

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش الکترونیک

طراحی و ساخت دستگاه C-scan چند فرکانسی به روش جریان گردابی و بهبود ویژگی های آن

نگارش:

بنفشه رضانی

استاد راهنما:

دکتر امیرحسین رضایی

اردیبهشت ۱۳۸۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم،

این دو نعمت الهی،

و

تقدیم به همسر فداکار و دلسوزم،

این موهبت الهی،

که هرچه دارم و خواهم داشت

از آنهاست

سپاس و تقدیر

بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های ارزشمند و دلسوزانه استاد ارجمند جناب آقای دکتر رضایی کمال تشکر و قدردانی نمایم.
همچنین از راهنمایی‌های ارزنده آقای مهندس حسن‌زاده، صمیمانه تشکر می‌کنم.

چکیده

امروزه آزمون غیر مخرب به عنوان روشی مؤثر جهت اطمینان از عدم وجود نقص، در قطعات و سازه‌های صنعتی و مهندسی کاربرد فراوانی یافته است. آزمون غیر مخرب بدون آنکه شرایط موجود در جسم را تغییر دهد می‌تواند وجود نقص را در قطعه مشخص کند. امروزه روش‌های مختلفی برای این منظور بکار گرفته می‌شود. آزمون جریان گردابی یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد، که امروزه کاربرد وسیعی در بازرسی غیر مخرب و تهیه تصاویر پزشکی یافته است. اساس کار این روش بر مبنای یک قاعده کلی القای الکترومغناطیسی می‌باشد. بر اساس این قاعده کلی، وقتی کویل حامل جریان متناوب در نزدیکی یک قطعه رسانا قرار می‌گیرد، جریانی در قطعه برقرار می‌شود که خود بر کویل اولیه تأثیر می‌گذارد. این جریان در برخورد با نقص‌ها و ناپیوستگی‌های ماده تغییر یافته و این تغییر رابه کویل اولیه منتقل می‌کند. در آزمون گردابی تکنیک‌های متفاوتی بر پایه ویژگی‌های این جریان بکار گرفته می‌شود. یکی از این تکنیک‌ها، تکنیک چند فرکانسی است که با تغییر فرکانس جریان تحریک، لایه‌های مختلف جسم را مورد بررسی قرار می‌دهد. یکی از روش‌هایی که در آزمون جریان گردابی برای تخمین خرابی وجود دارد، استفاده از صفحه امیدانس و تحلیل تغییرات سیگنال جریان گردابی است که البته در ساختارهای پیچیده کاری بسیار سخت می‌نماید. امروزه سیستم‌های اتوماتیک تست جریان گردابی جایگزین روشهای دستی شده‌اند و استفاده از تکنیک‌های جدید پردازش سیگنال جهت بهبود تصاویر حاصل، زمینه‌های کاری مختلفی را در این زمینه به وجود آورده است.

بر همین اساس در این پایان‌نامه سیستمی طراحی و ساخته می‌شود که سطح و لایه‌های زیرین جسم را در همه جهات با تکنیک چند فرکانسی اسکن کرده و با استفاده از ویژگی‌های ذکر شده تصاویر C-scan از لایه‌های مختلف جسم ایجاد کند. سپس با بکارگیری تکنیک‌های پردازش تصویر اثر برخی نویزهای موجود در این تصاویر تا حدی کاهش یافته و کیفیت تصاویر افزایش می‌یابد. همچنین روشهای مختلفی برای ترکیب اطلاعات بدست آمده در فرکانسهای مختلف جهت اتخاذ یک تصمیم واحد، معرفی و بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی فارسی: آزمون غیر مخرب، جریان گردابی، تصاویر جریان گردابی

کلمات کلیدی انگلیسی: Nondestructive test, Eddy current, Eddy current images

فهرست مطالب

..... 1	فصل اول: مقدمه
..... 1	1-1- مقدمه
..... 2	1-2- ناپیوستگیها و منشأ آنها
..... 3	1-2-1- تولید اولیه فلزات
..... 3	1-2-2- ریخته‌گری
..... 5	1-2-3- فرایند جوش
..... 6	1-2-4- ناپیوستگی‌های ناشی از خوردگی
..... 6	1-2-5- ناپیوستگی‌های ناشی از کاربرد- ترک خوردگی خستگی
..... 7	1-2-6- ناپیوستگی‌های ناشی از کاربرد- خزش
..... 8	فصل دوم: مروری بر آزمون‌های غیرمخرب
..... 8	1-2- آزمونهای غیرمخرب
..... 8	2-2- روشهای متداول آزمونهای غیرمخرب
..... 9	2-2-1- آزمون مایع نافذ
..... 10	2-2-2- آزمون پرتو نگاری
..... 11	2-2-3- بازرسی فراصوتی
..... 12	2-2-4- آزمون نشت شار مغناطیسی
..... 14	2-2-5- بازرسی به روش الکتریکی و الکترومغناطیسی
..... 14	2-2-5-1- روش افت پتانسیل
..... 14	2-2-5-2- روش اندازه‌گیری میدان مغناطیسی سطحی
..... 15	2-2-5-3- روش جریان گردابی
..... 15	2-2-6- دیگر روشهای آزمون غیرمخرب
..... 15	2-2-6-1- آزمون گسیل صوتی
..... 16	3-2- خلاصه فصل
..... 17	فصل سوم: آزمون جریان گردابی

..... ۱.۷	۱-۳-۱- مقدمه
..... ۱.۸	۲-۳-۲- مفاهیم روش جریان گردابی
..... ۱.۸	۳-۲-۱- روش القای جریان گردابی
..... ۱.۹	۳-۲-۲- روشهای آشکارسازی جریان گردابی
..... ۲.۱	۳-۲-۳- آنالیز دامنه و فاز سیگنالهای آزمون جریان گردابی
..... ۲.۲	۳-۳- انتخاب فرکانس بهینه و کنترل عمق نفوذ جریان گردابی
..... ۲.۴	۳-۴- تجهیزات آزمون جریان گردابی
..... ۲.۶	۳-۵-۵- بررسی کیفی سیگنال جریان گردابی در حضور عوامل مؤثر
..... ۲.۶	۳-۵-۱- اثر خیزش و اثر پرکنندگی
..... ۲.۷	۳-۵-۲- اثر تغییر فرکانس
..... ۲.۸	۳-۵-۳- اثر لبه
..... ۲.۹	۳-۵-۴- اثر نفوذپذیری مغناطیسی
..... ۳:	۳-۵-۵- اثر رسانایی
..... ۳:	۳-۵-۶- اثر ضخامت قطعه
..... ۳.۱	۳-۵-۷- اثر قطر کویل
..... ۳.۲	۳-۶- نمایش امیدانس
..... ۳.۳	۳-۷-۷- تکنیکهای بازرسی جریان گردابی
..... ۳.۳	۳-۷-۱- آزمون جریان گردابی میدان راه دور
..... ۳.۴	۳-۷-۲- آزمون جریان گردابی پالسی
..... ۳.۴	۳-۷-۳- آزمون جریان گردابی چند فرکانسی
..... ۳.۵	۳-۸- نمونه‌ای از کاربردهای آزمون جریان گردابی
..... ۳.۶	۳-۹- خلاصه فصل
..... ۳.۷	فصل چهارم: طراحی و ساخت دستگاه اسکن جریان گردابی
..... ۳.۷	۴-۱- مقدمه

..... ۳۸	۲-۴- اجزای سیستم
..... ۳۸	۴-۲-۱- واحد کنترل
..... ۳۹	۴-۲-۱-۱- واحد کنترل و کامپیوتر
..... ۴۰	۴-۲-۱-۲- واحد کنترل و ES
..... ۴۱	۴-۲-۱-۳- واحد کنترل و درایور
..... ۴۶	۴-۲-۲- واحد نمایش و تنظیمات اولیه
..... ۵۰	۴-۲-۳- درایور، واحد انتقال توان و سیستم مکانیکی حرکت
..... ۵۱	۴-۲-۴- واحد تجهیزات جریان گردابی [۱۲]
..... ۵۲	۴-۳- ساخت تصویر امپدانس
..... ۵۳	۴-۴- نتایج اسکن شده
..... ۶۱	۴-۵- خلاصه فصل
..... ۶۲	فصل پنجم: افزایش کیفیت تصویر امپدانس
..... ۶۲	۵-۱- مقدمه
..... ۶۸	۵-۲- معیارهای ارزیابی کیفیت
..... ۷۱	۵-۳- مرحله پردازش تک تصویر
..... ۷۱	۵-۳-۱- کاهش اثر تغییرات خیزش
..... ۷۴	۵-۳-۲- کاهش اثر قطر پروب
..... ۷۷	۵-۳-۳- فیلتر کردن در حوزه تبدیل
..... ۷۷	۵-۳-۳-۱- فیلتر کردن در حوزه تبدیل FFT
..... ۸۰	۵-۳-۳-۲- فیلتر کردن در حوزه تبدیل DCT
..... ۸۱	۵-۳-۳-۳- فیلتر کردن در حوزه تبدیل ویولت
..... ۸۹	۵-۳-۴- پنجره گذاری در حوزه مکان
..... ۸۹	۵-۳-۴-۱- پنجره گوسی
..... ۹۱	۵-۳-۴-۲- میانگینگیری
..... ۹۲	۵-۳-۴-۳- مقدار ماکزیمم پنجره
..... ۹۲	۵-۳-۴-۴- مقدار مینیمم پنجره
..... ۹۳	۵-۳-۴-۵- مقدار میانه پنجره

.....۹۳.....	۵-۳-۴-۶- مقدار مناسب پنجره
.....۹۴.....	۵-۳-۵- پردازش بر روی هیستوگرام
.....۹۴.....	۵-۳-۱-۵- تبدیل نمایی گوسی (GET)
.....۹۷.....	۵-۳-۲-۵- تبدیل نمایی لگاریتمی (LET)
.....۹۹.....	۵-۳-۳-۵- تبدیل نمایی گوسی-لگاریتمی
.....۱:۲.....	۵-۳-۶- روش ترکیبی
.....۱:۵.....	۵-۴- بررسی روشهای ترکیب اطلاعات
.....۱:۶.....	۵-۴-۱- ترکیب اطلاعات در حوزه مکان
.....۱:۶.....	۵-۴-۱-۱- روش مقدار ماکزیمم
.....۱:۹.....	۵-۴-۱-۲- روش میانگین گیری
.....۱:۱۱.....	۵-۴-۱-۳- روش میانگین گیری وزندار
.....۱:۱۱.....	۵-۴-۱-۴- روش مقدار مناسب
.....۱:۱۲.....	۵-۴-۱-۵- سنجش میزان تشابه
.....۱:۱۵.....	۵-۴-۲- ترکیب اطلاعات در حوزه تبدیل
.....۱:۱۶.....	۵-۴-۱-۲- الگوریتم تجزیه و ترکیب بر اساس تبدیل هرمی
.....۱:۲۲.....	۵-۴-۲-۲- الگوریتم تجزیه و ترکیب بر اساس تبدیل ویولت
.....۱:۲۵.....	۵-۴-۲-۳- الگوریتم تجزیه و ترکیب بر اساس تبدیل مولفه‌های اصلی
.....۱:۲۹.....	۵-۵- خلاصه فصل
.....۱:۳۱.....	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد
.....۱:۳۵.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

۳	شکل ۱-۱- منشاء پاره ای از نقص‌ها که در مواد و قطعات یافت می‌شوند.....
۳	شکل ۱-۲- رشته سیلیکات در یک میله فولادی.....
۴	شکل ۱-۳- سطح مقطع یک شمش که ناپیوستگی در اثر انقباض ناشی از انجماد را نشان می‌دهد.....
۴	شکل ۱-۴- تاول‌های ناشی از عبور گاز در آلیاژ آلومینیم.....
۶	شکل ۱-۵- ترک خوردگی خوردگی تنش.....
۷	شکل ۱-۶- شکست شدید لبه در اثر خزش در یک تیوب گرم‌کننده در یک سیستم قدرت.....
۱۰	شکل ۱-۱- نمایش ساده از یک سیستم پرتونگاری.....
۱۲	شکل ۲-۲- نمایش کلی از آزمون فراصوت.....
۱۲	شکل ۲-۳- نشت شار مغناطیسی در اثر وجود نقص.....
۱۳	شکل ۲-۴- آشفتگی میدان مغناطیسی در اثر ناپیوستگی جسم در راستاهای عمود بر هم.....
۱۸	شکل ۳-۱- نمای ساده‌ای از یک کویل جریان گردابی بر روی سطح.....
۲۰	شکل ۳-۲- (الف) مدل ترانسفورماتوری برای آزمون جریان گردابی (ب) مقایسه کیفی تغییرات امپدانس در یک سیستم آزمون جریان گردابی و یک ترانسفورماتور ساده.....
۲۱	شکل ۳-۳- اندازه و فاز امپدانس.....
۲۱	شکل ۳-۴- نمودار تغییرات اندازه و فاز چگالی جریان گردابی را نسبت به تغییر عمق بر حسب عمق نفوذ
۲۲	استاندارد.....
۲۴	شکل ۳-۵- یک مدار پل.....
۲۴	شکل ۳-۶- پیکربندی یک مبدل جریان گردابی (الف) مطلق (ب) تفاضلی.....
۲۶	شکل ۳-۷- (الف) کویل‌های بوبین شکل (ب) کویل‌های نعل اسبی.....
۲۶	شکل ۳-۸- تأثیر پارامترهای مؤثر بر صفحه امپدانس.....
۲۷	شکل ۳-۹- اثر خیزش.....
۲۸	شکل ۳-۱۰- اثر تغییر فرکانس بر امپدانس دریافتی از مدار اولیه (الف) بدون حضور مدار ثانویه (ب) در حضور مدار ثانویه.....
۲۸	شکل ۳-۱۱- اثر لبه بر جریان گردابی.....
۲۹	شکل ۳-۱۲- اثر لبه بر امپدانس کویل اولیه.....
۳۰	شکل ۳-۱۳- اثر مواد (الف) هادی غیرمغناطیس (ب) هادی مغناطیس (ج) غیرهادی و غیرمغناطیس بر امپدانس.....
۳۱	شکل ۳-۱۴- تأثیر افزایش تعداد ورقه‌های برنج با ضخامت 10^{-3} اینچ بر تغییرات امپدانس.....
۳۲	شکل ۳-۱۵- (الف) نمایش عبور یک پروب تفاضلی از روی ناپیوستگی (ب) مراحل دریافت سیگنال ناشی از آن
۳۳	شکل ۳-۱۶- نمایش سیگنال پروب (الف) مطلق (ب) تفاضلی روی صفحه اسلوسکوپ.....
۳۵	شکل ۳-۱۷- سیگنال ارسالی به کویل تحریک در آزمون چند فرکانسی (الف) مالتی پلکس (ب) همزمان.....
۳۸	شکل ۴-۱- دیاگرام بلوکی سیستم اسکنر.....
۳۹	شکل ۴-۲- دیاگرام بلوکی معماری واحد کنترل.....

- شکل ۳-۴- بسته کنترلی ارسالی از pc به واحد کنترل جهت تنظیم پارمترهای اسکن..... ۳۹
- شکل ۴-۴- بسته کنترلی ارسالی از pc به واحد کنترل جهت انجام حرکت دستی موتورها..... ۴۰
- شکل ۵-۴- بسته ارسالی از پورت A میکروکنترلر..... ۴۱
- شکل ۶-۴- نحوه حرکت اسکنر روی سطح XY در حالت (الف) مستقیم (ب) ترانهاده..... ۴۲
- شکل ۷-۴- پالس ارسالی واحد کنترل به درایور..... ۴۳
- شکل ۸-۴- دیاگرام زمانی تایمر ۱ در مد Fast PWM..... ۴۳
- شکل ۹-۴- ساختار برنامه مورد استفاده در واحد کنترل..... ۴۵
- شکل ۱۰-۴- نمای صفحه اصلی در واحد نمایش و تنظیمات اولیه..... ۴۶
- شکل ۱۱-۴- زیربرنامه مربوط به حرکت دستی پروب..... ۴۷
- شکل ۱۲-۴- زیربرنامه مربوط به تنظیم پارمترهای ES..... ۴۸
- شکل ۱۳-۴- نمای زیربرنامه Replay..... ۴۹
- شکل ۱۴-۴- سیستم مکانیکی..... ۵۰
- شکل ۱۵-۴- پالس‌های فاز تولید شده در مد نرمال..... ۵۰
- شکل ۱۶-۴- دیاگرام مسیر عبور سیگنال در دستگاه..... ۵۱
- شکل ۱۷-۴- نمایی از دستگاه ES و پروب جریان گردابی..... ۵۲
- شکل ۱۸-۴- تصویر قطعه (الف) A (ب) B (ج) C (د) D..... ۵۴
- شکل ۱۹-۴- قطعه A در فرکانس ۳ کیلوهرتز (A3k)..... ۵۵
- شکل ۲۰-۴- قطعه A در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز (A10k)..... ۵۶
- شکل ۲۱-۴- قطعه A در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز (A100k)..... ۵۷
- شکل ۲۲-۴- قطعه B در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز (B100k)..... ۵۸
- شکل ۲۳-۴- قطعه C در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز (C20k)..... ۵۹
- شکل ۲۴-۴- قطعه D در فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز (D30k)..... ۶۰
- شکل ۱-۵- نمونه‌ای از یک سیگنال جریان گردابی (الف) قبل و (ب) بعد از افزایش کیفیت با روش‌های پردازشی..... ۶۳
- شکل ۲-۵- نتایج اسکن (الف) جریان گردابی (ب) ترموگرافی نوعی کامپوزیت تحت فشار..... ۶۵
- شکل ۳-۵- روش‌های ترکیب اطلاعات..... ۶۶
- شکل ۴-۵- دیاگرام بلوکی مرحله پیش‌پردازش..... ۶۸
- شکل ۵-۵- یک تصویر نمونه برای نشان دادن نواحی سیگنال و نویز..... ۶۹
- شکل ۶-۵- امپدانس حاصل از اسکن قطعه A در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز در شرایط وجود تغییرات خیزش..... ۷۲
- شکل ۷-۵- امپدانس حاصل از اسکن قطعه A در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز پس از حذف اثر تغییرات خیزش..... ۷۳
- شکل ۸-۵- تصویر نرمالیزه شده اندازه امپدانس قطعه A100k (الف) قبل و (ب) بعد از فرایند هم‌ترازسازی..... ۷۴
- شکل ۹-۵- تصویر نرمالیزه شده اندازه امپدانس قطعه B100k (الف) قبل و (ب) بعد از فرایند هم‌ترازسازی..... ۷۴
- شکل ۱۰-۵- نمایش الگوریتم ریچاردسون-لوسی بر روی یک تصویر نمونه. (الف) تصویر اصلی (ب) تصویر نرم شده (ج) - (و) تصویر بازسازی شده با الگوریتم ریچاردسون-لوسی با ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ تکرار..... ۷۶
- شکل ۱۱-۵- نمایش الگوریتم ریچاردسون-لوسی بر روی یک تصویر نمونه. (الف) تصویر اصلی (ب) تصویر نرم شده (ج) - (و) تصویر بازسازی شده با الگوریتم ریچاردسون-لوسی با ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ تکرار..... ۷۷

۷۸	شکل ۵-۱۲- ارزیابی نتایج اعمال فیلتر FFT با شعاع‌های مختلف بر روی تصویر نمونه A100K با دو معیار (الف) SNR و (ب) EOI.....
۷۹	شکل ۵-۱۳- تصویر اندازه امیدانس نمونه A100k (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فیلتر پایین‌گذر در حوزه FFT
۷۹	شکل ۵-۱۴- تصویر اندازه امیدانس نمونه B100k (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فیلتر پایین‌گذر در حوزه FFT
۷۹	شکل ۵-۱۵- تصویر واریانس تصویر (۵-۱۴) (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال فیلتر پایین‌گذر در حوزه FFT.....
۸۱	شکل ۵-۱۶- بررسی اعمال الگورتیم عبور R/ بر روی ماتریس DCT تصویر.....
۸۲	شکل ۵-۱۷- فضاهای چنددقتی تودرتو.....
۸۲	شکل ۵-۱۸- افراز فضای فرکانسی در یک تبدیل چنددقتی.....
۸۳	شکل ۵-۱۹- پیاده‌سازی افراز فضای فرکانسی در یک تبدیل چنددقتی.....
۸۴	شکل ۵-۲۰- ساختار هرمی ویولت دوبعدی.....
۸۶	شکل ۵-۲۱- تصویر امیدانس هم‌تراز شده قطعه B100k، (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال WBD به روش تک بعدی.....
۸۸	شکل ۵-۲۲- تصویر امیدانس هم‌تراز شده قطعه B100k، (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال WBD به روش دو بعدی.....
۸۸	شکل ۵-۲۳- تصاویر واریانس مربوط به تصاویر حاصل از دو روش فیلتر در حوزه (الف) FFT و (ب) ویولت دو بعدی.....
۸۹	شکل ۵-۲۴- نمودار تغییرات کیفیت تصویر (با معیار SNR) با تغییر پارامترهای σ و اندازه پنجره گوسی.....
۹۰	شکل ۵-۲۵- تصویر نمونه A100K (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال پنجره گوسی در حوزه مکان.....
۹۰	شکل ۵-۲۶- تصویر نمونه B100K (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال پنجره گوسی در حوزه مکان.....
۹۰	شکل ۵-۲۷- تصویر واریانس نمونه B100K (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال پنجره گوسی در حوزه مکان.....
۹۱	شکل ۵-۲۸- پارامتر SNR بر حسب n برای دو قطعه نمونه A100k و B100k.....
۹۲	شکل ۵-۲۹- تصویر نمونه B100k فیلتر ایده‌آل شده (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال ماکزیمم پنجره.....
۹۲	شکل ۵-۳۰- تصویر واریانس نمونه B100k فیلتر ایده‌آل شده (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال ماکزیمم پنجره.....
۹۳	شکل ۵-۳۱- تصویر نمونه B100k فیلتر ایده‌آل شده (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال مقدار مناسب پنجره.....
۹۴	شکل ۵-۳۲- تصویر واریانس نمونه B100k فیلتر ایده‌آل شده (الف) قبل و (ب) بعد از اعمال مقدار مناسب پنجره.....
۹۵	شکل ۵-۳۳- (الف) تابع $T_G(i)$ ، به ازای چند مقدار α (ب) - بررسی اثر اعمال تبدیل نمایی گوسی بر تصاویر نمونه‌های A100K و B100K.....
۹۶	شکل ۵-۳۴- بررسی تأثیر مثبت و منفی تبدیل نمایی گوسی بر روی کیفیت تصویر.....
۹۷	شکل ۵-۳۵- تابع $T_L(i)$ در تبدیل نمایی لگاریتمی، به ازای چند مقدار p.....
۹۸	شکل ۵-۳۶- بررسی اثر اعمال تبدیل نمایی گوسی بر تصاویر نمونه‌های A100K و B100K.....
۹۹	شکل ۵-۳۷- بررسی تأثیر مثبت و منفی تبدیل نمایی لگاریتمی بر روی کیفیت تصویر
۱۰۰	شکل ۵-۳۸- (الف) توابع نمایی گوسی (سبز)، نمایی لگاریتمی (قرمز) و نمایی گوسی - لگاریتمی (آبی) (ب) بهره آنها.....
۱۰۱	شکل ۵-۳۹- تصاویر حاصل از تصویر امیدانس قطعه B100k پس از اعمال (الف) فیلتر ایده‌آل، (ب) تبدیل GET، (ج) تبدیل LET (د) تبدیل GLET.....

- شکل ۵-۴۰- تصاویر واریانس حاصل از اعمال فیلتر ایده‌آل، تبدیل GET، LET و GLET بر روی تصویر
 ۱۰۱امپدانس قطعه B100k
- شکل ۵-۴۱- دیاگرام بلوکی الگوریتم را پیش‌پردازش جامع تک تصویر
 ۱۰۳
- شکل ۵-۴۲- تصویر نمونه A100K قبل و بعد از اعمال الگوریتم جامع پیش‌پردازش
 ۱۰۳
- شکل ۵-۴۳- واریانس تصویر نمونه A100K قبل و بعد از اعمال الگوریتم جامع پیش‌پردازش
 ۱۰۴
- شکل ۵-۴۴- تصویر نمونه B100K قبل و بعد از اعمال الگوریتم جامع پیش‌پردازش
 ۱۰۴
- شکل ۵-۴۵- واریانس تصویر نمونه B100K قبل و بعد از اعمال الگوریتم جامع پیش‌پردازش
 ۱۰۵
- شکل ۵-۴۶- تصاویر شبیه‌سازی شده برای سه فرکانس f_1 ، f_2 و f_3
 ۱۰۶
- شکل ۵-۴۷- تصویر حاصل از ترکیب به روش مقدار ماکزیمم برای (الف) B100k و B10k، (الف) B100k و B3k
 ۱۰۷
B3k و B10k، (الف) B100k، B3k و B10k
- شکل ۵-۴۸- (الف)-(ج) تصاویر S1، S2 و S3 (د) نتیجه ترکیب آنها با قانون مقدار ماکزیمم
 ۱۰۸
- شکل ۵-۴۹- (الف)-(ج) واریانس تصاویر S1، S2 و S3 (د) واریانس تصویر ترکیب با قانون مقدار ماکزیمم
 ۱۰۸
- شکل ۵-۵۰- (الف) ترکیب به روش میانگین‌گیری، برای تصاویر فیلتر ایده‌آل شده S (ب) واریانس تصویر ترکیب
 ۱۱۰
 شکل ۵-۵۱- (الف) ترکیب به روش مقدار مناسب برای تصاویر فیلتر ایده‌آل شده S در ۳ فرکانس مختلف (ب)
 ۱۱۱
 واریانس تصویر ترکیبی
- شکل ۵-۵۲- تصاویر حاصل از ترکیب دوتایی تصاویر فیلتر ایده‌آل شده S، به روش سنجش میزان تشابه
 ۱۱۲
- شکل ۵-۵۳- (الف) تصاویر حاصل از ترکیب سه‌تایی تصاویر فیلتر ایده‌آل شده S، به روش سنجش میزان تشابه
 ۱۱۲
 (ب) واریانس تصویر ترکیب
- شکل ۵-۵۴- دیاگرام بلوکی ترکیب اطلاعات در حوزه تبدیل
 ۱۱۵
- شکل ۵-۵۵- ساختار هرم گوسی و هرم لاپلاسی متناظر با آن
 ۱۱۷
- شکل ۵-۵۶- تجزیه ۴ مرحله‌ای تصاویر امپدانس A100k با هرم لاپلاسی
 ۱۱۸
- شکل ۵-۵۷- تجزیه ۴ مرحله‌ای تصاویر امپدانس B100k با هرم لاپلاسی
 ۱۱۹
- شکل ۵-۵۸- تجزیه ۴ مرحله‌ای تصاویر S
 ۱۱۹
- شکل ۵-۵۹- استراتژی ترکیب اطلاعات در تبدیل هرمی
 ۱۲۰
- شکل ۵-۶۰- ترکیب تصاویر S، با استفاده از تجزیه هرم لاپلاسی و الگوریتم ترکیب میانگین‌گیری
 ۱۲۱
- شکل ۵-۶۱- ترکیب تصاویر S، با استفاده از تجزیه هرم لاپلاسی و الگوریتم ترکیب مقدار ماکزیمم
 ۱۲۱
- شکل ۵-۶۲- تصویر حاصل از ترکیب ۳ تصویر S، بر اساس تجزیه ویولت و با الگوریتم ترکیب (الف) مقدار
 ۱۲۳
 ماکزیمم (ب) میانگین‌گیری (ج) مقدار مناسب (د) تقویت تقریب (ه) بهره متغیر
- شکل ۵-۶۳- تصاویر حاصل از هر یک از مولفه‌های اصلی در ترکیب ۳ تصویر قطعه نمونه A
 ۱۲۷
- شکل ۵-۶۴- تصاویر حاصل از هر یک از مولفه‌های اصلی در ترکیب ۳ تصویر قطعه نمونه B
 ۱۲۸
- شکل ۵-۶۵- تصاویر حاصل از هر یک از مولفه‌های اصلی در ترکیب ۳ تصویر S
 ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

۲۳	جدول ۱-۳- عمق نفوذ استاندارد تعدادی از مواد برای چند فرکانس مختلف.....
۴۲	جدول ۱-۴- مقادیر بسته‌های کنترلی ارسال شده از پورت A میکروکنترلر.....
۵۴	جدول ۲-۴- مشخصات قطعات اسکن شده.....
۷۴	جدول ۱-۵- چند معیار کمی برای ارزیابی اثر هم‌ترازسازی بر روی دو قطعه A100K و B100K.....
۷۹	جدول ۲-۵- بررسی اعمال فیلتر پایین‌گذر ایده‌آل بر روی دو تصویر نمونه A و B در فرکانس‌های مختلف.....
۸۶	جدول ۳-۵- بررسی اثر روش WBD یک بعدی بر روی تصاویر نمونه‌های A و B با معیار SNR..... با معیار WBD دو بعدی با سطوح مختلف در مقایسه با فیلتر ایده‌آل در حوزه FFT جدول ۴-۵- بررسی کارایی
۸۹	روش SNR.....
۹۱	جدول ۵-۵- پارامتر SNR برای چند قطعه نمونه در فرکانس‌های مختلف.....
۹۶	جدول ۶-۵- چند معیار کمی برای تصاویر فیلتر شده امپدانس چند قطعه نمونه، قبل و بعد از اعمال تبدیل نمایی گوسی.....
۹۹	جدول ۷-۵- چند معیار کمی برای تصاویر فیلتر شده امپدانس چند قطعه نمونه، قبل و بعد از اعمال تبدیل نمایی لگاریتمی.....
۱۰۲	جدول ۸-۵- چند معیار کمی برای تصاویر فیلتر شده امپدانس چند قطعه نمونه، قبل و بعد از اعمال تبدیل نمایی گوسی-لگاریتمی.....
۱۰۲	جدول ۹-۵- پارامتر SNR برای چند قطعه نمونه در فرکانس‌های مختلف و با استفاده از چند روش پردازشی.....
۱۰۳	جدول ۱۰-۵- پارامتر SNR برای چند قطعه نمونه در فرکانس‌های مختلف قبل و بعد از استفاده از پردازش جامع تک تصویر.....
۱۰۹	جدول ۱۱-۵- پارامتر SNR، برحسب دی‌بی، برای چند تصویر و ترکیب‌های مختلف آنها با قانون ماکزیمم.....
۱۱۰	جدول ۱۲-۵- پارامتر SNR، برحسب دی‌بی، برای چند تصویر و ترکیب‌های مختلف آنها با قانون میانگین‌گیری
۱۱۲	جدول ۱۳-۵- پارامتر SNR، برحسب دی‌بی، برای چند تصویر و ترکیب‌های مختلف آنها با قانون مقدار مناسب
۱۱۴	جدول ۱۴-۵- پارامتر SNR، برحسب دی‌بی، برای چند تصویر و ترکیب‌های مختلف آنها با قانون سنجش مقدار تشابه.....
۱۲۱	جدول ۱۵-۵- مقدار SNR ترکیب‌های مختلف چند تصویر نمونه به روش تجزیه هرم لاپلاسی، برحسب دی‌بی جدول ۱۶-۵- SNR تصویر حاصل از ترکیب چند تصویر نمونه با روش‌های مختلف ترکیب در حوزه تبدیل
۱۲۴	ویولت.....
۱۲۴	جدول ۱۷-۵- SNR تصویر حاصل از ترکیب چند تصویر نمونه (پس از عبور از فیلتر ایده‌آل در حوزه FFT) با روش‌های مختلف ترکیب در حوزه تبدیل ویولت.....
۱۲۸	جدول ۱۸-۵- SNR و نسبت SP برای تصویر حاصل از ترکیب چند تصویر نمونه با استفاده از تبدیل PCA.....

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

قطعات ساخته شده در صنعت به دلایل مختلف از جمله خستگی، خوردگی و غیره، مقاومت خود را به تدریج از دست داده و نهایتاً سبب از بین رفتن سازه مربوطه می‌شوند. از سوی دیگر با ایجاد و توسعه خطوط تولید انبوه در بسیاری از رشته‌های صنعت، نیاز به کنترل کیفی و قابلیت اطمینان تولیدات صنعتی بیش از پیش احساس می‌شود. متأسفانه در اکثر موارد با چشم غیرمسلح نمی‌توان بسیاری از عیوب را، به علت ریز بودن و یا به جهت آنکه در داخل قطعه به وجود می‌آیند، کشف نمود. لذا به تکنیک‌هایی نیاز است تا بتوان اینگونه عیوب را آشکار کرد. بنابراین از روشهای سنجش و آزمون غیر مخرب برای بررسی کیفی تولیدات و همچنین به عنوان بخشی از برنامه‌های بازرسی در تعمیرات عادی قطعات در حین کار، به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. نحوه انجام این آزمون‌ها به گونه‌ای است که خللی در ساختار فیزیکی و شیمیایی قطعه تحت آزمایش به وجود نمی‌آید.

امروزه روش‌های گوناگون آزمون غیرمخرب از مرحله تشخیص عیب به ارزیابی سازه مورد نظر ارتقاء یافته‌اند. در حقیقت علاوه بر تشخیص عیب، اندازه‌گیری و اثر آن در شکست مکانیکی و در نتیجه قابل قبول بودن یا نبودن کیفیت قطعه مورد آزمایش به عنوان جواب نهایی آزمون‌های غیرمخرب مد نظر می‌باشد. چنین قابلیت‌هایی با بکارگیری کامپیوتر در توسعه مدل‌های ریاضی، تکنیک‌های مدرن پردازش سیگنال دریافتی و استخراج ارتباط آنها با اندازه و محل واقعی عیب در یک سازه امکان‌پذیر است. بنابراین امروزه در بسیاری از کاربردها، سیستم‌های جدید آزمون غیرمخرب به عنوان عامل تصمیم‌گیرنده، بی‌عیب بودن قطعه مورد آزمایش را به‌طور اتوماتیک ارزیابی می‌نمایند.

در این پایان‌نامه، ابتدا ناپیوستگی‌ها را معرفی کرده و منشأ پیدایش آنها را معرفی می‌کنیم. در فصل دوم، به معرفی روش‌های آزمون غیرمخرب می‌پردازیم و اصول هر یک را به طور خلاصه مرور می‌کنیم. در فصل سوم، به معرفی روش جریان گردابی در آزمون‌های غیرمخرب پرداخته و مفاهیم آن را بصورت کیفی بیان

می‌کنیم. در فصل چهارم، به معرفی مراحل طراحی و ساخت دستگاه اسکنر چند فرکانسی به روش جریان گردابی، که نقش مهمی جهت اسکن قطعات مختلف دارد، می‌پردازیم. در ادامه این فصل نرم‌افزار تهیه شده برای اسکن چند فرکانسی جریان گردابی را شرح خواهیم داد. در نهایت، ضمن بیان روش ساخت تصویر امپدانس از روی مقادیر امپدانس قرائت شده، نتیجه اسکن چند قطعه عملی را بررسی می‌کنیم. در فصل پنجم، به دنبال افزایش کیفیت و وضوح تصویر امپدانس و ترکیب نتایج به دست آمده از چند اسکن مختلف هستیم. از این رو، برخی از روش‌های پردازش تصویر را معرفی کرده و تأثیر اعمال آنها را بر روی تصاویر عملی به دست آمده توسط دستگاه اسکنر جریان گردابی بررسی می‌کنیم. در فصل ششم، به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهای برای ادامه کار خواهیم پرداخت.

۲-۱- ناپیوستگی‌ها و منشأ آنها

ساختار مواد از اتم‌ها و مولکول‌هایی تشکیل شده است که در حالت ایده‌آل به گونه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که پیوستگی ساختار ماده را حفظ کنند. اما این، یک فرض ایده‌آل بوده و پیوستگی مطلق در هیچ ماده‌ای وجود ندارد. تغییرات مکانی سریع در پیوستگی درون یا سطح یک ماده، ناپیوستگی نامیده می‌شود. این ناپیوستگی در اکثر مواد وجود دارد و بنا بر اندازه آن، ممکن است مواد قابل استفاده یا غیر قابل استفاده باشند. بخشی از این ناپیوستگی‌ها در درون ماده عبارت از حفره‌ها، ترک‌ها، ناخالصی‌ها و تغییرات موضعی در ریزساختارهای ماده هستند. این ناپیوستگی‌ها تا زمانی که بر عملکرد قطعه ساخته شده و ضریب اطمینان و عمر مفید آن تأثیر نگذارند، در سیستم‌های مهندسی قابل قبولند. بنابراین آزمون غیرمخرب با هدف اولیه تعیین میزان ناپیوستگی ماده برای کاربرد موردنظر در مهندسی مواد بکار گرفته می‌شود.

ارزیابی یک ناپیوستگی در یک قطعه ساخته شده با توجه به طراحی آن و با یک مجموعه قواعد مشخص صورت می‌گیرد و در نهایت محل خرابی، تعداد، شکل، اندازه و منشأ آن را مشخص می‌کند. منشأ و نوع ناپیوستگی در درجه اول به فرایند ساخت آن قطعه بستگی دارد و پس از آن محیط عملکرد قطعه از دیگر عوامل مؤثر بر ایجاد و رشد یک ناپیوستگی می‌باشد.

آگاهی از منشأ ناپیوستگی‌ها در تعیین نوع و ویژگی‌های آنها مؤثر می‌باشد و دانستن ویژگی‌های یک ناپیوستگی در کشف و ارزیابی آن امری مفید و بعضاً ضروری است. در همین راستا و در ادامه این فصل به شناخت اجمالی ناپیوستگی‌ها و عوامل ایجاد آنها می‌پردازیم.

ناپیوستگی‌ها ممکن است در طول ساخت یک قطعه ایجاد شده و در طول عملکرد آن در قطعه پیشروی کنند، یا در حین عملکرد و یا در مراحل تعمیر، در اثر بارگذاری‌های مکرر، واکنش در محیط‌های شیمیایی و الکترومغناطیسی و یا دیگر شرایط محیطی به وجود بیایند.

ناپیوستگی‌ها را می‌توان بر اساس مرحله‌ای از ساخت که در آن ناپیوستگی ایجاد می‌شود دسته‌بندی کرد. شکل (۱-۱) دسته‌بندی ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهد [۱].

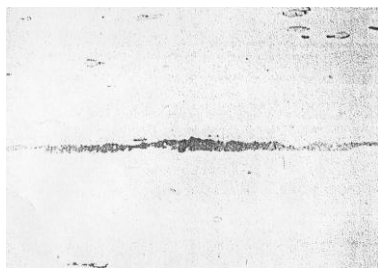


شکل ۱-۱- منشأ پاره ای از نقصها که در مواد و قطعات یافت می شوند.

در ادامه، برخی از این فرایندها و ناپیوستگی‌های مربوط به آنها را به‌طور مختصر معرفی می‌کنیم.

۱-۲-۱- تولید اولیه فلزات

استخراج فلزات از سنگ معدن آنها با انتقال ناخالصی‌های معدنی صورت می‌گیرد. برخی از این ناخالصی‌ها در مرحله تولید فلز جدا نشده و در ساختار آلیاژ شرکت می‌کنند و منشأ ناپیوستگی‌هایی به صورت رشته-ها و یا لایه‌های ناخالصی می‌شوند (شکل (۱-۲)) [۲]. این ناخالصی‌ها در شرایط محیطی شکننده بوده و در دمای بالا نیز ممکن است نرمتر و ضعیف‌تر از آلیاژها عمل کنند.



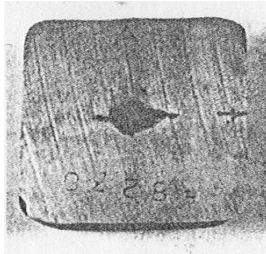
شکل ۱-۲- رشته سیلیکات در یک میله فولادی

۱-۲-۲- ریخته‌گری^۱

فلزات و آلیاژها در طی فرایند ریخته‌گری، که در طی تولید اولیه فلزات صورت می‌گیرد، از حالت مایع به صورت جامدهای بلورین با قالب‌های مشخص درمی‌آیند. این فرایند، خود می‌تواند منشأ برخی از ناپیوستگی‌ها باشد. چگالی بلورهای تشکیل شده، از چگالی فلزات و آلیاژهای مایع اولیه بیشتر است. بنابراین طی فرایند ریخته‌گری با یک کاهش حجم مواجه هستیم که آن را انقباض انجماد^۲ می‌نامند. بنابراین اگر طی فرایند جامدسازی فلزات مایع، قسمتی از مایع در یک پوسته بلورین گیر کند پس از بلور شدن آن کاهش حجمی به وجود می‌آید که جبران‌پذیر نیست و حفره‌هایی در بلور ایجاد می‌شود که حفره‌ها یا تخلخل‌های ناشی از انقباض نامیده می‌شوند. شکل (۱-۳) انقباض ناشی از انجماد را در یک قطعه نشان می‌دهد [۲].

¹ Casting

² solidification shrinkage

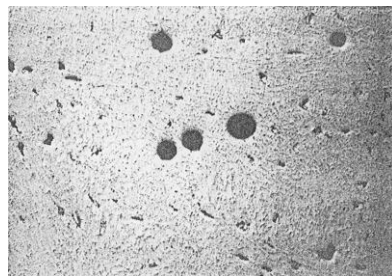


شکل ۱-۳- سطح مقطع یک شمش که ناپیوستگی در اثر انقباض ناشی از انجماد را نشان می‌دهد.

تخلخل‌های ناشی از انقباض اگر از حدی بیشتر باشند خواص مکانیکی قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و تخلخل‌های سطحی نیز قابلیت کاهش مقاومت خستگی^۱ قطعه را دارا می‌باشند. انقباض ناشی از انجماد ممکن است موجب ایجاد ترک خوردگی^۲ در قطعه شود. این ترک خوردگی ممکن است در دمای بالا و یا در قسمتهایی از قطعه که ریزساختارهای ضعیف‌تری دارند (مانند مرزهای دانه‌ها) ایجاد شود.

ناپیوستگی‌های دیگری که در طی عملیات ریخته‌گری محتمل است، وجود حفره‌هایی در کریستال‌های تشکیل شده به دلیل وجود گاز در فلز مایع و گیر افتادن آن در پوسته جامد در فرایند بلورسازی می‌باشد. از آنجایی که گاز در درون فلز مایع با فشار حرکت می‌کند و از طرفی مایع در حال جامد شدن می‌باشد، حفره‌هایی مارپیچی تشکیل می‌شود که مانند حفره‌های ناشی از انقباض، خواص مکانیکی قطعه را کاهش می‌دهند. این حفره‌ها در نزدیکی سطح منجر به شکاف‌هایی می‌شوند که اصطلاحاً به آنها تاول^۳ می‌گویند. شکل (۱-۴) نمونه‌ای از این ناپیوستگی را نشان می‌دهد [۲].

گاهی اوقات ممکن است قالب ریخته‌گری به دلیل فرایند انجماد سریع به صورت کامل توسط فلز مایع پر نشود. در این صورت بلور حاصل دارای ناپیوستگی‌هایی در ساختار خود به نام فرورفتگی ریخته‌گری^۴ خواهد بود. خراش^۵ نوعی ناپیوستگی سطحی است که بافتی زبر و متخلخل دارد و معمولاً در قطعات ریخته‌گری شده نازک ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۴- تاول‌های ناشی از عبور گاز در آلیاژ آلومینیم

^۱ fatigue resistance

^۲ Crack

^۳ blister

^۴ casting cavities

^۵ scab

۱-۲-۳- فرایند جوش

فرایندهای متعددی برای جوشکاری وجود دارد که هر یک از آنها منجر به ایجاد ناپیوستگی‌هایی می‌شوند. در بسیاری موارد این ناپیوستگی‌ها مانند ناپیوستگی‌های ریخته‌گری می‌باشند. یکی از ناپیوستگی‌های مربوط به جوشکاری، ترک‌های ناشی از فرایند انجماد است. در فرایند جوشکاری شرایطی وجود دارد که در آن، قطعه به دلیل انبساط و انقباض متفاوت ماده پایه^۱ تحت فشار قرار می‌گیرد. این تفاوت در میزان انبساط و انقباض به این دلیل است که در فرایند جوش، ماده پایه منبسط شده و در درون مایع مذاب نفوذ می‌کند و در طی مرحله انجماد از انقباض مجدد آن جلوگیری می‌شود و در نتیجه فشاری بر قطعه وارد می‌شود که ممکن است از حد تحمل ماده پایه، جوش و یا منطقه حرارت دیده بیشتر باشد. در این- صورت ممکن است منجر به تغییر شکل، ترک خوردگی، شکست^۲ و یا دست کم تنش‌های پسماند در قطعه شود.

ناپیوستگی‌های دیگری شبیه به ترک‌ها وجود دارند که عامل ایجاد آنها اعمال نیرو به قطعه نیست. بلکه ناشی از قرار گرفتن دو سطح روی هم است که این دو سطح فقط در یک مرز به هم متصلند. نمونه‌ای از این ناپیوستگی‌ها عدم ذوب^۳ و عدم نفوذ^۴ در فرایند جوش می‌باشد.

عدم ذوب، که در اثر ذوب ناقص ماده پایه بوجود می‌آید، بین جوش و ماده پایه تشکیل می‌شود. این ناپیوستگی‌ها می‌توانند منشأ ترک خوردگی ناشی از خستگی باشند. عدم نفوذ نیز نوعی ناپیوستگی هندسی است که به دلیل عدم پر شدن محل اتصال توسط ماده جوش دهنده ایجاد می‌شود و موجب کاهش تحمل بار قطعه در محل جوش می‌گردد.

در فرایند جوش نیز مانند ریخته‌گری ممکن است وجود گاز در ماده ذوب شده منجر به ایجاد حفره‌های مارپیچ و تخلخل شود.

در فرایند جوش، ناپیوستگی‌هایی از نوع هندسی^۵ وجود دارند که یکی از آنها تشکیل حفره^۶ در دیواره جوش^۷ می‌باشد. این ناپیوستگی برش از زیر^۸ نامیده می‌شود و تأثیر آن ایجاد شکاف در سطح است.

^۱ base material

^۲ fracture

^۳ lack of fusion

^۴ lack of penetration

^۵ geometric

^۶ ditching

^۷ weld toe

^۸ undercut

۱-۲-۴- ناپیوستگی‌های ناشی از خوردگی

در بسیاری از محیط‌های عملکرد قطعات شرايطی فراهم می‌شود که آلیاژ تشکیل‌دهنده قطعه دچار خوردگی الکتروشیمیایی شده و ناپیوستگی‌هایی را در قطعه به وجود می‌آورد. یک ناپیوستگی سطحی معمول که طی فرایند خوردگی الکتروشیمیایی به وجود می‌آید، حفره‌دار شدن^۱ است. این حفره‌ها علاوه بر نفوذ در ماده، سطح زبری ایجاد می‌کنند که نقطه آغازی برای ترک خوردگی خستگی در قطعات تحت کشش می‌باشد.

علاوه بر این نوع ناپیوستگی، ناپیوستگی‌هایی از نوع ترک نیز در اثر خوردگی ایجاد می‌شود. نوع خاصی از ترک خوردگی به نام ترک خوردگی خوردگی تنش (SCC)^۲ در اثر اعمال تنش کششی بر آلیاژ در درون الکترولیت به وجود می‌آید. شکل (۱-۵) نمونه‌ای از این ترک خوردگی را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۱-۵- ترک خوردگی خوردگی تنش

نوع دیگری از ترک خوردگی در قسمت کاتد اتفاق می‌افتد، که ناشی از فشار مولکول‌های هیدروژن ایجاد شده در اثر واکنش الکتروشیمیایی در کاتد، بر روی مرزهای دانه‌ها در ماده می‌باشد [۲]. این ترک خوردگی داخلی منجر به تضعیف خواص مکانیکی قطعه شده و سرچشمه ایجاد ترک‌های خستگی می‌باشد. این ترک خوردگی‌های کوچک ناشی از حباب‌های هیدروژن را پولک^۳ می‌نامند. گاهی اوقات حمله‌های خورنده منجر به جدا شدن نوارهایی باریک از سطح قطعه می‌شوند که این اثر را لایه‌لایه شدن^۴ می‌نامند.

۱-۲-۵- ناپیوستگی‌های ناشی از کاربرد- ترک خوردگی خستگی

آلیاژهایی که به طور مداوم تحت بار کششی قرار می‌گیرند، بعد از مدتی دچار ترک‌های سطحی می‌شوند. ترک خوردگی معمولاً با یک ناپیوستگی به صورت تغییر هندسی یا ناهمسانی در ساختار آلیاژ آغاز می‌شود و در نهایت ترک خوردگی خستگی در قطعه پیشروی کرده تا اینکه منجر به خرابی اساسی در قطعه می‌گردد. از آنجایی که ترک‌های خستگی شکل قطعه را تغییر نمی‌دهند و به سختی دیده می‌شوند، بنابراین برای تشخیص آنها به تکنیک‌های بازرسی نیاز داریم.

^۱ pitting

^۲ stress corrosion cracking

^۳ flake

^۴ delamination