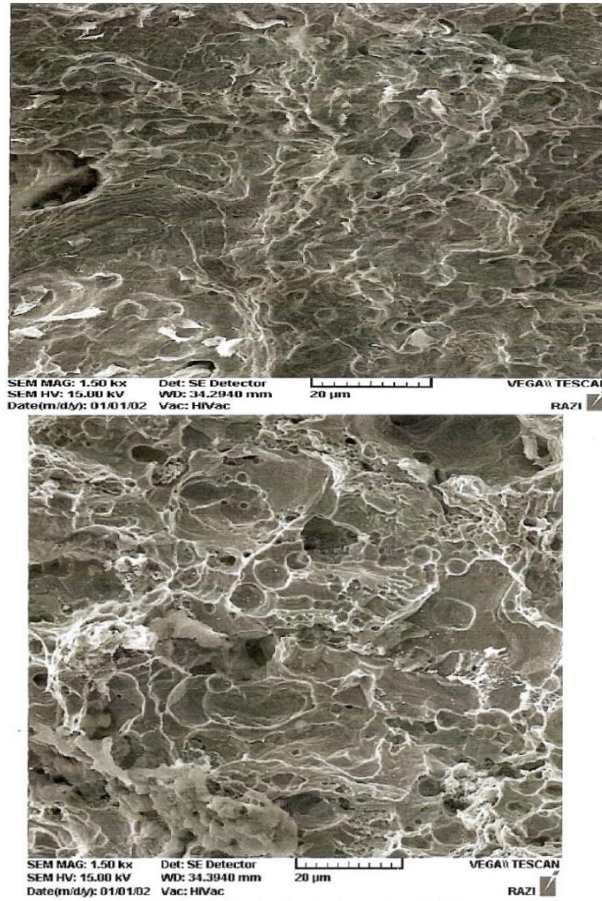


شکل ۱۶ کشیدگی ساختار در نزدیک به حفره‌های موجود در سطح خارجی

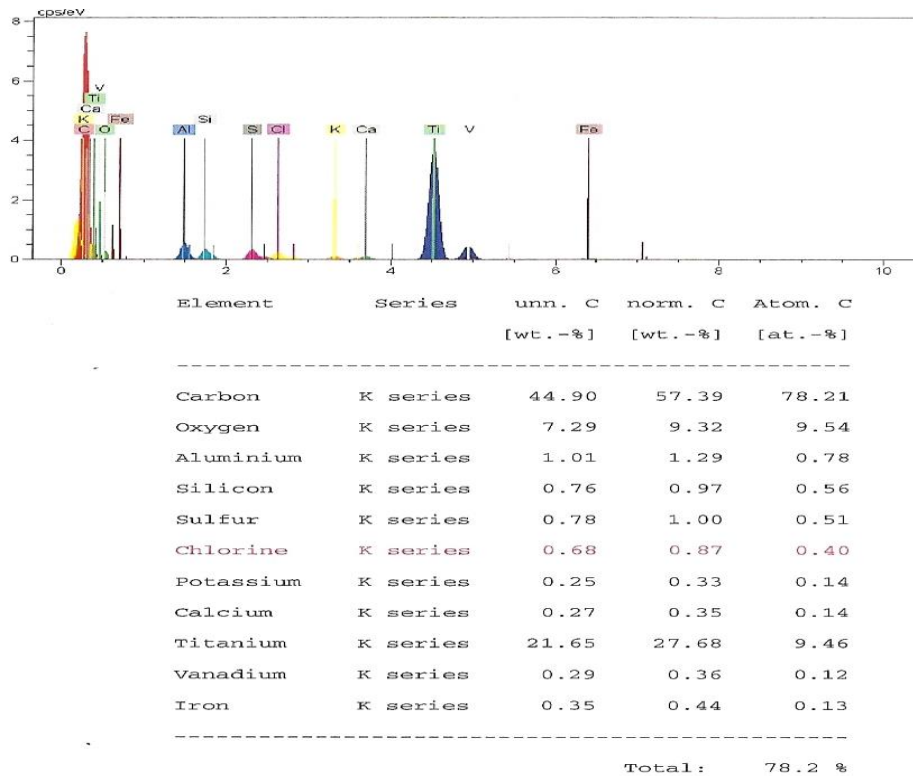
۳-۶- مطالعات میکروسکوپ الکترونی

به منظور بررسی چسبندگی بین لایه‌ها، رشته‌ها و سطوح شکست قطعات در مراحل مختلف پردازش از تصاویر SEM با دستگاه (Czech Republic) VEGA\TESCAN-XMU در بزرگنمایی‌هایی از ۱ mm تا ۵۰۰ μm تصویربرداری شده است. نمونه‌ها قبل از تصویربرداری با لایه نازکی از طلا پوشش دهی می‌شوند. در شکل ۱۷ نمونه مورد مطالعه مشاهده دیمپل‌ها^۹ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که شکست نرم به وقوع پیوسته است.

^۹ dimples



شکل ۱۷ مشاهده دیمپل‌ها در سطح شکست



شکل ۱۸ نتایج آنالیز از پوشش موجود در سطح خارجی

۳-۷- آنالیز EDAX¹⁰

نتایج مربوطه به آنالیز EDS بر روی پوشش موجود در سطح خارجی در شکل ۱۸ آورده شده است. بر اساس این نتایج نشان می‌دهد عنصر کربن ۷۸/۲۱٪ بیش‌ترین سهم در میان دیگر عناصر سازنده این نمونه را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

❖ نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی نمونه ارسالی با استاندارد آلمانی DIN10025 Grade (S275JR) (1.0044) St44-2 مطابقت دارد.

❖ بر اساس نتایج سختی سنجی ماکرو افزایش نسبی سختی در مجاورت سطح شکست مشاهده می‌شود.

❖ نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که خواص کششی در دمای اتاق با استاندارد DIN 10025 برای آلیاژ St44-2 مطابقت دارد.

❖ ساختار میکروسکوپی شامل دانه‌های فریت به همراه باندهای پرلیت است. در سطوح داخلی و خارجی، دانه‌های پرلیت از حالت چسبندگی خارج شده و به صورت پراکنده در ساختار قابل مشاهده هستند.

بررسی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی دیمیل‌های شکست نرم را نشان می‌دهد.

براساس مطالعات انجام شده و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، عامل اصلی شکست، خوردگی خستگی^{۱۱} است. حفره‌های نسبتاً عمیق خوردگی^{۱۲} در سطح به همراه ترک‌های سطحی در نواحی بدون پوشش نشان‌دهنده وقوع خوردگی است که با در نظر گرفتن زمان سرویس، وجود تنش‌های کاری (عمدتاً سیکلی) و شرایط بارگذاری بیش از حد مجاز در مقاطع زمانی خاص منجر به شکست شده است. جهت جلوگیری از شکست، نکات ذیل مورد توجه قرار گیرد.

- ۱) با توجه به شرایط محیطی کارکرد (اتم‌سفر مرطوب همراه با مقدار قابل توجهی یون کلراید)، حفاظت از خوردگی بسیار حائز اهمیت است. طبق اطلاعات دریافت شده از نمونه مورد مطالعه، جهت حفاظت از خوردگی، پوشش از سال ۱۳۸۱ مورد استفاده قرار گرفته است که اطلاعات مربوط به نحوه پوشش‌کاری در دسترس نیست. انتخاب پوشش مناسب انجام پوشش‌کاری با رعایت کلیه نکات تکنیکی، از اهمیت قابل توجهی جهت کنترل خوردگی برخوردار است. لازم به ذکر است که در نواحی تخریب شده، پوشش از بین رفته و یا دچار ترک‌های ریز شده است.
- ۲) با توجه به نقش بارگذاری بیش از اندازه^{۱۳} در شکست زود هنگام، لازم است در حین بهره‌برداری از بارگذاری بیش از حد مجاز اجتناب شود.

همچنین بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌های ارسالی، دیمیل‌های مربوط به شکست نرم را نشان می‌دهد. از آنجا که علائم خستگی در سطح شکست دیده نشده است. به نظر می‌رسد نمونه‌های ارسالی مربوط به منطقه شروع شکست نبوده است. لازم به یادآوری است که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی با حدود مجاز در استاندارد مطابقت دارد.

¹⁰ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

¹¹ corrosion fatigue

¹² pitting

¹³ Overloading

Authorship Contribution Statement

Dr. Saeid Nickabadi



Biography: Saeid Nickabadi received his Ph.D. degree in mechanical engineering from Guilan University, Guilan, Iran. He is a faculty member in the Mechanical Engineering Department of Imam Khomeini University of Maritime Sciences University, Iran. His research interests include experimental tests, Computational nano-mechanics, Control of Mechanical Systems Vibrations. In addition to his academic work, he has spent considerable time in industry working on design and manufacture of mechanical parts, etc.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Project, administration, Methodology.

Dr. Hossein Rostami



Biography: Hossein Rostami is a PhD student in the field of manufacturing engineering at Babol Noshirvani University of Technology (NIT). He is a faculty member in the Mechanical Engineering Department of Imam Khomeini University of Maritime Sciences University, Iran. His research interests include Advanced and smart materials, welding, deposition technique. In addition to his academic work, he has spent considerable time in work and practical activities in the submarine field, etc.

Contribution Statement: Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Visualization, Validation, Data Curation, Project administration

Hasan Bathaee



Biography: Hasan Bathaee received his bachelor's degree in mechanical-manufacturing engineering from Arak University in 2019, and then he was accepted for a master's degree without an entrance exam and as a scholarship in Tarbiat Modares University of Tehran in the same field. He received his master's degree in 2022. So far, more than 20 articles of his have been published in international journals and conferences. His scientific specialties are nanotechnology, nanomanipulation, sensitivity analysis, additive manufacturing, 3D printers and metamaterials.

Contribution Statement: Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Moore D, Packer K, Jones A, Carlson D. Crankshaft failure and why it may happen again. Practical failure analysis. 2001;1:63-72.
- [2] Jadhav A, Chalwa V, Gaikwad P. Fatigue failure analysis of marine engine crankshaft. International Journal of Engineering Research & Technology. 2013;2.
- [3] Taheri M. Determination of the young modulus of gastric cancer tissue experimentally using atomic force microscopy. Modares Mechanical Engineering. 2020;20:2709-20.
- [4] Bathaee SH. Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2019;9:123-39.
- [5] Korayem M, Taheri M, Khaksar H, Bathaee SH. Using Micro/Nano Scale Contact Models in 3D Manipulation of Deformation of Au Particles Under Angular Effect. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020;7:33-43.
- [6] Bytyqi A, Puksic N, Jenko M, Godec M. Characterization of the inclusions in spring steel using light microscopy and scanning electron microscopy. Mater Tehnol. 2011;45:55-9.
- [7] 10267(08) DE. Standard for ferritic-pearlitic steels for precipitation hardening from hot working temperatures. 2013.
- [8] 45 AE. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2013.

- [9] Khalili M, Taheri M, Bathaee SH, Shakeri F. Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;1:155-74.
- [10] Du J, Strangwood M, Davis C. Effect of TiN particles and grain size on the charpy impact transition temperature in steels. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012;28:878-88.
- [11] Bathaee SH, Sabzevari M, Moslemi Naeini H. Investigation of hydroforming process loading paths based on experimental and improvement based on Sobol sensitivity analysis. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;2:53-72.
- [12] Sachs NW. Understanding the surface features of fatigue fractures: how they describe the failure cause and the failure history. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2005;5:11-5.
- [13] Elkhabeery M, Bailey JA. Surface integrity in machining solution-treated and aged 2024-aluminum alloy, using natural and controlled contact length tools. Part I—Unlubricated conditions. 1984.
- [14] Koster W, Field M. Effects of machining variables on the surface and structural metals. *PROCEEDINGS OF THE NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH CONFERENCE, SME*; 2001.
- [15] Jeelani S, Musial M. Effect of cutting speed and tool rake angle on the fatigue life of 2024-T351 aluminium alloy. *International journal of fatigue*. 1984;6:169-72.
- [16] Greenfield P, Allen D. The effect of surface finish on the high cycle fatigue strength of materials. *GEC Journal of Research*. 1987;5:129-40.
- [17] Khuri AI, Cornell JA. *Response surfaces: designs and analyses*: Routledge, 2018.
- [18] Bathaee SH, Taheri M. An Examination of Environmental and Dimensional Parameters on Force and Critical Time of the Manipulation Process Using the Mechanical Theory of DMT Contact. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7:1-9.
- [19] Sasahara H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45:131-6.
- [20] Hwang Y, Lin T, Chang W. Experiments on T-shape hydroforming with counter punch. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;192:243-8.
- [21] Metkar R, Sunnapwar V, Hiwase S. A fatigue analysis and life estimation of crankshaft—a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2011;6:425-30.
- [22] Taheri M, Bathaee SH. Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7:24-37.
- [23] Bathaee SH. Study of Severe Plastic Deformation Process Based on E-Fast Sensitivity Analysis to Optimize Parameters. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2021;1:88-105.
- [24] Stout K. How smooth os smooth? Surface measurements and their relevance in manufacturing. *Production Engineer*. 1980;59:17-22.
- [25] Zarei B, Bathaee S, Taheri M, Momeni M. Second phase of nanomanipulation of particles by atomic force microscopy using Coulomb, HK, and LuGre Friction Models. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19:181-90.
- [26] Javidi A, Rieger U, Eichlseder W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International journal of fatigue*. 2008;30:2050-5.
- [27] Novovic D, Dewes R, Aspinwall D, Voice W, Bowen P. The effect of machined topography and integrity on fatigue life. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44:125-34.