



۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

محاسبه تجربی عمر خستگی پیچ‌های دارای پیش‌بار

استاد راهنما:

پروفسور امیررضا شاهانی

نگارش:

ایمان شاکری ۹۰۲۳۰۹۴

شهریور ماه ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

اتصالات پیچی نقش مهمی در صنعت ایفا می‌کنند و نگرانی عمده‌ی مهندسان تخمین عمر اینگونه اتصالات است. در حقیقت، فلسفه‌ی طراحی در دهه‌ی اخیر تغییر کرده و تمرکز تحقیقات به جای تحلیل مقاومت استاتیکی روی عمر خستگی قرار گرفته است. عمر خستگی اتصالات پیچی به عوامل زیادی همچون قطر پیچ، گام دندانه پیچ، گشتاور بستن و ... بستگی دارد. با این وجود، اطلاعات کم آزمایشگاهی موجود است که در آن رفتار پیچ را به‌تنهایی بررسی کند. بررسی رفتار خستگی پیچ و مهره به خاطر پیچیدگی در توزیع تنش مشکل است. تحقیقات متعددی در مورد اثر جنبه‌های مختلف پیچ بر عمر خستگی آن انجام شده است، ولی با بررسی آن‌ها مشاهده می‌شود که بیشتر نتایج مطالعات مختلف با هم تفاوت دارند. برخی از این ناسازگاری‌ها ممکن است بخاطر روش‌های تولید باشد که تأثیر زیادی روی عمر پیچ می‌گذارند.

هدف از انجام این پروژه، محاسبه‌ی عمر پیچ M12 کلاس ۸/۸ از دیدگاه کلاسیک با انجام آزمایش خستگی می‌باشد. همچنین در این آزمایش اثر پیش‌باری که به خاطر سفت کردن مهره در پیچ به وجود می‌آید، روی عمر پیچ بررسی می‌شود. لذا این آزمایش‌ها در پنج سطح پیش‌بار مختلف انجام و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است تا به تأثیر پیش‌بار بر عمر خستگی پی برده شود. سپس مدل‌سازی آزمایش به کمک نرم افزار آباکوس انجام می‌شود و به کمک ثوابت تجربی که از آزمایش خستگی پیچ بدست آمده است، عمر پیچ در یک مسئله‌ی کاربردی تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عمر خستگی، حد دوام، پیچ، پیش‌بار، استاندارد ایزو ۳۸۰۰، مدل‌سازی

پیچ

فهرست مطالب

فصل ۱: خستگی و دیدگاه های موجود

۱. ۱. مقدمه ۱
۲. ۱. دیدگاه تنش پایه ۴
۲. ۱. نمودار S-N ۵
۲. ۲. ۱. اثر تنش میانگین ۷
۲. ۲. ۱. اثر ناچ ۸
۲. ۲. ۱. ضرایب اصلاح ۹
۲. ۲. ۱. جمع بندی ۹
۳. ۱. دیدگاه کرنش پایه ۹
۳. ۱. نمودار $\epsilon - N$ ۱۰
۳. ۲. ۱. اثر تنش میانگین ۱۱
۳. ۳. ۱. اثر ناچ ۱۱
۳. ۴. ۱. جمع بندی ۱۲
۴. ۱. دیدگاه انرژی ۱۳
۵. ۱. خستگی از دیدگاه مکانیک شکست ۱۴
۶. ۱. آشنایی با نرم افزارهای تحلیل خستگی از دیدگاه سنتی و مکانیک شکست ۱۸

فصل ۲: اتصالات پیچ و مهره

۲. ۱. مقدمه ۲۰
۲. ۲. پیش بار پیچ ۲۰
۳. ۲. بارگذاری خستگی اتصالات پیچی ۲۲

فصل ۳: مروری بر پژوهش های پیشین

۳. ۱. مقدمه ۲۴

- ۲۵..... ۳.۲. عمر خستگی پیچ از دیدگاه کلاسیک
- ۲۶..... ۳.۲.۱. تأثیر نوع دندانه بر عمر خستگی پیچ
- ۲۸..... ۳.۲.۲. اثر پیش بار بر عمر خستگی پیچ
- ۳۰..... ۳.۲.۳. اثر کنش اجباری بر رفتار خستگی پیچ
- ۳۱..... ۳.۲.۴. اثر بار خارج از مرکز بر عمر خستگی پیچ
- ۳۱..... ۳.۲.۵. اتصالات کامپوزیتی پیچی
- ۳۴..... ۳.۳. عمر خستگی پیچ از دیدگاه رشد ترک خستگی

فصل ۴: روند انجام آزمایش خستگی پیچ مطابق استاندارد ایزو ۳۸۰۰

- ۳۵..... ۴.۱. مقدمه
- ۳۵..... ۴.۲. روند کلی انجام آزمایش خستگی پیچ
- ۳۸..... ۴.۳. آزمایش در قسمت عمر محدود
- ۳۸..... ۴.۴. آزمایش در قسمت عمر نامحدود
- ۴۰..... ۴.۵. روش ترکیبی

فصل ۵: آزمایش خستگی پیچ

- ۴۲..... ۵.۱. مقدمه
- ۴۲..... ۵.۲. طراحی و ساخت فیکسچر
- ۴۵..... ۵.۳. روند انجام آزمایش خستگی
- ۴۸..... ۵.۳.۱. آزمایش خستگی نمونه‌ها با پیش‌بار $189/2$ MPa
- ۵۱..... ۵.۳.۱.۱. تعیین حد دوام خستگی
- ۵۲..... ۵.۳.۱.۲. نمودار S-N
- ۵۴..... ۵.۳.۲. آزمایش خستگی نمونه‌ها با پیش‌بار 450 MPa
- ۵۶..... ۵.۳.۲.۱. تعیین حد دوام خستگی
- ۵۷..... ۵.۳.۲.۲. نمودار S-N
- ۵۸..... ۵.۳.۳. آزمایش خستگی نمونه‌ها با پیش‌بار 60 MPa
- ۵۹..... ۵.۳.۴. آزمایش خستگی نمونه‌ها با پیش‌بار 320 MPa

۵.۳.۵. آزمایش خستگی نمونه‌ها با پیش‌بار ۵۸۰ MPa	۶۰
۵.۴. بررسی اثر پیش‌بار بر حد دوام پیچ	۶۰
۵.۵. محاسبه‌ی حد دوام پیچ از روش تئوری	۶۳

فصل ۶: مدلسازی دو بعدی آزمایش

۶.۱. مقدمه	۶۶
۶.۲. نحوه‌ی انجام مدلسازی	۶۶
۶.۳. مقایسه مش‌بندی برای حالت گره‌های مشترک و غیرمشترک در مرز مشترک قطعات	۷۱
۶.۴. محاسبه‌ی عمر روی مسیر مشخص	۷۳
۶.۵. محاسبه‌ی ضریب تمرکز تنش (SCF)	۷۹

فصل ۷: پیش‌بینی عمر خستگی پیچ در یک مسئله کاربردی

۷.۱. مقدمه	۸۱
۷.۲. معرفی مسئله پوسته استوانه‌ای تقویت شده	۸۲
۷.۳. تحلیل اجزاء محدود زیرمدل جامد ناحیه شامل پیچ M12 (Sub-Model)	۸۷
۷.۴. نتایج تحلیل تنش پیچ	۸۹

فصل ۸: ارزیابی نتایج و پیشنهادات

۸.۱. ارزیابی نتایج آزمایش خستگی پیچ M12	۹۲
۸.۲. ارزیابی نتایج مدلسازی دو بعدی	۹۳
۸.۳. پیشنهادات	۹۳
لیست مقالات ارائه شده	۹۵
فهرست مراجع	۹۶

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تعداد سیکل	N
تعداد سیکل تا شکست	N_f
تنش تسلیم	S_y
تنش حد نهایی	S_{ut}
تنش دامنه	S_a
تنش میانگین	S_m
دامنه تنش معادل	S_{qa}
تنش میانگین معادل	S_{qm}
حد دوام	S_e
نیروی پیش‌بار	F_i
بار گواه	F_p
مقاومت گواه	S_p
تنش ناشی از پیش‌بار	σ_i
نسبت تنش	R
مقاومت شکست واقعی ماده	σ_f
ضریب مقاومت خستگی	σ'_f
توان مقاومت خستگی	b
مدول الاستیسیته	E
حد دوام نمونه میله‌ی صاف دوار	S'_e
ضریب تصحیح پرداخت سطح	k_a
ضریب تصحیح اندازه	k_b
ضریب تصحیح بار	k_c

k_d	ضریب تصحیح دما
k_e	ضریب اعتماد پذیری
K_f	ضریب تمرکز تنش خستگی
K_t	ضریب تمرکز تنش
q	حساسیت چاک
r	شعاع چاک
p	گام پیچ
σ_c	ماکزیمم تنش فون مایسز
S_n	تنش اسمی
ϵ'_f	ضریب نرمی خستگی
c	توان نرمی خستگی
k'	ضریب کرنش سختی سیکلی
n'	توان کرنش سختی سیکلی
ΔW	انرژی هیستریزیس
K_{IC}	چقرمگی شکست ترد
J_{IC}	چقرمگی شکست نرم

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۵: مشخصات و خواص پیچ آزمایش	۴۶
جدول ۲-۵: پیش‌بار برای آزمایش‌های مختلف	۴۷
جدول ۳-۵: تنش دامنه برای آزمایش‌های محدوده‌ی عمر محدود	۴۸
جدول ۴-۵: نتایج آزمایش‌های خستگی در پیش‌بار $189/2$ MPa	۴۹
جدول ۵-۵: محاسبه‌ی حد دوام خستگی از روش پلکانی برای پیش‌بار $189/2$ MPa	۵۲
جدول ۶-۵: تنش دامنه برای آزمایش‌های محدوده‌ی عمر محدود	۵۵
جدول ۷-۵: نتایج آزمایش‌های خستگی در پیش‌بار 450 MPa	۵۶
جدول ۸-۵: محاسبه‌ی حد دوام خستگی از روش پلکانی برای پیش‌بار 450 MPa	۵۷
جدول ۹-۵: محاسبه‌ی حد دوام خستگی از روش پلکانی برای پیش‌بار 60 MPa	۵۸
جدول ۱۰-۵: محاسبه‌ی حد دوام خستگی از روش پلکانی برای پیش‌بار 320 MPa	۵۹
جدول ۱۱-۵: محاسبه‌ی حد دوام خستگی از روش پلکانی برای پیش‌بار 580 MPa	۶۰
جدول ۱۲-۵: حد دوام پیچ در پیش‌بارهای مختلف	۶۰
جدول ۱۳-۵: مقادیر ضرایب تصحیح و حد دوام پیچ اصلاح شده برای پیچ M12	۶۴
جدول ۱۴-۵: مقایسه حد دوام پیچ M12 از روش تئوری و مقدار تجربی	۶۵
جدول ۱-۶: مقایسه میانگین عمر گره‌ها در معیارهای مختلف و عمر تجربی	۷۷
جدول ۱-۷: خواص مکانیکی قطعات بکار رفته در مدل	۸۳
جدول ۲-۷: مقادیر بارها وارده به پوسته استوانه‌ای تقویت شده	۸۴
جدول ۳-۷: مقادیر نیروهای پیش‌بار ناشی از بستن پیچ‌ها	۸۵
جدول ۴-۷: محدودیت‌های شکلی المان‌های مربعی مدل	۸۷

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: شکست خستگی یک پیچ ناشی از بار نوسانی یک‌سویه [۴] ۲
- شکل ۱-۲: رهیافت‌های موجود در تخمین عمر خستگی [۱] ۴
- شکل ۱-۳: نمودار تنش-عمر برای فولاد A517 [۱] ۵
- شکل ۱-۴: نمودار تنش-عمر برای (a) مواد با حد دوام خستگی مشخص (b) مواد با حد خستگی نامشخص [۱] ۵
- شکل ۱-۵: پراکندگی داده‌ها در نمودار تنش-عمر برای نمونه بدون ناچ آلومینیومی [۱] ۶
- شکل ۱-۶: مقایسه میان منحنی‌های عمر ثابت [۴] ۷
- شکل ۱-۷: نمودار کرنش-عمر [۱] ۱۰
- شکل ۱-۸: پلاستیسیته کامل در برابر پلاستیسیته محلی [۱] ۱۲
- شکل ۱-۹: حلقه‌های هیستریزیس پایدار شده برای یک فولاد [۷] ۱۳
- شکل ۱-۱۰: آنالوژی میان دیدگاه مکانیک شکست و دیدگاه‌های قبلی [۱۱] ۱۵
- شکل ۱-۱۱: نمودار نرخ رشد ترک خستگی بر حسب ضریب شدت تنش سیکلی [۱۱] ۱۶
- شکل ۱-۱۲: روند تحلیل در نرم افزارهای خستگی [۱۱] ۱۸
- شکل ۱-۱۳: الگوریتم تحلیل در نرم افزارهای خستگی [۱۱] ۱۹
- شکل ۲-۱: نمایش شماتیک عمل و عکس‌العمل نیروی پیش‌بار در پیچ و قطعه [۴] ۲۰
- شکل ۴-۱: نقشه فیکسچر بدون اینسرت [۲۱] ۳۵
- شکل ۴-۲: نقشه فیکسچر با اینسرت [۲۱] ۳۶
- شکل ۴-۳: موقعیت بستن مهره [۲۱] ۳۶
- شکل ۴-۴: نقشه‌ی میله تراز کننده فیکسچر دستگاه [۲۱] ۳۷
- شکل ۴-۵: توزیع تنش در میله‌ی تراز کننده‌ی فیکسچر دستگاه [۲۱] ۳۸
- شکل ۴-۶: مثالی برای روش پلکانی [۲۱] ۳۹
- شکل ۴-۷: مثالی برای روش مرزی [۲۱] ۳۹
- شکل ۴-۸: مثالی از روش ترکیبی [۲۱] ۴۰

- شکل ۱-۵: طرح اولیه فیکسچر ۴۳
- شکل ۲-۵: طرح ثانویه فیکسچر ۴۳
- شکل ۳-۵: نقشه فیکسچر ۴۴
- شکل ۴-۵: نقشه اینسرت ۴۴
- شکل ۵-۵: نمای نهایی فیکسچر و اینسرت ۴۵
- شکل ۶-۵: نمایی از دستگاه و فیکسچر آماده برای شروع آزمایش ۴۶
- شکل ۷-۵: نمونه‌های پیچ M12 پس از شکست ۵۰
- شکل ۸-۵: سطح مقطع اولین دندان درگیر پیچ پس از شکست ۵۱
- شکل ۹-۵: نمودار تنش-عمر پیچ M12 با پیش بار $189/2$ MPa ۵۳
- شکل ۱۰-۵: نمودار تنش-عمر پیچ M12 با پیش بار 450 MPa ۵۷
- شکل ۱۱-۵: نمودار "های" آزمایش‌های انجام شده ۶۱
- شکل ۱۲-۵: نمایش نواحی پلاستیک شده برای سه پیش‌بار مختلف ۶۲
- شکل ۱-۶: نمای کامل دو بعدی آزمایش ۶۶
- شکل ۲-۶: نمایی از هندسه مدل‌سازی با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری ۶۷
- شکل ۳-۶: توزیع تنش در اولین دندان‌های درگیر پیچ و مهره ۶۸
- شکل ۴-۶: نمایش گره‌های مسیری که از ریشه‌ی اولین رزوه درگیر پیچ و مهره شروع شده و به سمت محور پیچ حرکت می‌کند ۶۹
- شکل ۵-۶: بررسی همگرایی مؤلفه‌ی محوری تنش دامنه روی مسیری که از ریشه‌ی اولین رزوه درگیر پیچ و مهره شروع شده و به محور پیچ ختم می‌شود ۷۰
- شکل ۶-۶: نمایی از مش‌بندی دندان‌های پیچ و مهره برای دو حالت گره‌های مشترک و غیر مشترک در مرز قطعه ۷۱
- شکل ۷-۶: مقایسه ماکسیمم تنش برای دو بارگذاری مختلف در دو حالت مش‌بندی با گره‌های مشترک و غیر مشترک در مرز ۷۲
- شکل ۸-۶: توزیع مؤلفه‌ی محوری تنش دامنه ۷۳
- شکل ۹-۶: محاسبه عمر با استفاده از تئوری‌های تنش معادل، در گره‌های مختلف روی مسیری که از ریشه‌ی اولین دندان‌های درگیر پیچ و مهره شروع شده و به سمت محور پیچ حرکت می‌کند ۷۶

- شکل ۱۰-۶: مقایسه عمر گره‌ها از روش MNS با زمانی که فقط مؤلفه‌ی محوری تنش دامنه
 (S_{zz}) در نظر گرفته شده ۷۸
- شکل ۱۱-۶: مقدار SCF در دندان‌های درگیر پیچ برای بارگذاری‌های مختلف ۷۹
- شکل ۱۲-۶: تغییرات SCF در اولین دندان درگیر پیچ و مهره بر حسب تغییرات بارگذاری‌های
 مختلف برای حالت بدون پیش‌بار ۸۰
- شکل ۱-۷: هندسه پوسته استوانه‌ای تقویت شده مورد نظر ۸۲
- شکل ۲-۷: مودهای بارگذاری روی پوسته استوانه‌ای تقویت شده مورد نظر ۸۳
- شکل ۳-۷: (الف) نقطه مرجع اول (اعمال بارگذاری) و (ب) نقطه مرجع دوم (اعمال شرایط مرزی) ۸۵
- شکل ۴-۷: کانتور جابجایی در مدل پوسته‌ای ۸۶
- شکل ۵-۷: کانتور تنش فون مایز در مدل پوسته‌ای ۸۶
- شکل ۶-۷: ناحیه بحرانی مورد نظر برای تحلیل زیر مدل مسئله ۸۷
- شکل ۷-۷: مش بندی زیر مدل بحرانی انتخاب شده شامل پیچ M12 ۸۸
- شکل ۸-۷: اعمال شرط مرزی زیر مدل روی مرزهای زیر مدل ناحیه بحرانی ۸۹
- شکل ۹-۷: توزیع تنش در پیچ ۸۹
- شکل ۱۰-۷: توزیع تنش در مقطع میانی پیچ ۹۰
- شکل ۱۱-۷: توزیع تنش در مقطع میانی پیچ برای مسیر نشان داده شده در شکل ۱۰-۷ ۹۰
- شکل ۱۲-۷: توزیع تنش دامنه در مقطع میانی پیچ برای مسیر نشان داده شده در شکل ۱۰-۷ ۹۱

فصل ۱: خستگی و دیدگاه‌های موجود

۱.۱. مقدمه

در بیشتر آزمون‌های خواص مواد که به نمودار تنش-کرنش مربوط می‌گردد، بار به آرامی وارد می‌شود تا زمان برای گسترش کامل کرنش کافی باشد. همچنین نمونه تا شکست آزمایش می‌شود، لذا تنش‌ها فقط یک بار وارد می‌شوند. چنین آزمونی با شرط بار ایستا کاربرد دارد. این شرایط به تقریب با شرایطی که بسیاری از اعضای سازه‌ها و ماشین‌ها سر و کار دارند مقبول است.

بسیاری از اجزای ماشین‌ها، مکانیزم‌ها و سازه‌ها، معمولاً در معرض بارهای تکرار شونده^۱ می‌باشند. تنش‌های سیکلی ناشی از این بارها، می‌تواند منجر به آسیب فیزیکی میکروسکوپی^۲ در آن اجزا شود. در تنش‌های کمتر از مقاومت نهایی ماده^۳ و در بسیاری از موارد حتی کمتر از مقاومت تسلیم، تلفیق این آسیب‌های فیزیکی در اثر سیکل‌های پیوسته می‌تواند منجر به واماندگی^۴ اجزاء گردد. این فرآیند آسیب و واماندگی ناشی از بارهای تکراری، خستگی^۵ نامیده می‌شود [۱].

بیش از ۱۵۰ سال است که واماندگی‌های مکانیکی در اثر خستگی، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی دانشمندان می‌باشد. از اولین مطالعات در زمینه خستگی می‌توان به آزمایش‌های آلبرت^۶ در آلمان که در سال ۱۸۲۸ روی نوار نقاله‌های معدن صورت پذیرفت، اشاره کرد. واژه "خستگی" اولین بار در سال ۱۸۳۹ در یک کتاب در زمینه مکانیک توسط پونسلیت^۷ در فرانسه مورد استفاده قرار گرفت. اما پایه‌های طراحی از دیدگاه خستگی توسط وهلر^۸ در آلمان بنا نهاده شد [۲]. ایشان به منظور بررسی علت واماندگی محورهای راه آهن، آزمایش‌های بسیاری را انجام داد، که منجر به شکل‌گیری روش‌های اولیه طراحی به منظور جلوگیری از واماندگی ناشی از خستگی گردید. بعدها تحقیقات ایشان توسط دانشمندان بسیاری ادامه پیدا کرد تا به امروز که معیارهای بسیار متنوعی در زمینه پیش بینی عمر خستگی معرفی شده است [۳].

¹ Repeated Loads

² Microscopic physical damage

³ Ultimate strength

⁴ Failure

⁵ Fatigue

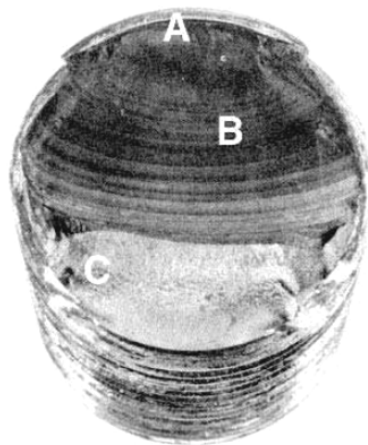
⁶ W.A.J. Albert

⁷ J.V. Poncelet

⁸ Wohler

یک شکست خستگی، ظاهری همچون شکست ترد دارد، به گونه‌ای که سطح شکست تخت و عمود بر محور تنش و بدون لاغر شدن است. شکست خستگی شامل سه مرحله می‌باشد.

مرحله‌ی نخست از یک یا چند ترک بسیار ریز آغاز می‌شود که ناشی از تغییر شکل مومسان نوسانی است. ترک‌های مرحله‌ی نخست به‌طور معمول با چشم غیر مسلح دیده نمی‌شوند. مرحله‌ی دوم از ترک‌های بسیار ریز به درشت پیش می‌رود و سطوح جلگه‌وار شکست موازی هم پدید می‌آید که با خطوط برجسته طولی از هم جدا شده‌اند. سطوح جلگه‌وار به‌طور معمول صاف و عمود بر راستای بیشترین تنش کششی است. همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌کنید، این سطوح گاه به شکل نوارهای سایه روشن موج و شبیه سواحل دریا یا پوسته صدف می‌باشند. ضمن بارگذاری نوسانی، این سطوح ترک باز و بسته می‌شوند و به هم می‌سایند و شکل اثر موج ساحلی به تغییرات میزان یا فراوانی بارگذاری و نیز طبیعت خوردگی محیط بستگی دارد. مرحله‌ی سوم در آخرین نوسان تنش که ماده باقیمانده قادر با تحمل بار نیست، رخ می‌دهد که با شکست سریع پایان می‌یابد. شکست مرحله‌ی سوم شاید ترد، شکل‌پذیر یا ترکیب هر دو باشد [۴].



شکل ۱-۱: شکست خستگی یک پیچ ناشی از بار نوسانی یک‌سویه [۴]

شکست خستگی ناشی از شکل‌گیری و انتشار ترک است. یک ترک خستگی معمولاً از یک ناپیوستگی در جایی از ماده که تنش نوسانی به بیشترین مقدار رسیده آغاز می‌شود. عواملی که باعث ناپیوستگی می‌شوند، چنین است:

- تغییر ناگهانی مقطع قطعه، جا خارها، سوراخ‌ها و دیگر عواملی که سبب تمرکز تنش می‌شوند.

- اجزایی که نسبت به هم می‌لغزند و یا می‌غلتند (یاتاقان‌ها، چرخنده‌ها، بادامک‌ها و ...) و با فشار تماسی زیاد ایجاد تنش‌های تماسی سطحی متمرکز می‌کنند که ممکن است سبب کندگی یا خرد شدن سطحی شود.
 - بی‌توجهی در مواضع تغییر شکل ضربه‌ای یا ردپای ابزار، خراش و پلیسه، طرح بد اتصال، بد سوار کردن و دیگر عیوب ساخت.
 - ترکیب خود ماده در جریان فرآیندهای نورد، آهن‌گری، ریخته‌گری، راندن فلز از درون قالب^۱، بیرون کشیدن فلز از درون قالب^۲ و گرمکاری سبب ناپیوستگی‌های سطحی و زیرسطحی ریز و بسیار ریز از حضور مواد خارجی یا گسستگی آلیاژی، حباب، ذرات سخت و ناپیوستگی‌های بلوری می‌شود.
- شرایط گوناگونی که بروز ترک را سرعت می‌بخشد، همچون تنش‌های کششی پسماند، افزایش دما، نوسان دما، محیط خورنده و نوسان بار با بسامد زیاد است.
- عمر بین ۱ تا 10^3 نوسان بار را در کلاس خستگی کم نوسان^۳ می‌گذارند و خستگی پرنوسان^۴ پرنوسان^۴ را برای تعداد نوسان بار بیشتر از 10^3 به کار می‌برند.
- شکل ۱-۲ رهیافت‌های موجود در تخمین عمر خستگی سازه‌ها را نشان می‌دهد. در این نمودار، روش‌های پیش‌بینی عمر خستگی به دو دسته کلی قطعی^۵ و احتمالاتی^۶ تقسیم بندی شده است که هر کدام از آن‌ها نیز به دو دسته دیدگاه‌های سنتی خستگی^۷ و دیدگاه رشد ترک خستگی^۸ تقسیم بندی می‌شود. در رهیافت قطعی پارامترهای طراحی سازه اعم از خصوصیات ماده، هندسه و بارگذاری به صورت ثابت و قطعی در نظر گرفته می‌شود در حالی که در روش احتمالاتی که در دهه‌های اخیر معرفی شده است پارامترهای طراحی مانند خواص ماده و بارگذاری بصورت غیر قطعی و به شکل توزیع احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود، سپس با استفاده از روش‌های احتمالاتی به پیش‌بینی عمر خستگی سازه پرداخته می‌شود. هر یک از روش‌های مذکور دارای معایب و مزایایی بوده که منجر به تعریف محدوده کارکرد آن‌ها می‌شود.

¹ Extrusion

² Drawing

³ Low cycle fatigue

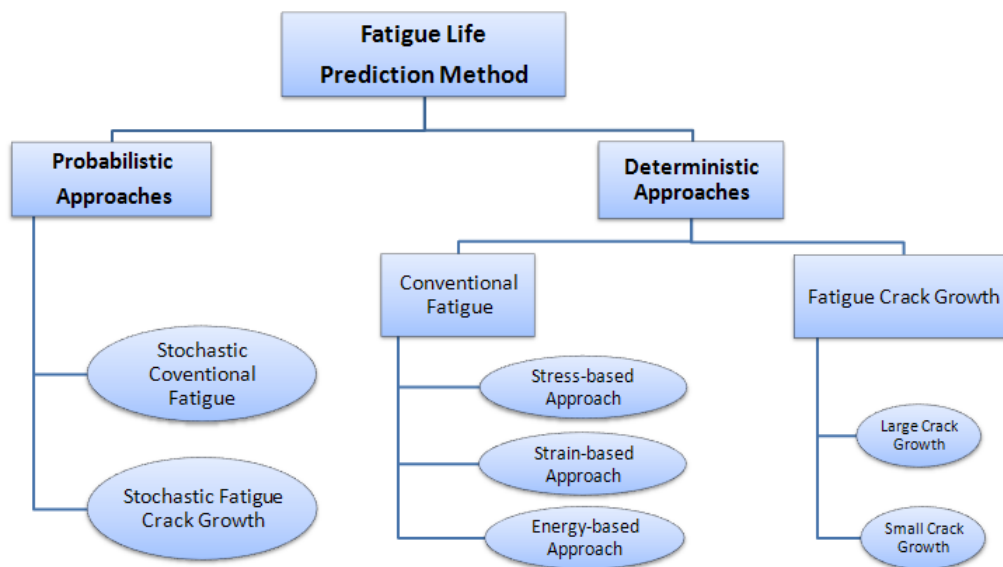
⁴ High cycle fatigue

⁵ Deterministic

⁶ Probabilistic

⁷ Conventional Fatigue Approaches

⁸ Fatigue Crack Growth



شکل ۱-۲: رهیافت‌های موجود در تخمین عمر خستگی [۱]

در این فصل، مروری اجمالی بر دیدگاه‌های موجود در زمینه پیش‌بینی عمر خستگی خواهیم داشت و با مفاهیم بنیادی دیدگاه‌های تنش-پایه، کرنش-پایه، دیدگاه انرژی-پایه و دیدگاه مکانیک شکست آشنا می‌شویم. سپس به معرفی برخی نرم افزارهای تحلیل خستگی خواهیم پرداخت. با اضافه شدن دیدگاه مکانیک شکست به دیدگاه‌های سنتی، به تنوع دیدگاه‌های موجود در زمینه پیش‌بینی عمر خستگی افزوده شده و همواره این سوال مطرح می‌شود که "در طراحی یک قطعه مهندسی تحت شرایط معین، استفاده از کدام دیدگاه و کدام روش مناسب‌تر خواهد بود؟". در انتها به این سؤال به نوعی پاسخ داده می‌شود.

۲.۱. دیدگاه تنش پایه^۱

این دیدگاه اولین بار توسط وُهلر و در سال ۱۸۶۰ معرفی شد. این روش تجربی در محدوده خستگی پر چرخه (HCF)^۲ کاربرد دارد. مفهوم حد دوام خستگی^۳ نیز بر پایه این دیدگاه شکل گرفت [۱].

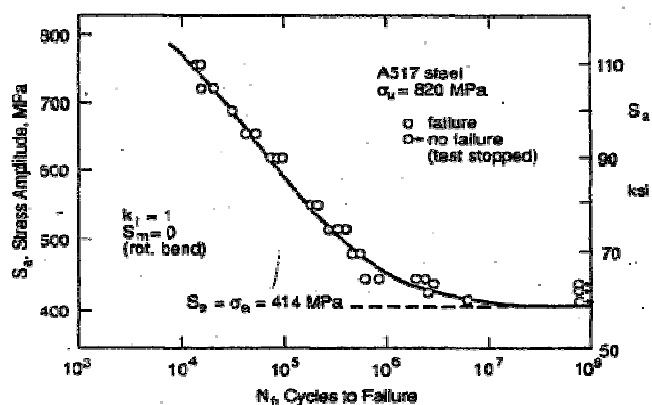
^۱ Stress-based approach

^۲ High Cycle Fatigue

^۳ Endurance limit

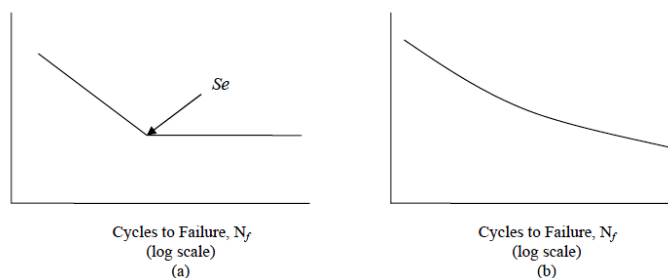
۱.۲.۱. نمودار S-N

اساس این دیدگاه بر مبنای نمودار تنش-عمر (S-N)، که در آزمایشگاه و مطابق استاندارد ASTM E466 [۵] حاصل می‌گردد، می‌باشد. شکل ۱-۳ نمودار تنش-عمر برای فولاد A517 را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: نمودار تنش-عمر برای فولاد A517 [۱]

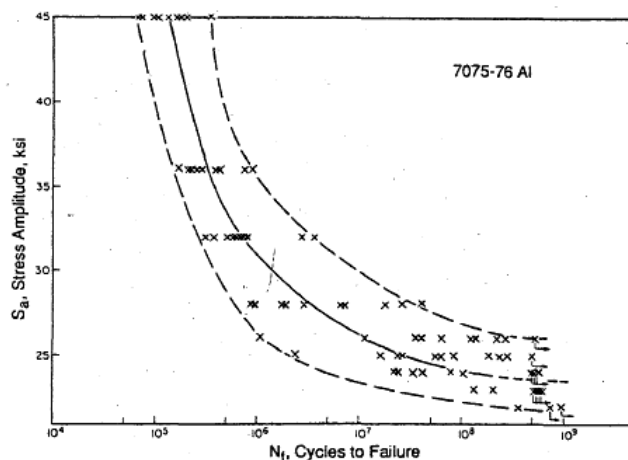
نمودار S-N را معمولاً در مقیاس لگاریتمی ترسیم می‌کنند. در این حالت یک رابطه خطی میان دامنه تنش (σ_a) و تعداد سیکل‌ها (N) وجود دارد. معمولاً دو نوع رفتار متفاوت در نمودار S-N به وجود می‌آید که به صورت شماتیک در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: نمودار تنش-عمر برای (a) مواد با حد دوام خستگی مشخص (b) مواد با حد خستگی نامشخص
برخی از فلزات آهنی از قبیل فولادهای کربنی، حد دوام S_e آشکار و مشخصی دارند. اما برخی فلزات دیگر مانند آلومینیوم اینگونه نیستند (شکل ۱-۳). در این حالت حد خستگی^۱ را معادل با تنشی می‌گیرند که به ازای آن، تعداد سیکل‌های مشخصی (بین ۱۰^۷ تا ۱۰^۸ سیکل) تا واماندگی نیاز است. برای بسیاری از فلزات، حد دوام خستگی با مقاومت نهایی آن فلز در ارتباط است. نمودار

^۱ Fatigue limit

S-N ماهیتاً رفتاری غیر قطعی^۱ دارد [۱]. بدین معنی که اگر چندین آزمایش خستگی بر روی یک نمونه مشابه و در یک دامنه تنش یکسان صورت پذیرد، معمولاً جواب‌ها دارای پراکندگی می‌باشند (شکل ۵-۱). در این حالت با استفاده از مدل‌های آماری^۲ مانند ویبال^۳ یک مقدار میانگین و یک مقدار انحراف معیار برای داده‌های آزمایشگاهی استخراج می‌گردد.



شکل ۵-۱: پراکندگی داده‌ها در نمودار تنش-عمر برای نمونه بدون ناچ آلومینیومی [۱]

در نمودار میانگین گرفته شده و در مقیاس لگاریتمی، رابطه‌ای خطی میان دامنه تنش و تعداد سیکل‌ها به فرم رابطه (۱-۱) وجود دارد.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1-1)$$

که در آن، σ'_f ضریب مقاومت خستگی^۴ بوده که مقدار آن تقریباً با مقدار مقاومت شکست واقعی ماده^۵ برابر است. b نیز توان مقاومت خستگی^۶ و یا توان باسکوئین^۷ نام دارد. پارامترهای σ'_f و b هر دو خاصیت ماده و N_f نیز تعداد سیکل‌ها می‌باشند. رابطه (۱-۱) به مدل باسکوئین معروف است.

لازم به ذکر است که نمودار S-N مذکور برای یک نمونه بدون ناچ، در بارگذاری با دامنه ثابت تک محوره با تنش میانگین صفر می‌باشد. لذا چهار نکته حائز اهمیت است:

¹ Non-determined
² Statistical models
³ Weibull
⁴ Fatigue strength coefficient
⁵ True fracture strength
⁶ Fatigue strength exponent
⁷ Basquin exponent

۱. بررسی اثر تنش میانگین غیر صفر^۱

۲. بررسی اثر ناچ^۲

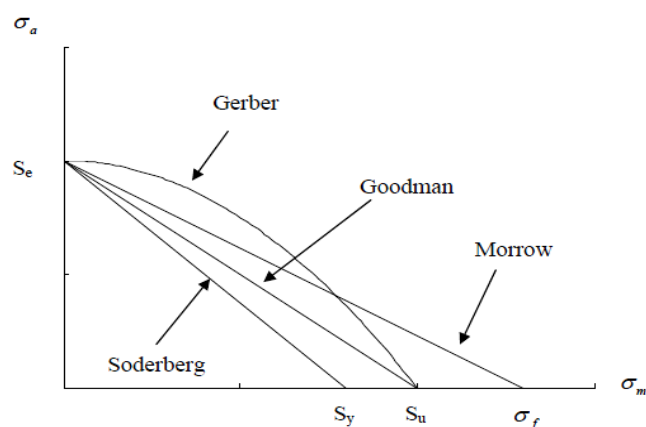
۳. بارگذاری چند محوره^۳

۴. بارگذاری با دامنه متغیر^۴

در ادامه هر یک از موارد فوق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱.۲.۲.۱. اثر تنش میانگین^۵

اثر تنش میانگین غیر صفر بر روی نمودار S-N توسط دانشمندان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. معروف‌ترین مدل‌های ارائه شده در شکل ۱-۶ خلاصه شده است.



شکل ۱-۶: مقایسه میان منحنی‌های عمر ثابت [۴]

روابط مربوط به هر یک از مدل‌های مذکور در رابطه‌های زیر ارائه شده‌اند:

$$\text{Gerber (1874): } \frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad (1-2)$$

$$\text{Goodman (1899): } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (1-3)$$

$$\text{Soderberg (1939): } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad (1-4)$$

$$\text{Morrow (1960): } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \quad (1-5)$$

¹ Non-zero mean stress

² Notch effect

³ Multi-axial fatigue

⁴ Variable amplitude loading

⁵ Mean stress effect

که در آن‌ها، S_y تنش تسلیم، S_u تنش حد نهایی، σ_f مقاومت شکست واقعی ماده می‌باشند. مدل گربر برای مواد نرم^۱ مناسب می‌باشد در صورتی که مدل گودمن اصلاح شده برای مواد ترد^۲ کارایی بهتری دارد. مدل سودربرگ به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا بسیار محتاطانه^۳ است [۱].

به‌طور کلی به منظور تخمین عمر در حالت تنش میانگین غیر صفر، همان مدل باسکوئین (رابطه (۱-۱)) مورد استفاده قرار می‌گیرد، با این تفاوت که به جای دامنه تنش از دامنه تنش کاملاً معکوس شونده معادل^۴ σ_{ar} استفاده می‌شود. از معروف‌ترین مدل‌ها برای σ_{ar} می‌توان به مدل مورو^۵ مطابق رابطه (۱-۶) و همچنین مدل SWT^۶ مطابق رابطه (۱-۷) اشاره کرد.

$$\text{Morrow: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f}} \xrightarrow{\text{Basquin Model}} \sigma_{ar} = (\sigma'_f - \sigma_m)(2N_f)^b \quad (1-6)$$

$$\text{SWT: } \sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} \xrightarrow{\text{Basquin Model}} \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} = \sigma'_f(2N_f)^b \quad (1-7)$$

جایگزینی σ_a با $\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f}}$ در مدل باسکوئین را اصلاح تنش میانگین مورو و جایگزینی

σ_a با $\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a}$ در آن مدل را اصلاح تنش میانگین SWT می‌نامند.

۱.۲.۳. اثر ناچ^۷

دیدگاه تنش پایه بر مبنای تنش‌های اسمی^۸ می‌باشد. درحالی‌که تنش‌های محلی^۹ در ناچ‌ها، در عمر خستگی بسیار مؤثرند [۱]. در بارگذاری خستگی، اثر ناچ توسط ضریب ناچ، k_f ، منظور می‌گردد که بر خلاف ضریب تمرکز تنش الاستیک k_t ، به نوع ماده وابسته است. رابطه میان k_f و k_t با ضریب حساسیت به شیار^{۱۰}، مطابق رابطه (۱-۸) بیان می‌شود. پارامتر q مقداری بین صفر

($k_f = 1$) تا یک ($k_f = k_t$) اختیار می‌کند.

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (1-8)$$

¹ Ductile

² Brittle

³ Conservative

⁴ Equivalent completely reversed stress amplitude

⁵ Morrow

⁶ Smith-Watson-Topper

⁷ Notch effects

⁸ Nominal stress

⁹ Local stress

¹⁰ Notch sensitivity factor