بسم الله

دانشگاه زنجان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مکانیک

بررسی خوردگی تحت تنش با استفاده از روش آکوستیک امیشن

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

توسط :

موسی جباری

استاد راهنما:

دکتر رامین خامدی

فروردین 1392

قدردانی

خداوند متعال را به علت انجام این مطالعه سپاسگزارم. امید است با تمامی نقصان ها رضای آن سرچشمه وجود را فراهم کرده باشد.
بدین وسیله از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر رامین خامدی که با بردباری و عطوفت در به ثمر رسیدن تحقیق اینجانب را راهنمایی های ارزنده نمودند قدردانی می نمایم.
در پایان از زحمات آقای دکتر مهدی احمدی و آقای مهندس حیدری که صمیمانه در انجام آزمایشات و در اختیار نهادن تجهیزات تست دانشگاه امیر کبیر ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی می نمایم.

اعلان منحصر به فرد بودن پایان نامه

بدین وسیله اعلام می گردد مطالب مندرج در این پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرکی توسط *اینجانب* و فرد دیگری ارائه نشده است.

نام ونام خانوادگی دانشجو: موسی جباری
امضاء

چکیده

خوردگی تحت تنش با روش آکوستیک امیشن در این پایان نامه بررسی و تست گردید. برای این تحقیق نمونه هایی از جنسهای فولاد زنگ نزن 304، 316و فولادهای GTD-450، Ck45، Ck60، St37 تحت تنش و بدون تنش آزمایش شدند. کلیه نمونه های دارای تنش مطابق با استاندارد ASTM G30 برای آزمایش آماده سازی گردیدند. بعد از آماده سازی نمونه ها در محیط خورنده قرار داده شدند. اسید سولفوریک و اسید کلریدریک به دلیل خورندگی بالا روی فلزات با غلظت یکسان 5% به عنوان محیطهای خورنده انتخاب گردیدند. تنظیمات مربوط به نرم افزار دستگاه آکوستیک امیشن را جهت جمع آوری پارامترهای آکوستیکی را انجام داده و سپس به تحلیل داده های به دست آمده پرداخته شد.

میزان خوردگی و نحوه واکنش اسیدها با جنسهای مختلف جداگانه بررسی شد. با توجه به نمودار آزمایش ها خوردگی در نمونه های دارای تنش بیشتر از نمونه های بدون تنش است که ناشی از حساسیت بالای فولادهای زنگ نزن در خوردگی تحت تنش می باشد. همچنین بازه فرکانسی نمونه های دارای تنش از بازه فرکانسی نمونه های بدون تنش کمتر می باشد. در نتایج آزمایش ها خوردگی بیشتری برای فولاد زنگ نزن 304 هم در نمونه های دارای تنش و هم بدون تنش نسبت به فولاد زنگ نزن 316 مشاهده گردید. خوردگی ناگهانی و شدید در اسید کلریدریک برای مواد تست شده به ویژه در نمونه های تحت تنش فولاد زنگ نزن 304، 316و فولادGTD-450 مشاهده گردید که بسیار مخرب می باشد چرا که خوردگی ناگهانی باعث ایجاد نقطه هایی با تمرکز تنش بالا و در نهایت شکست سازه می شود. برای نمونه های فولاد Ck45و Ck60 در اسید کلریدریک مقاومت به خوردگی و به وجود آمدن روئینگی در برابر خوردگی مشاهده گردید. همچنین در نمونه بدون تنش فولاد St37 بر خلاف سایر فولادها خوردگی اسید کلریدریک بیشتر از اسید سولفوریک اتفاق افتاده بود.

نمودار FFT برای نمونه ها نیز ترسیم گردید و ماکزیمم فرکانس خوردگی هر ماده تحت آزمایش به دست آمد که ارتباط بین ماکزیمم فرکانس در نمونه های بدون تنش و دارای تنش حائز اهمیت می باشد.

فهرست مطالب

فصل اول: خوردگی تحت تنش 2
1-1- مقدمه ای بر خوردگی 3
2-1- خوردگی 4
3-1- انواع خوردگی 5
4-1- خوردگی تحت تنش 6
5-1- مکانیزم های خوردگی تحت تنش 11
1-5-1- تردی هیدروژن 12
2-5-1- خوردگی تحت تنش آندی 16
6-1- اقدامات پیشگیرانه 21
1-6-1- روشهای جلوگیری از خوردگی تحت تنش 21
2-6-1- روشهای جلوگیری از هیدروژن تردی 21
7-1- مروری بر کارهای انجام شده 22
1-7-1- تشخیص خوردگی تحت تنش در آزمون U شکل 22
2-7-1- مونیتورینگ خوردگی تحت تنش استنلیس استیل 304 25
3-7-1- بررسی اثر محیط، شرایط مکانیکی و خصوصیات مواد 26
فصل دوم: آکوستیک امیشن 36
1-2- مقدمه 37
2-2- تاریخچه آکوستیک امیشن 38
3-2- معرفی پدیده آکوستیک امیشن 39
4-2- مکانیزم های مسبب آکوستیک امیشن 41
5-2- منابع آکوستیک امیشن 44
1-5-2- منابع حاصل از تنش 45
6-2- پارامترهای توصیف امواج آکوستیک امیشن 47
7-2- انواع سیگنال های آکوستیک امیشن 50
8-2- نویزهای موجود در آکوستیک امیشن 51
9-2- مقایسه آکوستیک امیشن با سایر روشهای تست غیر مخرب 53
10-2- مزایا و محدودیتها 54
فصل سوم: آزمایشهای خوردگی 58
1-3- مواد 59
2-3- آماده سازی نمونه جهت آزمایش خوردگی 61
3-3- تنظیمات نرم افزار آکوستیک امیشن 67

4-3- نحوه آزمایش 67
فصل چهارم: نتایج آزمایشات، تحلیل و بررسی نتایج 71
4-1- بررسی نمودارهای فولاد زنگ نزن 304 72
4-1-1- نمودار کانت فولاد زنگ نزن 304 72
4-1-2- نمودار مجموع کانت فولاد زنگ نزن 304 75
4-1-3- نمودار مجموع انرژی آزاد شده در فولاد زنگ نزن 304 78
4-1-4- نمودار فرکانس فولاد زنگ نزن304 81
4-2- بررسی نمودارهای فولاد زنگ نزن 316 83
4-2-1- نمودار کانت فولاد زنگ نزن 316 83
4-2-2- نمودار مجموع کانت فولاد زنگ نزن 316 85
4-2-3- نمودار مجموع انرژی آزاد شده فولاد زنگ نزن 316 88
4-3- بررسی نمودارهای فولاد GTD-450 90
4-3-1- نمودار کانت فولاد GTD-450 90
4-3-2- نمودار مجموع کانت فولاد GTD-450 91
4-3-3- نمودار کانت برحسب فولاد GTD-450 92
4-4- بررسی نمودارهای Ck45 94
4-4-1- نمودار کانت فولاد Ck45 94
4-4-2- نمودار مجموع کانت فولاد Ck45 95
4-4-3- نمودار مجموع انرژی آزاد شده در فولاد Ck45 96
4-5- بررسی نمودارهای Ck60 97
4-5-1- نمودار مجموع کانت فولاد Ck60 97
4-5-2- نمودار مجموع انرژی آزاد شده فولاد Ck60 100
4-6- بررسی نمودارهای St37 104
4-6-1- نمودار مجموع کانت فولاد St37 104
4-6-2- نمودار مجموع انرژی آزاد شده در فولاد St37 106
4-6-3- نمودار کانت برحسب دامنه فولاد St37 108
4-7- عکسبرداری میکروسکوپی 111
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات 113
نتیجه گیری 114
پیشنهادات 116
مراجع 118

مقدمه

خوردگی سبب افزایش هزینه ها و کاهش سود در فعالیتهای صنعتی و تجاری می گردد و جدا از هزینه های مستقیم برای جایگزینی یا تعمیر دستگاه ها و بخش های آسیب دیده در اثر خوردگی، شرکت ها از ناحیه هزینه توقف در فرایندهای تولید نیز دچار ضرر و زیان میشوند. خوردگی تحت تنش یکی از خطرناکترین نوع خوردگی ها می باشد که در اثر همزمانی خوردگی و تنش مکانیکی رخ می دهد. سالانه صنایع مختلف میلیاردها دلار خسارت به واسطه این نوع خوردگی را متحمل می شوند که با مانیتورینگ و پیشگیری به موقع می توان این هزینه ها را کاهش داد.

امروزه روشهای زیادی برای مانیتورینگ فرایند خوردگی تحت تنش وجود دارد که شامل روشهای الکتروشیمیایی و تست های غیر مخرب می باشد. تست آکوستیک امیشن یک روش نوین و پیشرفته در زمینه تست های غیر مخرب محسوب می شود که در زمینه بررسی عیوب خوردگی کاربرد فراوانی دارد. تست آکوستیک امیشن یک روش قدرتمند برای آزمایش رفتار مواد تحت تنش است. تست آکوستیک امیشن از اوایل دهه80 میلادی به صورت تجاری و صنعتی به کار می رود و قابلیتهای منحصر به فرد آن سبب توسعه آن در صنایع بزرگ نظیر نیروگاه ها و پالایشگاه ها شده است.

اغلب سازه ها همواره تحت بارگذاری فعالیت می کنند بازرسی آکوستیک امیشن اطلاعات با ارزشی درباره عملکرد ماده تحت بارگذاری را ارائه می دهد. بازرسی آکوستیک امیشن به دلیل ایمنی و اقتصادی بودن در سازه های تحت بار گذاری بیشتر ملموس می باشد. تخلیه سریع انرژی از خوردگی یک سازه تحت بار سبب ایجاد امواج الاستیک گذرا و انتشار آنها در ماده می‌شود که این امواج با تجهیزات آکوستیک امیشن دریافت می شوند. تحلیل داده های به دست آمده به منظور برقراری ارتباط بین امواج دریافتی و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع آکوستیک می باشد.

فصل اول

خوردگی تحت تنش

1- خوردگی تحت تنش

1-1- مقدمه ای بر خوردگی

یکی از کهن‌ترین آثار خوردگی مربوط به دیوار آهنی قفقاز است که به فرمان کورش هخامنشی ساخته شد و به دستور وی روی آن را با مس پوشش دادند. آغاز پژوهش بـه گونـه امـروزی در انگلسـتان پـس از غرق شدن کشتی جنگی HMS Alarm در سال 1761 میلادی بود. پس از آن ورقـه‌هـای مسـی بـه بدنـه کشتی‌ها وصل می‌شد اما پس از چندی دیده شد که این ورقه‌ها در جاهایی که میخ های فـولادی آنهـا را نگه داشته بود، خورده شده‌اند.

عملاً کلیه محیط هایی که قطعات در آنها مورد استفاده قرار می گیرند، خورنـده هسـتند لکـن قـدرت خورندگی آنها متفاوت است. به طور مثال خوردگی در صنایع نفت بیشتر در اثر کلر، سدیم، گوگرد، اسـید سولفوریک، اسید کلریـدیک و آب اسـت و روغـن، نفـت و بنـزین کمتـر نقـش خورنـده را دارنـد. درجـه حرارت ها و فشارهای بالا معمولاً باعث ایجاد شرایط خوردگی شدیدتری می گردند .گاهی اوقات تغییـرات جزئی در پروسه یا افزودن یک ماده جدید می تواند مسئله ی خوردگی را کاملاً دگرگـون سـازد. غالبـاً در صنایع فرایندی، مواقعی پیش می آید که لازم است بعضی متغیر هـا و فاکتورهـای سیسـتم را تغییـر داد؛ بنابراین، دانستن عوامل موثر بر خوردگی ضروری می باشد.

با نگاهی به آمار منتشر شده از خسارات مستقیم و غیر مستقیم خوردگی به اقتصاد کشـورها مـی‌تـوان به هزینه‌های سرسام‌آور این پدیده پی برد. یک مطالعه دو ساله از 1999تا 2000 در آمریکا نشـان داد کـه هزینه‌های مستقیم خوردگی 276 میلیارد دلار در سال بوده است که این رقم تقریبا 3/1 درصـد از تولیـد ناخالص داخلی آمریکا را تشکیل می دهد. از این رقـم هزینـه‌ای بـالغ بـر 137/9 میلیـارد دلار بـه بخـش صنعت که خود دارای زیرشاخه‌های مختلفی است مربوط می شود[1].

در ایران نیز پدیده خوردگی خسارات قابل توجهی را در صنایع گوناگون بوجود آورده اسـت. بـر اسـاس

برخی بررسی‌های غیر رسمی زیان اقتصادی مستقیم ناشی از خوردگی در ایران در سال 1373 حدود 5000 میلیارد ریال، در سال 1375 حدود 9000 میلیارد ریال و در سال 1379حدود 27500 میلیارد ریال برآورد شده است.

1-2- خوردگی

خوردگی یک واکنش شیمیایی و یا الکتروشیمیایی مخرب بین سطح فلز و محیط اطراف آن می‌باشد. با توجه به اینکه از لحاظ ترمودینامیکی مواد اکسید شده نسبت به مواد در حالت معمولی در سطح پایین‌تری از انرژی قرار دارند، بنابراین تمایل رسیدن به سطح انرژی پایین‌تر سبب اکسید (خورده) شدن فلز می‌گردد. با این توضیح می‌توان گفت که هیچگاه نمی‌توان به طور کامل از خوردگی جلوگیری نمود، بلکه باید به نحوی میزان خوردگی را به حد قابل قبول رسانید.

پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد شامل فلزات، سرامیکها، پلیمرها و کامپوزیتها اتفاق می افتد. اما وقوع آن در فلزات آنقدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی بجای می‌گذارد که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می آید ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن خطور می‌کند

خوردگی دارای انواع متفاوتی می‌باشد که می‌توان آن‌ها را با توجه به شکل منطقه خورده شده به دو دسته کلی تقسیم نمود:

1) خوردگی یکنواخت

2) خوردگی موضعی

خوردگی معمولا فرایندی زیان‌آور است، لیکن گاهی اوقات مفید واقع می‌شود. بطور مثال آلودگی محیط به محصولات خوردگی و آسیب دیدن عملکرد یک سیستم از جنبه‌های زیان آور خوردگی و تولید انرژی الکتریکی در یک باطری و حفاظت کاتدی سازه‌های مختلف از فواید آن هستند، اما تاثیرات مخرب و هزینه‌های به بار آمده بواسطه این فرایند به مراتب بیشتر است.

1-3- انواع خوردگی

در طول سالیان گذشته مهندسان و دانشمندان خوردگی دریافته اند که خـوردگی در انـواع گونـاگونی که شباهت های معینی به یکدیگر دارند و به صورت های مشخصی ظاهر مـی شـود کـه بسـیاری از آنهـا منحصر بفرد نیستند. ولی سـاز و کارشـان از نظـر ویژگـی هـا شـباهت هـای زیـادی بـه یکـدیگر دارنـد، تقسیم بندی می شوند. رایج ترین و آشناترین دسته بندی انواع خوردگی توسط فونتا و گـرین ارائـه شـده است[2]. اساس این طبقه بندی، شکل ظاهری فلز خورده شده است. در ایـن تقسـیم بنـدی هشـت نـوع خوردگی به شرح زیر به عنوان مهمترین انواع خوردگی شمرده شده اند:

1) خوردگی یکنواخت: این نوع خـوردگی بـه عنـوان نـوعی از خـوردگی کـه بـه صـورت یکنواخـت از ضخامت ماده کم می کند، تعریف شده است. برخی از انـواع خـوردگی ممکـن اسـت تحـت تـأثیر سـاز و کارهای دیگری اتفاق افتد، اما چون منجر به کم شدن ضخامت می شـود، مـی تـوان آن را تحـت عنـوان خوردگی یکنواخت مطرح کرد.

2) خوردگی شیاری: این نوع خوردگی در بیشتر مواقع در شیارهایی که در معرض محیط خورنده قـرار دارند منجر به خوردگی موضعی شدیدی می شود و معمولاً همراه با حجـم هـای کوچـک محلـول هـا یـا مایعاتی که در اثر وجود سوراخ، سطوح واشرها، محل روی هـم قـرار گـرفتن دو فلـز، رسـوبات سـطحی و شیارهای زیر پیچ، مهره ها و میخ پرچ ها ساکن شده اند یا به اصطلاح حالت مرده پیدا کـرده انـد، ایجـاد می شود.

3) خوردگی دو فلزی(گالوانیک): زمانی که دو فلز غیر هم جنس کـه در تمـاس الکتریکـی بـا یکـدیگر هستند در معرض یک محلول هادی قرار می گیرند، فلز مقاومتر خورده نمی شود اما آهنگ خوردگی فلـز فعال تر که مقاومت خوردگی کمتری دارد، افزایش می یابد. به علت وجـود جریـان هـای الکتریکـی بـین فلزات غیرهمجنس، این نوع خوردگی گالوانیک یا دو فلزی نامیده می شود.

4) خوردگی بین دانه ای: در این نوع خوردگی مرز دانه نسبت به خـود دانـه از سـطح انـرژی بـالاتری برخوردار بوده و در نتیجه از نظر شیمیایی فعال تـر و نسـبت بـه خـوردگی حسـاس تـر اسـت. خـوردگی

موضعی و متمرکز در مرز دانه ها یا نواحی نزدیک به آنها در حالیکه خود دانه ها اصلاً خورده نشده انـد یـا اینکه کم خورده شده اند را خوردگی بین دانه ای می نامند.

5) جدایش انتخابی: جدایش انتخابی نوعی خوردگی است که در آن عناصر خاصی از آلیاژ، حل شـده و از آن جدا می شوند. روی، آلومینیوم، کبالت، نیکل و کروم از معمولی ترین عناصری هسـتند کـه بـه ایـن طریق از آلیاژ جدا می شوند.

6) خوردگی سایشی: خوردگی سایشی عبارتست از افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلـز در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. در این فرایند یونهای فلزی حل شده روی سـطح فلـز، در اثر حرکت سیال روی سطح باقی نمانده و یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز به طریـق مکانیکی جدا می شوند.

7) خسارات هیدروژنی: خسارات هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که دلالت بر خسارت مکـانیکی وارد شده به فلز در اثر وجود یا واکنش با هیدروژن دارد که خود به چهـار گـروه تـاول زدن هیـدروژنی، تـردی هیدروژنی، دکربوره کردن و خوردگی هیدروژنی تقسیم بندی می شود.

8) خوردگی توأم با تنش: این پدیده عبارت است از ترک خوردن در اثـر خـوردگی تـوأم بـا تـنش کـه نتیجه اعمال همزمان تنش های کششی و محیط خورنده روی فلز است. در این شرایط ترک هـای ریـزی که ناشی از فرایندهای خوردگی موضعی هستند، به داخل فلز یا آلیاژ پیشرفت می کنند.

این طبقه بندی برمبنای شکل ظاهری حمله عوامل خورنده به سطح فلز صورت پذیرفته است. لازم بـه یادآوری است که تعیین مرز مشخصی بین انواع خوردگی امکان پذیر نیست، زیـرا تعـداد زیـادی از انـواع خوردگی با هم فصل مشترک دارند.

1-4- خوردگی تحت تنش

ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش که نتیجـه اعمـال همزمـان تـنش هـای کششـی و محـیط

خورنده روی فلز می باشد، خوردگی تنشی نام دارد. از خصوصیتهای ترک های خوردگی تنشی این است که عمود بر تنش اعمالی رشد می کنند. در این نوع خوردگی عامل تنش به عنوان شروع کننده است و در نهایت، شکست توسط عامل مکانیکی صورت می گیرد.

ویژگی تنش در خوردگی تنشی

1- تنش کششی باشد.

2- به اندازه کافی بزرگ باشد.

3- از هر نوعی می تواند باشد. (مکانیکی یا پسماند)

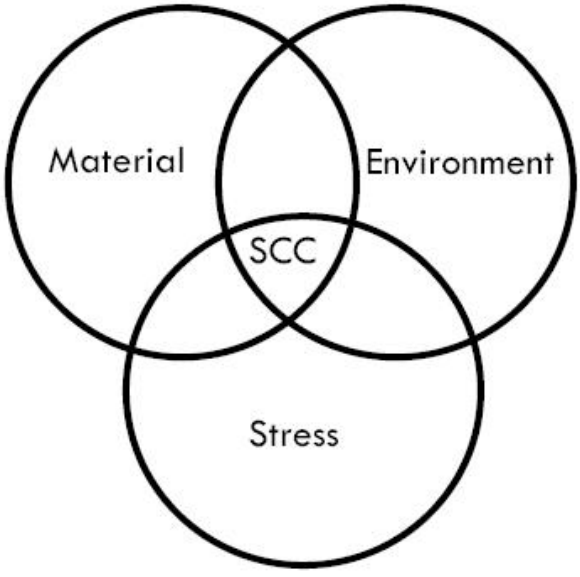
خوردگی تحت تنش به صورت شکل گیری ترکها در فلزات با اثر همزمان محیط خورنده معین و تنش کششی بیان می شود. خوردگی تحت تنش نه فقط در مواد با مقاومت کششی بالا بلکه در مواد نرم[1] نیز باعث کاهش چقرمگی شکست می شود. اصطلاح تشدید[2] برای توصیف این فرآیند به خاطر ترکیب و عمل همزمان نیروهای شیمیایی و مکانیکی که منجر به انتشار ترک می شوند، بکار می رود، درحالیکه هیچ کدام از این دو فاکتور اگر به صورت مستقل یا متناوب هم عمل کنند، این اثر را نخواهند داشت.

فاکتورهای مهم در خوردگی توام با تنش درجه حرارت، ترکیب شیمیایی محلول، ترکیب شیمیایی فلز، تنش و ساختمان فلز می باشد.

در همه موارد خوردگی تحت تنش 3 پارامتر همزمان تاثیر گذار هستند[3]:

- مواد
- محیط
- بارگذاری مکانیکی

[1]- Ductile
[2]- Synergy



شکل 1-1: پارامترهای تاثیر گذار در خوردگی تحت تنش[3]

بنابراین هر کدام از این پارامترها باید به طور ویژه مورد توجه قرار گیرند. خوردگی تحت تنش فقط در محیط هایی که فیلم غیر فعال در سطع فلز تشکیل می شود، انجام پذیر است. اگر سرعت تشکیل فیلم روی سطح خیلی سریع باشد، سپس فیلم غیر فعال در سطع فلز فوراً روی فیلم غیر فعال دیگر قرار می گیرد و شکست اتفاق می افتد[4و5].

خوردگی یکی از مشکلات عمده صنایع به شمار می رود و خوردگی تحت تنش یکی از خطرناکترین نوع خوردگی ها می باشد که در اثر همزمانی خوردگی و تنش مکانیکی رخ می دهد. سالانه صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، خودروسازی و سایر صنایع میلیاردها دلار خسارت به واسطه این نوع خوردگی را متحمل می شوند که با مانیتورینگ و پیشگیری به موقع می توان این هزینه ها را کاهش داد. مشاهدات نشان می دهد که تقریباً یک سوم از همه موارد شکست به وسیله اثرات محیطی مانند خوردگی می باشد[6].

شکل 1-2 خسارت ناشی از شکست یک تانک نگهدارنده هیدروژن فشرده را نشان می دهد که منجر به تخریب کارخانه شده است. این شکست به واسطه ترک خستگی به وجود آمده که ناشی از تاثیر

هیدروژن می باشد و هزینه خرابی پرداخت شده توسط شـرکت بیمـه 50 میلیـون دلار در قبـال خسـارت می باشد[7].

شکل 1-2: تخریب کارخانه پس از انفجار مخزن هیدروژن[7]

در این مکانیزم شکست خرابی بوسیله همزمانی تنش و ماده خورنده و خواص مواد به وجـود مـی آیـد. یک مثال دیگر برای این شکست به واسطه خوردگی تحت تـنش حادثـه ای در یـک اسـتخر در سـوئیس است[7]. کف این استخر از بتون و فولاد استنلیس استیل304[1] بود که پس از چند سـال سـقوط کـرد و 15 شناگر کشته شدند. بازرسی ها نشان داد استنلیس استیل شدیداً خورده شده است، شکل 1-3.

[1]- 304 Stainless Steel

شکل 1-3: سطح شکست میله های شکسته شده در بتن ساخته شده از استنلیس استیل[7]

با توجه به خوردگی تحت تنش، یک ماده را به تنهایی نمی توان براساس ترکیب شیمیایی طبقه بندی کرد، بلکه شرایط به وجود آمده به وسیله عملیات حرارتی را نیز باید در نظر گرفت. در جدول1-1 تعدادی از این مواد را نشان داده شده است[8].

جدول 1-1: مثال هایی از خوردگی تحت تنش[8]

Material	Medium	Remarks
Low alloy ferritic steels	Alkaline liquids (caustic solutions, carbonate and bicarbonate solutions)	Among other things, so-called "caustic embrittlement". Precise composition and heat treatment of material as well as temperature and concentration of the solution are important
	Nitrate solutions	As above. Test in a boiling standardised (DIN 50915) water and Ca $(NO_3)^{2-}$ solution as test for susceptibility to intercrystalline SSC
High alloy austentite steels	Chloride solutions	Min. temperature of approximately 60°C usually required, transcrystalline crack formation
	Caustic alkali solutions	Trans- or intercrystalline crack formation dependent on the electrochemical potential, concentration, heat treatment, etc.
	Oxidised high temperature water	Intercrystaline crack formation on sensitised material (chrome depletion: intercryst. without tensile stress in Strauss test)
Nickel-based alloys	Caustic alkali solutions	Trans- or intercrystalline cracking depending on material (or condition) electrochemical potential, concentration, etc.
	Pure high temperature water	"Coriou" effect; dependent on material, long incubation time, crack conditions have a negative effect
Copper-based alloys	Ammonia solution, nitrate solutions	Composition of the solutions is critical
Aluminium-based alloys	In particular solutions containing halogen	Intercrystalline crack formation, composition and heat treatment of the material is important
Titanium-based alloys	Aqueous solutions containing chloride	Crack formation often only when sharp notches are present

1-5- مکانیزم های خوردگی تحت تنش

به دلیل پیچیدگی واکنش بین محیطهای مختلف، ماهیت آلیاژ، ساختار متالورژیکی و سایر موارد امکان وجود یک مکانیزم واحد برای خوردگی تنشی تمام سیستم های فلز و محیط وجود ندارد. ولی عمدتا مکانیزم خوردگی توام با تنش به شرح زیر می باشد:

الف - مکانیزم های متالورژیکی

1- هم صفحه بودن نابجائیها: در فولادهای زنگ نزن که مستعد خوردگی تنشی هستند، نابجائیها به صورت دسته های هم صفحه قرار دارند. در حالیکه در آلیاژهایی که مقاوم هستند نابجائیها به صورت سلولی یا در هم پیچیده قرار دارند.

2- پیرتنشی و جدایش میکرونی: در پیرتنشی فولادهای زنگ نزن آستنیتی، سیلانهای پلاستیکی ناگهانی و تند اتفاق می افتد. این پدیده همراه با جدایش میکرونی اتمهای حل شونده به نواقص دینامیکی در ساختار کریستالی است. این نوع جدایش می تواند باعث رفتار ترک خوردن در اثر خوردگی تنشی از طریق میان دانه ای شود.

3- جذب شدن: عوامل فعال سطحی به سطح جذب شده و با باندهای تحت کرنش در نوک ترک واکنش نموده و باعث کاهش استحکام باند شده و سبب اشاعه ترک می شوند.

ب - مکانیزم های حل شدن

1- تشدید حل شدن در اثر تنش: ترک با انحلال آندی موضعی گسترش می یابد. نقش اصلی تغییر شکل پلاستیکی تشدید فرآیند حل شدن می باشد.

2- تشکیل فیلم در دیواره ترکها بر اساس مکانیزمهای هم صفحه ای بودن نابجایی ها: ترک ها در محلی که پله های لغرشی به سطح می رسند، شروع می شوند. رشد ترکها در نتیجه انحلال فلزی است که در حال تسلیم است. با رشد ترک پوسته روی دیواره ی ترک مجدداً تشکیل می شود و به عنوان کاتد

عمل می کند.

3- غنی شدن نسبت به عنصر نجیب

4- ترک خوردن در اثر خوردگی تنشی با شکستن و پاره شدن مداوم فیلم های غیرفعال پیشروی می کند.

5- مهاجرت یون کلرید

ج - مکانیزم های هیدروژن:

1- تشکیل هیدرید

برای اینکه بتوانیم محدوده وسیعی از مکانیزم های تخریب را طبقه بندی کنیم، پیشنهاد شده که بین شکل گیری ترک آندی، کاتدی تمایز قائل شویم. مطابق با این مکانیزم ها خوردگی تحت تنش کاتدی می تواند در محدوده ای از هیدروژن تردی طبقه بندی شود که در اینجا دو مکانیزم عمده فرایند خوردگی تحت تنش، حل شدن آندی و هیدروژن تردی را شرح می دهیم.

1-5-1- تردی هیدروژن

هیدروژن تردی حالتی بین تردی هیدروژن کلاسیک و خوردگی تحت تنش می باشد و در فولادهای با مقاومت کششی بالا در محیط آبی با خورندگی پایین رخ می دهد. فولادهای زنگ نزن در اسید سولفوریک، آلیاژها در محلول های هالوژنی و آلیاژهای آلومینیوم در محلولهای آبی مثال هایی از این نوع می باشند[9].

تخریب مواد به واسطه خوردگی تنشی و تردی هیدروژنی تنها بر پایه خصوصیات مکانیکی مواد طبقه بندی نمی شود. هر دو نوع تخریب بوسیله محیط اطراف ایجاد می شوند و بنابراین بوسیله

فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی کنترل مـی شـوند. ظـاهر خرابـی هـا نیـز شـبیه یکـدیگر می باشد. در هر دو مورد، شکست یا ترک با چقرمگی کم ظاهر می شود و مواد فقط بـه طـور موضـعی در محل هایی که تماس با محیط خورنده دارند، ترد می شوند. نقش هیـدروژن در مکـانیزم خـوردگی تحـت تنش از دهه 1970 شناخته شده است. اگرچه ترک خوردگی به واسـطه هیـدروژن و تـرک خـوردگی بـه واسطه خوردگی تنشی پدیده هایی مشابه هستند ولی هر دو نـوع خرابـی معمـولا بـه طـورمجزا توصـیف می شوند. دلیل این کار پیچیدگی مکانیزم خرابی میباشد که بـه مـاده و محـیط خرابـی بسـتگی دارد. در برخی موارد یک ترکیب از هر دو مکانیزم یافت می شود که خوردگی تحت تنش بواسطه هیدروژن نامیـده می شود. تردی هیدروژنی[1] فرآیندی است که در آن هیدروژن با نفوذ به ماده فلزی منجر به ایجـاد تـرک، کاهش انعطاف‌پذیری و در نهایت شکست و تخریب آن می‌شود. شکست مواد فلـزی در اثـر پدیـده تـردی هیدروژنی اغلب غیرقابل پیش‌بینی و گاه فاجعه‌بار است. دلیل آن این است که برای وقوع شکست، اعمـال نیروی خارجی نیاز نیست و وجود تنش‌های پسماند[2] می‌تواند به عنـوان منبـع اعمـال تـنش عمـل کنـد. آستانه تنش هایی که سبب ترک می‌شود معمولا کمتر از تنش تسـلیم مـاده اسـت. بنـابراین مـاده بـدون اینکه تغییر شکل کافی دهد یا صدمات ظاهری آن قابل رویت باشد، به صـورت ناگهـانی و در حقیقـت در اثر یک شکست درونی تخریب می‌شود. حد تردی هیدروژنی به مقدار هیدروژن و مدت زمانی کـه مـاده در معرض آن قرار گرفته وابسته است. هیدروژن که از لحاظ شعاع اتمی بسیار کوچک است می‌توانـد در طـی فرآیند ساخت یا عملیات انجام گرفته روی فلز و یا در حین کاربرد قطعـه فلـزی بـه درون آن نفـوذ کنـد. هنگامیکه خوردگی در اجزاء سیستم بوسیله نفوذ هیدروژن مد نظر باشد هیدروژن ایزوله شده کاتـدی بـه ماده نفوذ کرده و باعث تردی موضعی می شود. ضریب نفوذ هیدروژن در فولاد بین 10^{-4} تـا $10^{-5}(cm^2/s)$ می باشد[10]. که قابل مقایسه با ضریب نفوذ در سیالات می باشد. بنابراین به محـض نفـوذ هیـدروژن در فازهای مرزی داخل فلز، قابلیت نفوذ تا عمق 100µm به داخل ماده را دارد. همچنین تجمع هیـدروژن در قسمت های سطحی (برای مثال مرزدانه، ناخالصی ها، حفره ها) رخ می دهد[11].

[1] - Hydrogen Embitterment
[2] - Residual Stress