



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه جامدات

رفتار خستگی و رچتینگ نمونه‌ی پلیمری POM تحت بارگذاری متناوب تک محوره

حسین یاراحمدی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی
دکتر حمیدرضا ایپک‌چی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۸۹



دانشگاه علمی کاربردی


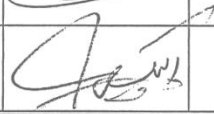
دانشکده: مکانیک

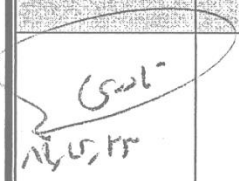
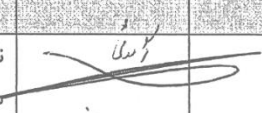

گروه: طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین یار احمدی

تحت عنوان: رفتار خستگی و رچتینگ نمونه های پلیمری تحت بارگذاری متناوب تک محوره

در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۱۰ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمود شریعتی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : حمیدرضا ایپک چی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
 ۱۳۸۹/۱۱/۱۰	نام و نام خانوادگی : سید هادی قادری		نام و نام خانوادگی : مهدي گردویی
	۱۳۸۹/۱۱/۱۰		نام و نام خانوادگی : محمد جعفری
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

همسر مهربانم

با تشکر از تمامی اساتید گرامی به ویژه جناب آقای دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا
ایبک‌چی به خاطر هدایت و راهنمایی پایان‌نامه

تعهد نامه

اینجناب حسین یار احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه رفتار خستگی و رچتینگ نمونه های پلیمری تحت بارگذاری متناوب تک محوره تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجناب انجام شده است و از صحت و اصلیت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله رعایت می گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :
امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و این مطلب باشد به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد .

- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه/رساله وجود داشته باشد .

چکیده

با توجه به اهمیت پدیده‌ی خستگی در طراحی‌های مهندسی و ناشناخته بودن خستگی کم تکرار و از طرفی کاربرد روزافزون مواد پلیمری و محدود بودن اطلاعات خستگی این نوع مواد، در این پایان‌نامه به بررسی تجربی رفتار خستگی و رچتینگ ماده پلیمری پلی استال (POM) پرداخته شده است.

در ابتدا به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی پلی استال آزمایش‌های کشش ساده و فشار انجام گرفت. سپس پلی استال تحت بارگذاری‌های متناوب تنش-کنترل تک محوره قرار داده شد. اطلاعات نیرو و جابجایی همه سیکل‌ها ثبت و با استفاده از آنها تنش‌ها و کرنش‌ها محاسبه شدند. مشخص شد که بزرگی کرنش رچتینگ و نرخ آن، به تنش میانگین و دامنه تنش اعمال شده حساس است. یعنی به طور کلی با کاهش دامنه تنش، نرخ کرنش رچتینگ کاهش و مقدار آن افزایش می‌یابد. در نهایت نیز ماده مذکور تحت بارگذاری‌های متناوب کرنش-کنترل تک محوره قرار گرفت. همچنین مشخص شد که پلی استال تحت بارگذاری متناوب رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهد.

با استفاده از نتایج آزمایش‌های تنش-کنترل و بهره‌گیری از سه دیدگاه خستگی تنش، کرنش و انرژی به تحلیل عمر خستگی این ماده پرداخته شد و مشخص شد که دیدگاه‌های تنش و انرژی توفیق بیشتری در پیش بینی عمر خستگی پلی استال دارند.

واژگان کلیدی: پلی استال، خستگی تک محوره، کرنش رچتینگ، آزمایش تنش-کنترل،

آزمایش کرنش-کنترل

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱/ محمود شریعتی، حسین حاتمی، حسین یاراحمدی. "تست های تجربی و تحلیل عددی تاثیر پارامترهای دامنه کرنش و کرنش متوسط روی عمر پلی استال" دهمین کنفرانس هوا فضای ایران، تهران دانشگاه تربیت مدرس

۲/ محمود شریعتی، حسین حاتمی، حسین یاراحمدی. "بررسی تجربی و عددی رفتار پلی استال تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری" دهمین کنفرانس هوا فضای ایران، تهران دانشگاه تربیت مدرس

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
فصل دوم: پلیمرها.....	۵
۱-۲- ساختار شیمیایی پلیمرها.....	۶
۲-۲- تاریخچه پلیمرها.....	۸
۳-۲- تقسیم بندی پلیمرها بر اساس بنیان اصلی.....	۹
۴-۲- خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی پلیمرها.....	۱۰
۵-۲- کاربردها و خواص پلیمرها.....	۱۱
۶-۲- پلی استال (POM).....	۱۵
۱-۶-۲- معرفی پلی استال.....	۱۵
۲-۶-۲- کاربردهای شیمیایی پلی استال.....	۱۶
۳-۶-۲- کاربردهای مکانیکی پلی استال.....	۱۷
۴-۶-۲- کاربردهای برقی پلی استال.....	۱۸
فصل سوم: مروری بر کارهای گذشته.....	۱۹
۱-۳- بارگذاری های سیکلی بر روی مواد فلزی.....	۲۰
۲-۳- بارگذاری های سیکلی بر روی مواد پلیمری.....	۲۶
فصل چهارم: آزمایش های تجربی.....	۳۸
۱-۴- آماده سازی نمونه های آزمایش.....	۳۹
۲-۴- دستگاه آزمایش.....	۴۱
۳-۴- تعیین خواص مکانیکی POM.....	۴۳
۱-۳-۴- محاسبه ی مدول یانگ و تنش تسلیم.....	۴۴
۴-۴- آزمایش فشار.....	۴۶
۵-۴- آزمایش های تنش-کنترل.....	۴۷
۱-۵-۴- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش.....	۵۰
۲-۵-۴- کرنش رجتینگ.....	۶۰
۳-۵-۴- حدود تغییرات کرنش.....	۶۸
۴-۵-۴- چگالی انرژی کرنشی.....	۷۰
۵-۵-۴- شیب حلقه های هیستریزیس.....	۷۵
۶-۴- آزمایش های کرنش-کنترل.....	۷۸
۱-۶-۴- حلقه های هیستریزیس.....	۸۰
۲-۶-۴- رهایش تنش میانگین.....	۸۳

۸۴	..... ۴-۶-۳- تغییرات حدود تنش
۸۵	..... ۴-۶-۴- چگالی انرژی کرنشی
۸۷	..... ۴-۶-۵- شیب حلقه‌های هیستریزیس
۸۹	..... فصل پنجم: خستگی
۹۱	..... ۵-۱- خستگی از دیدگاه تنش
۹۶	..... ۵-۲- خستگی از دیدگاه کرنش
۱۰۰	..... ۵-۳- خستگی از دیدگاه انرژی
۱۰۴	..... فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۵	..... ۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۰۷	..... ۷-۲- پیشنهادها
۱۰۸	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- مونومر اتیلن و تبدیل آن به پلی اتیلن ۶
- شکل ۲-۲- سه نوع پلیمر بر اساس شکل مولکول ۷
- شکل ۳-۲- برخی کاربردهای مکانیکی پلی استال ۱۷
- شکل ۱-۳- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آلیاژ مس برای $\sigma_m = 50MPa$, $\sigma_a = 440MPa$ [۶] .. ۲۱
- شکل ۲-۳- کرنش رچتینگ آلیاژ مس با تنش میانگین ثابت و دامنه تنش متغیر [۶] ۲۱
- شکل ۳-۳- پیش بینی عمر خستگی با استفاده از پارامتر SWT [۶] ۲۱
- شکل ۴-۳- کرنش رچتینگ فولاد کربنی CK45 تحت بارگذاری تنش-کنترل [۷] ۲۲
- شکل ۵-۳- تغییرات دامنه تنش فولاد کربنی CK45 تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۷] ۲۲
- شکل ۶-۳- تغییرات دامنه تنش فولاد کربنی نورد گرم شده تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۸] ۲۳
- شکل ۷-۳- تغییرات دامنه تنش فولاد ضد زنگی که به صورت سرد شکل داده شده است، تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۸] ۲۳
- شکل ۸-۳- رفتار رچتینگ محوری نوعی لحیم بدون سرب [۹] ۲۳
- شکل ۹-۳- نمودار کرنش رچتینگ فولاد نیتروژن‌دار [۱۰] ۲۴
- شکل ۱۰-۳- دامنه تنش در آزمایش‌های تنش-کنترل بر حسب عمر خستگی [۱۰] ۲۴
- شکل ۱۱-۳- تغییرات دامنه کرنش فولاد SS304 تحت بارگذاری تنش-کنترل [۱۲] ۲۵
- شکل ۱۲-۳- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش فولاد SS304 [۱۲] ۲۵
- شکل ۱۳-۳- کرنش رچتینگ فولاد SS304 با تنش میانگین $10MPa$ و دامنه تنش متغیر [۱۲] ۲۶
- شکل ۱۴-۳- تغییرات دامنه تنش فولاد SS304 تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۱۲] ۲۶
- شکل ۱۵-۳- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش نوعی اپوکسی تحت آزمایش کرنش-کنترل [۱۳] ۲۷
- شکل ۱۶-۳- تغییرات تنش میانگین نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمایش کرنش-کنترل [۱۳] ۲۷
- شکل ۱۷-۳- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک نوعی اپوکسی پلیمر [۱۳] ۲۷
- شکل ۱۸-۳- چگالی انرژی کرنشی کل بر حسب عمر خستگی [۱۳] ۲۷
- شکل ۱۹-۳- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمون تنش-کنترل [۱۴] ۲۸
- شکل ۲۰-۳- کرنش رچتینگ نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمون تنش-کنترل [۱۴] ۲۸
- شکل ۲۱-۳- کرنش رچتینگ PTFE تحت بارگذاری سیکلی فشاری با نرخ‌های مختلف بارگذاری [۱۵] ۲۹
- شکل ۲۲-۳- کرنش رچتینگ محوری PTFE تحت بارگذاری چند محوره [۱۶] ۳۰
- شکل ۲۳-۳- کرنش رچتینگ محوری PTFE همراه با تاریخچه بارگذاری [۱۶] ۳۰
- شکل ۲۴-۳- کرنش رچتینگ PMMA تحت بارگذاری تنش-کنترل تک محوره [۱۷] ۳۱

- شکل ۳-۲۵- پیش بینی کرنش رچتینگ پایدار با استفاده از تئوری فرآیند فعال شده حرارتی [۱۷] ۳۱
- شکل ۳-۲۶- حلقه هیستریزیس تنش- کرنش پلی آمید تحت بارگذاری کرنش برشی سیکلی [۱۸] ۳۳
- شکل ۳-۲۷- افزایش کرنش محوری پلی آمید در اثر بارگذاری کرنش برشی سیکلی [۱۸] ۳۳
- شکل ۳-۲۸- مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک نرم افزار ABAQUS [۱۹] ۳۴
- شکل ۳-۲۹- مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل اصلاح شده سخت شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک در نرم افزار ABAQUS [۱۹] ۳۴
- شکل ۳-۳۰- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش پلی آمید تقویت شده [۲۱] ۳۵
- شکل ۳-۳۱- کرنش رچتینگ پلی آمید تقویت شده [۲۱] ۳۵
- شکل ۳-۳۲- شماتیک سه نوع بارگذاری انجام شده در مرجع [۲۲] ۳۶
- شکل ۳-۳۳- تغییرات کمیت های مکانیکی آزمایش S3-2 در جهت محوری (a) دامنه تنش (b) تنش میانگین (c) چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده (d) دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک [۲۲] ۳۷
- شکل ۴-۱- شماتیک نمونه ۴۰
- شکل ۴-۲- شماتیک فیکسچرها ۴۰
- شکل ۴-۳- تصویر نمونه و فیکسچر ۴۱
- شکل ۴-۴- دستگاه سروویدرولیک INSTRON 8802 ۴۲
- شکل ۴-۵- تصویر اکستنسومتر ۴۲
- شکل ۴-۶- منحنی نیرو جابجایی نمونه ی پلی استال ۴۳
- شکل ۴-۷- منحنی تنش-کرنش اسمی پلی استال تحت کشش یکنواخت ۴۴
- شکل ۴-۸- منحنی تنش-کرنش حقیقی پلی استال تحت کشش یکنواخت ۴۴
- شکل ۴-۹- روش ترسیمی خط 0.2% برای محاسبه ی تنش تسلیم ۴۵
- شکل ۴-۱۰- منحنی تنش-کرنش حقیقی پلی استال در حالت فشاری ۴۶
- شکل ۴-۱۱- شماتیک حلقه ی هیستریزیس تنش-کرنش سیکلی بدست آمده در تست خستگی کم چرخه [۲۶] ۵۰
- شکل ۴-۱۲- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT1 ۵۲
- شکل ۴-۱۳- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT2 ۵۳
- شکل ۴-۱۴- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT3 ۵۴
- شکل ۴-۱۵- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT4 ۵۵
- شکل ۴-۱۶- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT5 ۵۶
- شکل ۴-۱۷- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT6 ۵۷
- شکل ۴-۱۸- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT7 ۵۸
- شکل ۴-۱۹- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT8 ۵۹
- شکل ۴-۲۰- حلقه های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT9 ۶۰

- شکل ۴-۲۱- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۲
- شکل ۴-۲۲- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۳
- شکل ۴-۲۳- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۳
- شکل ۴-۲۴- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۴
- شکل ۴-۲۵- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT5 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۴
- شکل ۴-۲۶- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT6 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۵
- شکل ۴-۲۷- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT7 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۵
- شکل ۴-۲۸- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT8 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۵
- شکل ۴-۲۹- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی ۶۶
- شکل ۴-۳۰- حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل با تنش میانگین ثابت و دامنه تنش متغیر ۶۹
- شکل ۴-۳۱- حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل با دامنه‌ی تنش ثابت و تنش میانگین متغیر ۷۰
- شکل ۴-۳۲- نمایش اجزای چگالی انرژی کرنش [۱۴] ۷۱
- شکل ۴-۳۳- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5 ۷۲
- شکل ۴-۳۴- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9 ۷۳
- شکل ۴-۳۵- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5 ۷۴
- شکل ۴-۳۶- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9 ۷۵
- شکل ۴-۳۷- شیب حلقه هیستریزیس [۱۷] ۷۶
- شکل ۴-۳۸- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5 ۷۷
- شکل ۴-۳۹- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9 ۷۸
- شکل ۴-۴۰- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS1 ۸۱
- شکل ۴-۴۱- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS2 ۸۱
- شکل ۴-۴۲- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS3 ۸۲

- شکل ۴-۴۳- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS4 ۸۳
- شکل ۴-۴۴- رهایش تنش میانگین گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ۸۴
- شکل ۴-۴۵- تغییرات حدود تنش گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ۸۵
- شکل ۴-۴۶- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ۸۶
- شکل ۴-۴۷- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ۸۷
- شکل ۴-۴۸- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ۸۸
- شکل ۵-۱- تابع تنش میانگین با مقادیر مختلف ثابت‌های ماده [۱۳] ۹۲
- شکل ۵-۲- برازش منحنی توانی از دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1 ۹۴
- شکل ۵-۳- تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش ۹۵
- شکل ۵-۴- دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی ۹۶
- شکل ۵-۵- برازش منحنی توانی از دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1 ۹۷
- شکل ۵-۶- تابع کرنش میانگین برای دیدگاه کرنش ۹۹
- شکل ۵-۷- دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی ۹۹
- شکل ۵-۸- برازش منحنی توانی از انرژی کرنشی معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1 ۱۰۱
- شکل ۵-۹- تابع تنش میانگین برای دیدگاه انرژی ۱۰۲
- شکل ۵-۱۰- چگالی انرژی کرنشی کل بر حسب عمر خستگی ۱۰۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- خواص مکانیکی و حرارتی برخی از پلیمرهای مهندسی ۱۱
- جدول ۲-۲- مقایسه خواص برخی از پلیمرهای مهندسی [۵] ۱۶
- جدول ۱-۳- مقادیر تنش میانگین و دامنه تنش در مرجع [۶] ۲۰
- جدول ۲-۳- بارگذاری‌های انجام شده در مرجع [۲۲] ۳۶
- جدول ۱-۴- خواص مکانیکی پلی استال در کشش و فشار ۴۶
- جدول ۲-۴- خلاصه آزمایش‌های تنش-کنترل ۴۷
- جدول ۳-۴- مقادیر میانگین برخی کمیت‌های مکانیکی آزمایش‌های تنش-کنترل ۴۹
- جدول ۴-۴- گروه بندی آزمایش‌های تنش-کنترل ۵۰
- جدول ۵-۴- مقادیر کرنش و نرخ کرنش رچتینگ در کسرهای خاصی از عمر خستگی ۶۷
- جدول ۶-۴- آزمایش‌های کرنش-کنترل ۷۹
- جدول ۷-۴- گروه بندی آزمایش‌های کرنش-کنترل ۸۰
- جدول ۱-۵- ضرایب روابط پیش بینی کننده عمر خستگی از دیدگاه‌های تنش، کرنش و انرژی ۱۰۳

فهرست نمادها

دمای انتقال شیشه	T_g	وزن مولکولی	MW
دمای ذوب	T_m	تنش تسلیم	σ_y
نیرو	F	ضریب اصطکاک	μ
سرعت بارگذاری	ν	جابجایی	ΔL
کرنش اسمی	e	تنش اسمی	S
کرنش حقیقی	ε	تنش حقیقی	σ
تنش میانگین	σ_m	کرنش تسلیم	ε_y
عمر خستگی	N_f	دامنه تنش	σ_a
متوسط دامنه کرنش	ε_a^{avg}	متوسط کرنش میانگین	ε_m^{avg}
دامنه چگالی انرژی کرنش الاستیک	ΔW^e	چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده	ΔW^d
متوسط دامنه چگالی انرژی کرنش الاستیک	ΔW^e	متوسط چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده	ΔW_{avg}^d
طول اولیه نمونه	L_0	سطح مقطع اولیه نمونه	A_0
کرنش رچتینگ	ε_r	شماره سیکل	N
نسبت کرنش	R	شیب حلقه هیستریزیس	E
حد خستگی	ψ_0	کمیت آسیب	ψ
تنش معادل	σ_{eq}	ثابت‌های ماده	κ, γ, n, η
مقاومت نهایی ماده	σ_u	تنش مرجع	σ_r
کرنش معادل	ε_{eq}	مقاومت خستگی	σ'_f
		انرژی کل	ΔW_{eq}

فصل اول

مقدمه

پدیده خستگی^۱ در مواد یکی از موضوعات مهمی است که باید در بسیاری از طراحی‌های مهندسی، خصوصاً در صنایع اتومبیل سازی و هواپیمایی در نظر گرفته شود. این مطلب موجب شکل گرفتن تحقیقات وسیعی بر روی رفتار خستگی آلیاژهای فلزی مختلف در طول دهه‌های اخیر شده است. خواص خستگی مواد ممکن است توسط آزمون‌های خستگی پرتکرار^۲ (که تغییر شکل الاستیک در آنها حاکم است) یا آزمون‌های کم تکرار (که بیشتر با تغییر شکل پلاستیک در ارتباط است) بررسی شود. از آنجایی که مکانیزم‌های تغییر شکل سیکنی منجر به تمرکز کرنش پلاستیک و در ادامه تشکیل ترک‌ها می‌شود، مطالعه رفتار مواد تحت شرایط خستگی کم تکرار^۳ به لحاظ ترک خوردگی و تخریب ماده از اهمیت بالایی برخوردار است.

تا چند دهه پیش از این، طراحی در مهندسی تنها به استفاده از مواد در ناحیه الاستیک محدود می‌شد؛ اما به تدریج با توجه به نیازهای روز افزون برای طراحی قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و در عین حال سبک، ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده پلاستیک در ذهن مهندسين طراح شکل گرفت. به این ترتیب بسیاری از قطعات به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در اثر بارگذاری در قطعه منتفی نیست. پس از گذشت مدت زمانی اندک از طراحی چنین قطعاتی، دیده شد که برخی از این قطعات در اثر چند سیکل بارگذاری و باربرداری در محدوده پلاستیک، دچار گسیختگی می‌شوند؛ در حالی که گروهی از این قطعات نیز قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و باربرداری پیوسته را دارند. بررسی این پدیده، منجر به ایجاد شاخه‌ای در علم پلاستیسیته به نام خستگی کم تکرار شد (در کنار بررسی مسائل معمول خستگی که گاه تا چند میلیون سیکل بارگذاری و باربرداری را در بر می‌گیرد) که علیرغم پیشرفت‌های بسیار به دست آمده در این زمینه، هنوز یکی از شاخه‌های ناشناخته‌ی پلاستیسیته به شمار می‌آید.

^۱ Fatigue

^۲ High Cycle Fatigue

^۳ Low Cycle Fatigue

رچتینگ^۱ نوعی رفتار تغییر شکل سیکلی مواد و سازه‌هایی است که تحت تنش‌های سیکلی با تنش میانگین غیر صفر قرار می‌گیرند. این تنش‌ها می‌بایست بزرگتر از تنش تسلیم ماده باشند. به این معنا که ماده یا سازه‌ی تحت تنش باید وارد ناحیه‌ی پلاستیک شود. رچتینگ از اهمیت ویژه‌ای در امنیت و پیش‌بینی عمر سازه‌های مهندسی دارد.

پلیمر واژه‌ای است که امروزه جای خود را در کلیه سطوح صنعت باز کرده است. از لحاظ تاریخی صنعت پلیمر از میزان رشد بسیار سریعی برخوردار بوده است. اگر چه پلیمرهای مصنوعی از اواخر قرن نوزدهم به شکل گسترده‌ای به بازار نفوذ پیدا کرده اند؛ ولی درحقیقت این صنعت با پایان جنگ جهانی دوم و ورود مواد اولیه پتروشیمیایی نسبتاً ارزان به بازار رشد کرد و ما را به عصر کنونی که می‌توان به عنوان عصر پلیمرها یاد کرد، رهنمون ساخت. می‌توان سرعت رشد این صنعت را بیشتر از صنایع دیگر دانست. که این امر خود به خاطر مزایای فناوری‌های جدید و دخالت دادن پارامترهای اقتصادی در جایگزین کردن پلیمرها به جای موادی مانند فلز، شیشه، چوب، سرامیک و غیره است. به عنوان مثال می‌توان از جایگزینی یک لوله‌ی پلیمری بخاطر قیمت و سهولت نصب و اتصال آن در قیاس با نمونه‌ی فلزی آن نام برد. در حال حاضر با توجه به پیشرفت‌های جدید در صنایع خودروسازی و یا لوازم خانگی، قطعات پلیمری به خاطر کاهش وزن و افزایش بازدهی سوخت جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات فلزی در این دسته از تولیدات شده‌اند. بنابراین شناخت هر چه بیشتر پلیمرها در زمینه‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به مباحث مطرح شده در مورد اهمیت پدیده خستگی و ناشناخته بودن خستگی کم تکرار(به ویژه پدیده رچتینگ که از نتایج خستگی‌های کم تکرار است)، از طرفی رشد روز افزون

^۱ Ratcheting

استفاده از مواد پلیمری و کمبود اطلاعات مربوط به خواص خستگی آنها در مقایسه با مواد فلزی، ما را بر آن داشت تا در این مجال به بررسی پدیده خستگی در ماده پلیمری پلی استال بپردازیم.

در فصل دوم این پروژه به معرفی پلیمرها و کاربرد آنها به ویژه پلی استال خواهیم پرداخت.

در فصل سوم به مرور مقالاتی که در ارتباط با پدیده خستگی کم تکرار و رچتینگ خصوصاً برای مواد پلیمری می باشد، پرداخته شده است. فصل چهارم این پروژه به آزمایش های کشش، فشار، تنش-کنترل و کرنش-کنترل بر روی پلی استال و بیان نتایج آنها اختصاص یافته است.

در فصل پنجم به بررسی خستگی آزمایش های تنش-کنترل و ارایه روابطی برای پیش بینی عمر پلی استال تحت بارگذاری های سیکلی تنش-کنترل پرداخته ایم.

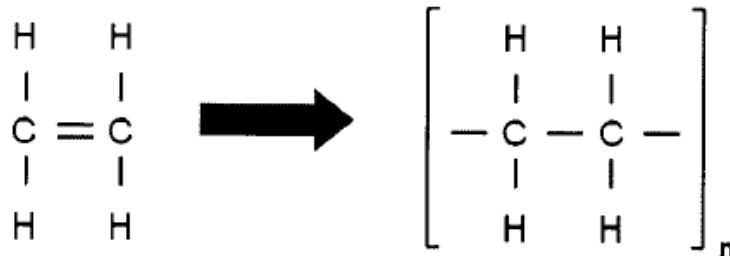
و در فصل ششم به بیان نتایج و پیشنهادها برای ادامه کار توسط سایر محققین پرداخته شده است.

پلیمرها

پلیمرها یا همان پلاستیک‌ها موادی هستند که به دلیل خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی مطلوبی که دارند به عنوان یکی از مهمترین مواد مهندسی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. واژه‌ی "پلیمر" از دو واژه‌ی یونانی "پلی" به معنی زیاد و واژه‌ی "مر" به معنی واحد تشکیل شده است. بنابراین پلیمر ماده‌ای است که از تکرار هزاران واحد تشکیل شده است.

۱-۲- ساختار شیمیایی پلیمرها

از نقطه نظر شیمیایی، پلیمرها موادی هستند که از به هم چسبیدن تعدادی مونومر توسط یک پیوند کوالانسی تشکیل شده‌اند. مونومر مولکول کوچکی است که از یک واحد شیمیایی تشکیل شده است. به عنوان مثال اتیلن یک مونومر است و گروهی از این مونومرهای اتیلن همان طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، پلی اتیلن را تشکیل می‌دهند.

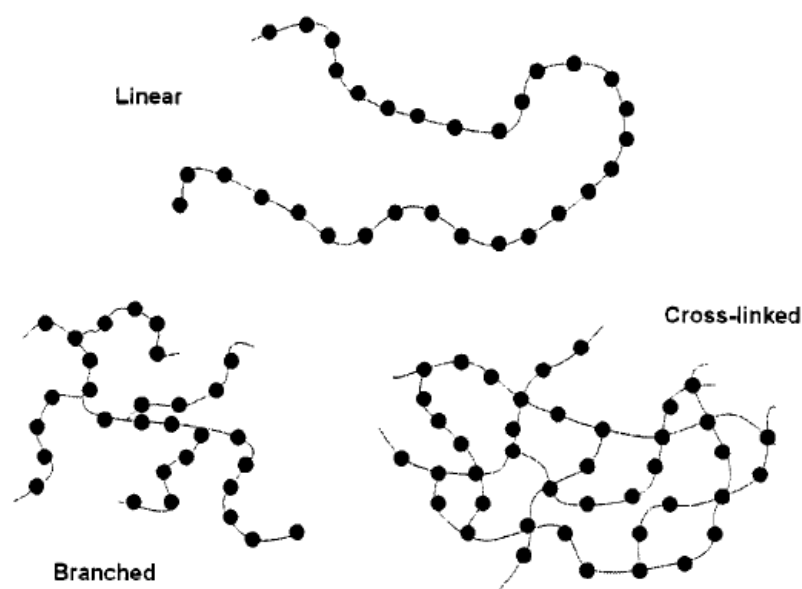


شکل ۱-۲- مونومر اتیلن و تبدیل آن به پلی اتیلن

فرآیند شیمیایی که طی آن مونومر به پلیمر تبدیل می‌شود را پلیمراسیون گویند [۱]. به منظور توضیح پلیمراسیون از پلی اتیلن به عنوان مثال استفاده می‌کنیم: در طی پلیمراسیون پیوند دوتایی بین اتم‌های کربن در مونومر اتیلن تحت شرایط مناسب به پیوند یگانه‌ی کوالانسی تبدیل می‌شود. بنابراین هر دو اتم کربن یک الکترون اضافه خواهند داشت، که می‌تواند با اتم کربن مونومر همسایه‌ی دیگر یک پیوند کوالانسی جدید تشکیل دهد. نتیجه، زنجیره‌ی مولکولی از n تا مونومر خواهد بود که پلیمر را به وجود آورده‌اند.

از آنجایی که همه‌ی مونومرهای تشکیل دهنده‌ی پلی اتیلن یکسان می‌باشند؛ از این رو به آن هموپلیمر^۱ گفته می‌شود. هرگاه پلیمراسیون بین مونومرهایی انجام شود که یکسان نباشند. در این صورت به پلیمر حاصل شده کوپلیمر^۲ گفته می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت فرآیند کوپلیمراسیون می‌تواند به دو صورت تصادفی و یا منظم انجام شود.

با توجه به شکل مولکول پلیمر، همان طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، پلیمرها را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود.



شکل ۲-۲- سه نوع پلیمر بر اساس شکل مولکول

همان طور که در شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود، پلیمرهای خطی مولکول‌هایشان به صورت یک زنجیره‌ی خطی با طول‌های متفاوت می‌باشند. پلیمرهای شاخه‌ای از یک زنجیره‌ی اصلی تشکیل

^۱ Homopolymer

^۲ Copolymer

شده‌اند که زنجیره‌های کوتاه‌تری به صورت شاخه به آن چسبیده‌اند. و در نهایت پلیمرهای شبکه‌ای را داریم که مولکول آن به شکل یک شبکه‌ی می‌باشد.

از نگاه دیگر پلیمرها را می‌توان به سه گروه اصلی تقسیم کرد [۲]:

(۱) پلاستیک‌های گرمانرم یا ترموپلاستیک‌ها

(۲) پلاستیک‌های گرماسخت یا ترموست‌ها

(۳) الاستومرها (لاستیک‌ها)

پلاستیک‌های گرمانرم یا ترموپلاستیک‌ها با افزایش دما نرم شده و با خنک شدن به سختی اولیه‌شان برمی‌گردند و بیشتر قابل ذوب هستند. پلیمرهای خطی و شاخه‌ای معمولاً جز این دسته به حساب می‌آیند. به عنوان مثال نایلون.

پلاستیک‌های گرماسخت یا ترموست‌ها وقتی گرم می‌شوند، سخت شده و هنگام سرد شدن به سختی اولیه بر نمی‌گردند. این مواد توسط کاتالیزورها یا گرم شدن تحت فشار به یک شکل دائمی تبدیل می‌شوند. پلیمرهای شبکه‌ای جز این دسته به حساب می‌آیند.

الاستومرها می‌توانند بدون پاره شدن و گسستن در برابر تغییر شکل مقاومت کنند.

۲-۲- تاریخچه پلیمرها

اولین بار در سال ۱۸۶۲ برادران هایت موفق به تولید سلولوئید شدند و در حدود ۴۰ سال بعد شخصی به نام باکلند موفق به تولید باکلیت شد و در حد فاصل سال‌های ۱۹۲۱ تا ۱۹۲۸ بعضی از نایلون‌ها و همچنین اوره-فرمالدهید و غیره به بازار عرضه شد. در سال ۱۹۳۴ پلی وینیل کلرید در میزان تجاری جهت ساخت محصولات مختلف روانه بازار شد.

اما مهمترین دوره پیشرفت پلیمرها در دهه ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ اتفاق افتاد که در آن زمان دوران اختراع و تولید انواع مختلف پلیمرها با خواص و کاربردهای متنوع، نقطه عطفی در این صنعت نام گرفت. در این سالها دانشمندانی چون زیگلر از آلمان و یا ناتا از ایتالیا اصول و روشهای پلیمراسیون را روشن کردند و باعث پیدایش تکنولوژی نوینی در جهت ساخت پلیمرهایی مختلفی همچون پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی اترها، اپوکسیها و غیره شدند.

۲-۳- تقسیم بندی پلیمرها بر اساس بنیان اصلی

پلیمرها بر اساس بنیان اصلی تشکیل دهنده‌ی آنها به سه گروه زیر تقسیم بندی می‌شوند:

(۱) طبیعی

(۲) نیمه مصنوعی

(۳) پلاستیک‌های مصنوعی یا صنعتی

در مورد پلیمرهای طبیعی می‌توان به موادی چون رزین‌ها-بیومین اشاره کرد.

در مورد پلیمرهای نیمه مصنوعی به ماده‌ای چون گائین که ریشه‌ی اصلی آن شیر می‌باشد،

اشاره می‌شود که در ساخت دسته‌ی برس، دکمه و چسب چوب کاربرد دارد.

اما پلیمرهای صنعتی که کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند، قطعات فراوانی مثل چرخ‌دنده‌ها و

بادامک‌ها را شامل می‌شوند که ریشه اصلی آنها زغال سنگ می‌باشد؛ از جمله این مواد فرم آلدئید-

اوره فرم آلدئید و فلئوئور کربن می‌باشند.

۲-۴- خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی پلیمرها

قابلیت‌های حل شدگی، انعطاف پذیری، سختی و مقاومت پلیمرها وابسته به خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی آنها می‌باشد. بنابراین تحلیل این خواص برای کاربردهای مهندسی بسیار مهم می‌باشد.

در کاربردهای عملی می‌بایست وزن مولکولی (MW) پلیمرها مشخص شود. مونومرها دارای وزن مولکولی بسیار پایینی می‌باشند، اما در طی فرآیند پلیمراسیون وزن مولکولی زنجیره‌ی تشکیل شده بسیار زیاد می‌شود. به هر حال اندازه‌گیری دقیق وزن مولکولی یک پلیمر خاص بسیار مشکل است؛ چرا که واحدهای شیمیایی شرکت کننده در انتهای شاخه در مقایسه با آنهایی که درون زنجیره‌ی اصلی قرار می‌گیرند، رفتار متفاوتی دارند. کمیتی که از آن به منظور ارزیابی فرآیند پلیمراسیون استفاده می‌شود، درجه‌ی پلیمراسیون می‌باشد. درجه‌ی پلیمراسیون می‌تواند بیان کننده‌ی میانگین وزن مولکولی پلیمر تقسیم شده بر وزن مولکولی واحدهای شیمیایی موجود در زنجیره باشد [۳].

علاوه بر این ساختار مولکولی پلیمرها بر خواص مکانیکی آنها اثر گذار است. در عمل گزارش شده است که شبکه‌ای و شاخه‌ای شدن مولکول‌های زنجیره‌ها باعث افزایش سفتی و مقاومت پلیمرها می‌شود [۳]. این نوع تقویت به این علت رخ می‌دهد که به طور کلی این حالت سخت‌تر از شاخه‌های مولکولی جداگانه است. علاوه بر این کریستالی شدن در ساختار پلیمر منجر به بهبود خواص مکانیکی خواهد شد. کریستال‌های اتمی همراه با ناحیه‌های آمورف با جهت‌های تصادفی فقط در ترموپلاستیک‌ها وجود دارند و در شاخه‌های مولکولی به دام انداخته می‌شوند.

خواص مکانیکی پلیمرها به دما نیز وابسته می‌باشد. در عمل هر پلیمر دمای مشخصی به نام دمای انتقال شیشه^۱ (T_g) با خود همراه دارد. در حقیقت سفتی و مقاومت پلیمر در بالای دمای T_g به آهستگی با افزایش دما کاهش می‌یابد و در زیر این دما، مواد رفتاری ترد و شکننده از خود نشان می‌دهند. به هر حال برای دماهای بسیار بالاتر از T_g پلیمرها نرم می‌شوند و سفتی و مقاومت آنها به شدت کاهش می‌یابد. گزارش شده است که اکثر پلیمرهایی که ساختاری آمورف دارند، در دماهای بالاتر از T_g خواص مکانیکی‌شان به شدت کاهش می‌یابد [۲]. در جدول (۱-۲) خواص مکانیکی برخی از پلیمرهایی که در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آورده شده است.

جدول ۱-۲- خواص مکانیکی و حرارتی برخی از پلیمرهای مهندسی

پلیمر	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی (g/cm^3)	T_g ($^{\circ}C$)
اپوکسی	۷۰	۲/۶	۱/۲	۱۷۵
پلی پروپیلن	۴۰	۱/۹	۰/۹	-۱۰
پلی استر	۹	۰/۷	۱/۲	۱۵۰
پلی اتیلن	۱۰	۰/۲	۰/۹	-۳۰
پلی استایرن	۴۵	۳	۱/۰۵	۱۰۰
پلی آمید ۶۶	۷۳	۲/۱	۱/۱	۵۰
پی وی سی	۴۵	۲/۵	۱/۳	۸۵

۲-۵- کاربردها و خواص پلیمرها

بیشترین مصرف پلاستیک‌ها درست پس از جنگ جهانی دوم به عنوان جایگزین ارزان قیمت مواد مرسوم و رایج شکل گرفت. اما حتی امروز نیز تصور عمومی از صنعت پلاستیک به طور کامل شفاف و مثبت نیست. سهم قابل توجه پلاستیک‌ها در ارتقاء سطح استاندارد کیفی زندگی تبیین نشده

^۱ Glass Transition Temperature

است. با این حال در بسیاری از زمینه‌ها مواد پلاستیکی مدتی است که جایگاه مناسب خود را در بازار یافته‌اند که از جمله آنها می‌توان به صنعت برق اشاره کرد که ترکیب خواص عالی عایق بودن و چقرمگی، دوام و دیر سوز بودن به انواع مختلف دو شاخه سر پیچ لامپ و عایق سیم‌ها و کابل‌ها منتهی شده است.

اگر بخواهیم به فهرستی از کاربرد پلاستیک‌ها اشاره کنیم، می‌توانیم به موارد زیر توجه کنیم:

- ۱) کاربردهای خاص (پیزوالکتریک و پیروالکتریک) در بلندگوها و آشکارسازی
- ۲) مصارف وسیع پلاستیک‌ها در ساختمان سازی مثل لوله آب، فاضلاب لایه‌های ضد رطوبت، کفپوش‌ها، عایق کاری، تزئین دیوار و غیره.
- ۳) کاربرد پلاستیک‌ها در موارد بسته بندی مثل بطری‌ها و ظروف حمام
- ۴) صنایع خودروسازی که در حال حاضر یکی از مصرف کنندگان عمده پلاستیک‌ها است که افزایش وزن و تعداد قطعات پلاستیکی در خودروها مبین این ادعا است: از جمله این قطعات که می‌توان در اتومبیل به آنها اشاره کرد باطری، سیم‌های نرم، دو شاخه، سوئیچ برق، کلاهک‌های تقسیم، لوازم چراغ، روکش صندلی، تودوزی و تزئین بدنه، پروانه رادیاتور، لوله آب، لوله بنزین، مخازن آب سرد کن و چندین قطعه دیگر پلاستیکی موجود در یک خودرو مثل کمر بند ایمنی، سپر اتومبیل، شبکه رادیاتور و غیره که در بسیاری از این قطعات وزن قطعه پلاستیکی بسیار کم بوده و هست حتی به طوری که اظهار شده است در یک خودرو کوچک اروپایی در حدود ۴۵۰ قطعه مختلف از نوع پلی استال (POM) به کار گرفته شده است که مجموع وزن آنها از یک کیلوگرم فراتر نرفته است.
- ۵) مبلمان و لوازم خانگی و اداری
- ۶) وسایل حمل و نقل آبی و هوایی مثل قایق‌ها و هواپیماها

۷) تجهیزات صنعتی مثل لوله‌های صنعتی، پمپ‌ها، شیرها، شیشه اتاق‌های کنترل که

از موادی همچون PVC-PTFE استفاده می‌شود.

۸) صنایع عکاسی

۹) تجهیزات پزشکی مثل سرنگ تزریق و غیره

۱۰) استفاده از فیلم پلاستیک جهت کاغذ چاپ

۱۱) صنایع تولید کفش

۱۲) لباس‌های زمستانی و غیره

موارد اشاره شده تنها برخی از مصارف عمده مواد پلاستیکی را نشان می‌دهد.

با توجه به تاثیر گذاری عوامل زیر در سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۷۳ رشد چشمگیر کاربرد

پلاستیک‌های مشهود بوده است.

۱) افزایش شناخت خصوصیات و توانایی‌های مواد پلاستیکی

۲) قابلیت رو به رشد پلاستیک‌ها به واسطه ظهور مواد جدید

۳) کاهش مداوم هزینه مواد اولیه پلاستیک نسبت به هزینه مواد رایج مانند چرم، کاغذ،

فلزات و غیره

۴) پایین بودن هزینه حمل و هزینه تولید

صرف نظر از قیمت نفت این عوامل به میزان زیادی نشان می‌دهد که صنعت پلاستیک یک

صنعت تکامل یافته است که در اقتصاد جهان سهم بسزایی دارد. و با توجه به اینکه هزینه تبدیل نفت

به مواد پلاستیکی و هزینه‌های حمل و نقل و فرایند آنها کمتر از فعالیت‌های مشابه توسط مواد مرسوم

است، بنابراین مشخص می‌شود که قیمت پلاستیک‌ها با سرعتی کمتر از مواد مرسوم رقیب آنها

افزایش می‌یابد. این موضوع گواهی دهنده افزایش اهمیت پلاستیک‌ها در آینده است.

مشکلی که برای صنعت پلاستیک هم اکنون متصور است که در سال ۱۹۷۰ نیز آشکار شد، نگرانی در مورد محیط زیست می باشد. که نگاه کلی آن بر روی صنایع شیمیایی و به منبع بخشی از آن که مواد پلاستیکی هستند متمرکز است. اما در مجموع باید اشاره کرد که کاربرد پلاستیکها در صنایع، روند صعودی خود را همچنان حفظ کرده است تا جایی که امروز در ساخت یک هواپیمای مافوق صوت بیش از ۲/۵ تن قطعات پلیمری مصرف می شود.

از خواص عمده پلاستیکها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) سبک بودن
- (۲) عایق حرارت بودن
- (۳) عایق الکتریسیته بودن
- (۴) شفاف بودن
- (۵) رنگ پذیری
- (۶) مقاوم در برابر شرایط جوی
- (۷) مقاوم در برابر حلالهای شیمیایی
- (۸) بهداشتی بودن
- (۹) سهولت شناخت
- (۱۰) ارزانی
- (۱۱) سازگاری با شرایط مختلف
- (۱۲) کاربرد متنوع

۲-۶- پلی استال (POM)

۲-۶-۱- معرفی پلی استال

پلی استال یا همان POM پلیمر مهندسی است با محدوده‌ی وسیعی از کاربردها که خواصی شبیه به فلزات دارد. این پلیمر خواص بسیار خوبی دارد که خلاء بین پلیمرهای معمولی و فلزات را پر می‌کند. از زمان ارائه این پلیمر در سال ۱۹۶۰ به صنعت در کاربردهای وسیعی از آن استفاده شده است. کاربردهایی نظیر صنایع اتومبیل سازی، تجهیزات برقی، ساختمان، سخت افزار، الکترونیک و بسیاری از صنایع دیگر. دلرین^۱ نامی که توسط شرکت DuPont برای این پلی استال انتخاب شد، پلی استال پلیمری تقریباً کریستالی است که از پلیمراسیون فرمالدئید حاصل می‌شود.

به طور کلی پلی استال را می‌توان رقیب عمده نایلون که دارای نقایص مهمی است، دانست. چرا که پلی آمیدها در محیط‌های مرطوب پایداری ابعادی مناسبی ندارند. از طرفی پلی استال به خاطر قابلیت ریخته‌گری عالی که دارد، گزینه مناسبی برای ساخت قطعات با اشکال پیچیده و یا ابعاد ریز می‌باشد.

از جمله مزیت‌های پلی استال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) پلی استال از مونومر $-CH_2-O-$ تشکیل شده است و به دلیل زنجیره انعطاف پذیر

که دارد، اجازه مارپیچ شدن را می‌دهد و کریستالی شدن را آسان می‌کند.

(۲) خواص مکانیکی عالی در دمای اتاق $\sigma_y = 39.9MPa$ ، $E = 3100MPa$.

(۳) محدوده‌ی دمای کارکرد وسیع: دمای انتقال شیشه $T_g = -75^\circ C$ و دمای ذوب

$$T_m = 178^\circ C$$

^۱ Delrin

(۴) ضریب اصطکاک پایین $\mu = 0.075$ در برابر فولاد [۴].

(۵) خواص خستگی عالی: در جدول (۲-۲) خواص پلی استال با چند پلیمر دیگر مقایسه شده است.

جدول ۲-۲- مقایسه خواص برخی از پلیمرهای مهندسی [۵]

	PA	POM	PC	PPO/PPE	PBT/PET	TPE
Waterproof	D	B	A	A	A	A
Mold shrinkage factor	B	B	A	A	A	A
Fatigue strength	A	A	C	C	A	A
Toughness	A	B	A	B	B	A
Creep resistance	C	A	A	B	B	B
Solvent resistance	A	A	D	C	A	A
Weather resistance	C	C	B	B	A	B
Electrical properties	C	B	A	A	A	B
Abrasion resistance	A	A	C	C	B	B
Flame resistance	B	D	A	B	B	B

A: Excellent B: Good C: Unsatisfactory D: Inferior

۲-۶-۲- کاربردهای شیمیایی پلی استال

از کاربردهای شیمیایی پلی استال می توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) اسپری های شیمیایی باغبانی

(۲) ونتوری کاربراتور

(۳) پمپ و شیر

(۴) قاب ماشین آلات

(۵) تصفیه های آب خانگی

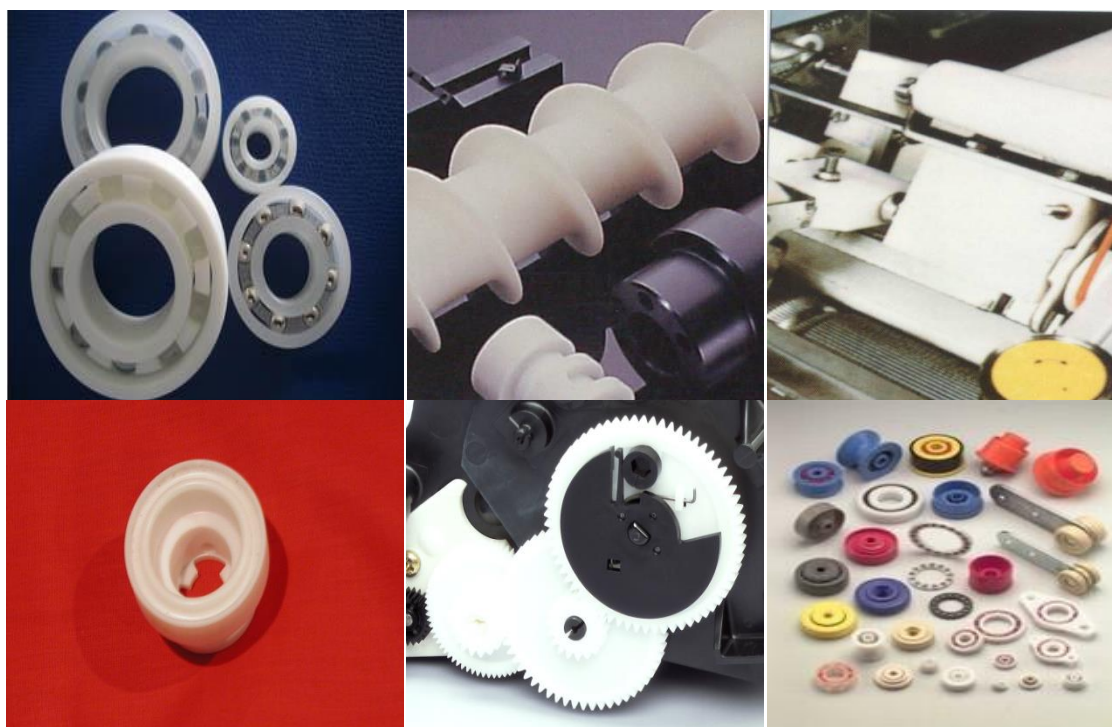
(۶) صابون های دارویی

(۷) مخزن های اختلاط رنگ

۲-۶-۳- کاربردهای مکانیکی پلی استال

از جمله کاربردهای مکانیکی پلی استال می توان به موارد زیر اشاره نمود.

- ۱) سطوح سایشی : بسیاری از بوش ها، یاتاقان ها و بادامک ها
- ۲) چرخ دنده ها: چرخ های دندانه دار، کلاستر، مارپیچ، مایل و حلزونی
- ۳) نقاله ها
- ۴) پروانه ی پمپ ها
- ۵) پروانه ی فن ها و دمنده ها
- ۶) انواع دستگیره
- ۷) انواع فنرها



شکل ۲-۳- برخی کاربردهای مکانیکی پلی استال

۲-۶-۴- کاربردهای برقی پلی استال

- ۱) انواع سوئیچ‌های اتومبیل
- ۲) قاب سیم پیچ
- ۳) ترمینال‌های تلفن
- ۴) اجزای رله‌ها
- ۵) قاب‌های شماره‌های الکترومکانیکی و غیره

مروری بر کارهای گذشته

کارهایی را که در زمینه بارگذاری‌های سیکلی و بررسی رفتارهای مکانیکی مواد تحت این نوع بارگذاری‌ها انجام گرفته است را می‌توان به دو دسته، بر حسب نوع ماده‌ای که این بارگذاری‌ها بر روی آن انجام گرفته است، تقسیم بندی نمود. یک دسته آزمایش‌هایی است که بر روی مواد فلزی انجام شده است و دسته‌ی دیگر آزمایش‌هایی است که بر روی مواد پلیمری انجام گرفته است. در ادامه به مرور برخی از این مقالات خواهیم پرداخت.

۳-۱- بارگذاری‌های سیکلی بر روی مواد فلزی

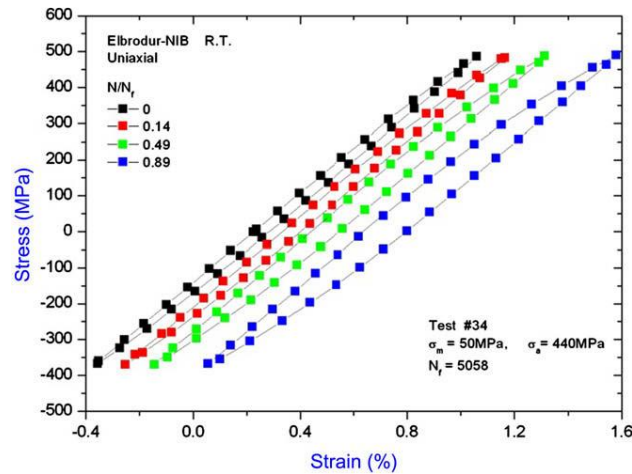
Kim و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی نوعی آلیاژ مس تحت بارگذاری تک محوره همراه با تنش میانگین پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش‌های تنش-کنترل در دمای اتاق با و بدون تنش میانگین، کرنش رچتینگ را تا زمان شکست اندازه‌گیری کردند. آنها با ترسیم منحنی‌های رچتینگ-سیکل نشان دادند که برای این آلیاژ، منحنی مربوطه شبیه به منحنی خزش شامل سه قسمت اولیه، پایدار و بحرانی می‌باشد. این محققین به بررسی نرخ کرنش رچتینگ نیز پرداخته و پیش بینی عمر خستگی این آلیاژ را با استفاده از مدل‌هایی نظیر مدل Walker و SWT انجام دادند [۶]. در جدول (۳-۱) مقادیر تنش میانگین و دامنه تنش اعمال شده در آزمایش‌های

جدول ۳-۱- مقادیر تنش میانگین و دامنه تنش در مرجع [۶]

Mean stress σ_m (MPa)	Stress amplitude σ_a (MPa)	Cycle to failure N_f (cycle)
0	620	103
	560	894
	520	2089
	480	5764
	440	12,775
	400	15,330
	360	62,441
50	480	3889
	440	5242
	400	11,877
	360	23,910
100	480	1905
	440	4428
	400	7044
	360	15,740
-50	480	5066
	440	13,595
	400	34,330
	360	85,120

تجربی این مقاله، آورده شده است.

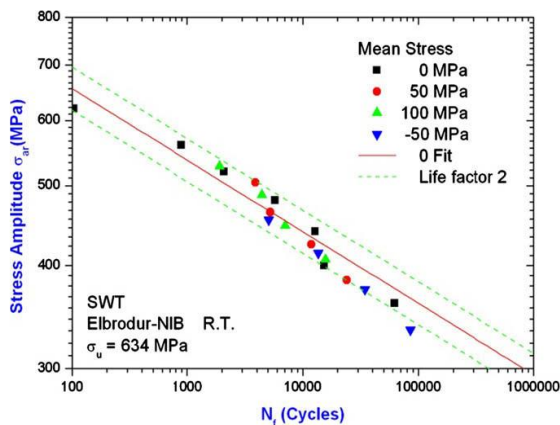
در شکل (۱-۳) حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش این آلیاژ مس نمایش داده شده است.



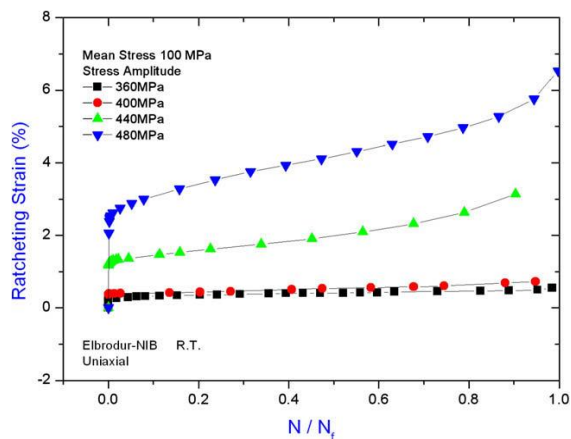
شکل ۱-۳- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آلیاژ مس برای $\sigma_m = 50 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 440 \text{ MPa}$ [۶]

همچنین در شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) نمودارهای کرنش رچتینگ بر حسب عمر خستگی و

دامنه تنش بر حسب عمر خستگی به ترتیب نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- پیش بینی عمر خستگی با استفاده از پارامتر SWT [۶]



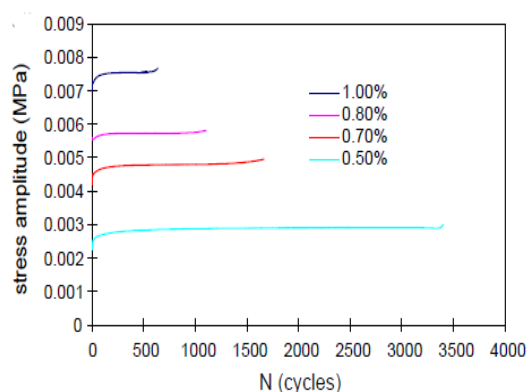
شکل ۳-۲- کرنش رچتینگ آلیاژ مس با تنش میانگین ثابت و دامنه تنش متغیر [۶]

Yang در سال ۲۰۰۵ به بررسی رفتار خستگی کم تکرار و رچتینگ فولاد CK45 تحت

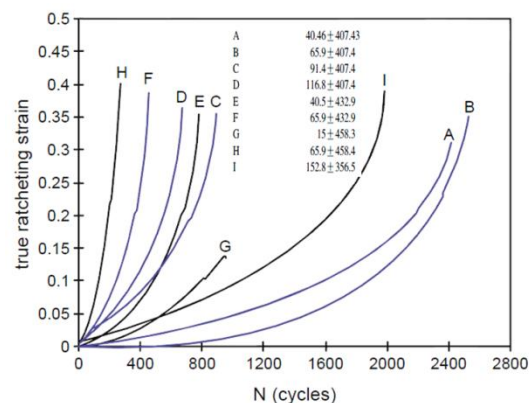
بارگذاری تک محوره اقدام نمود. او هم آزمایش‌های کرنش-کنترل و هم تنش-کنترل را بر روی این

فولاد انجام داد. در این مقاله آزمایش‌های کرنش-کنترل با و بدون کرنش میانگین به منظور بررسی اثر کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده است. آزمایش‌های تنش-کنترل نیز به منظور مشاهده‌ی اثرات تنش میانگین و دامنه‌ی تنش بر شکست رچتینگ انجام گرفته است. همچنین بر اساس نتایج آزمایش‌های کرنش-کنترل، معادلاتی برای پیش‌بینی عمر خستگی به دست آورده شده، و از آنها برای پیش‌بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده شده است [۷].

در شکل (۳-۴) نمودار کرنش رچتینگ فولاد CK45 تحت بارگذاری سیکلی تنش-کنترل نشان داده شده است. در شکل (۳-۵) نیز تغییرات دامنه تنش در طول بارگذاری کرنش کنترل نشان داده شده است.



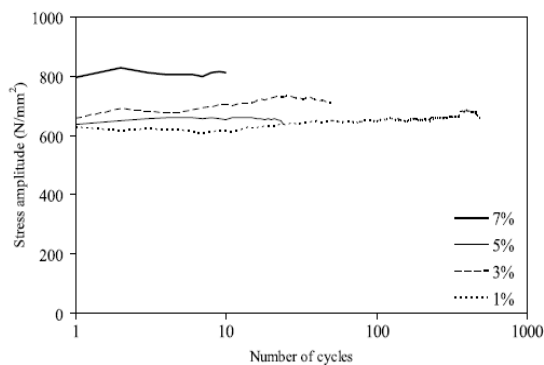
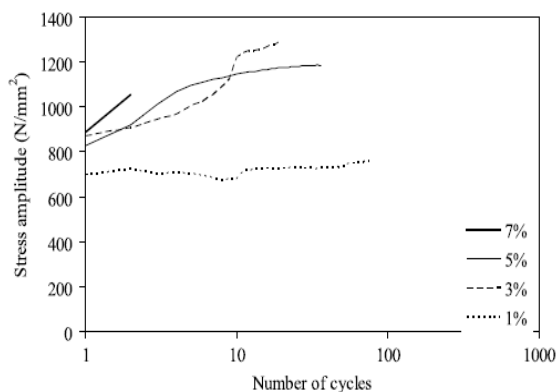
شکل ۳-۵- تغییرات دامنه تنش فولاد کربنی CK45 تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۷]



شکل ۳-۴- کرنش رچتینگ فولاد کربنی CK45 تحت بارگذاری تنش-کنترل [۷]

Nip و همکارانش در سال ۲۰۰۹ طی پژوهشی به بررسی خستگی کم تکرار و فوق‌العاده کم تکرار و منحنی‌های تنش-کرنش سازه‌هایی از جنس فولاد کربنی و ضد زنگ پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش‌های کرنش-کنترل تک محوره عمر خستگی سه نوع فولاد را مورد مطالعه قرار دادند [۸].

در شکل (۳-۶) تغییرات دامنه تنش فولادی را مشاهده می‌کنید که به صورت گرم نورد شده است و از خود رفتار سخت شوندگی نشان می‌دهد.

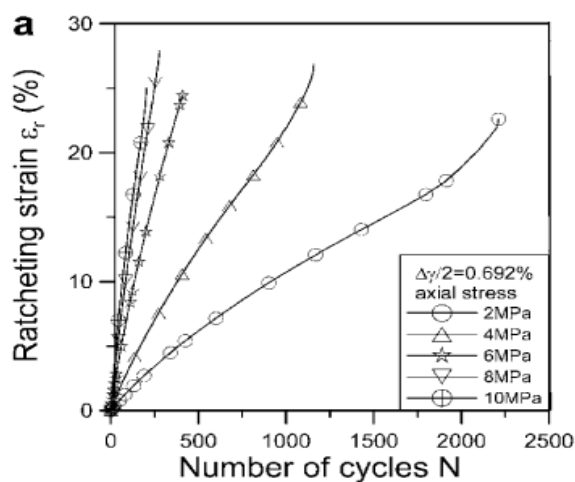


شکل ۳-۷- تغییرات دامنه تنش فولاد ضد زنگی که به صورت سرد شکل داده شده است، تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۸]

شکل ۳-۶- تغییرات دامنه تنش فولاد کربنی نورد گرم شده تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۸]

در شکل (۳-۷) نیز تغییرات دامنه تنش فولاد ضد زنگ کربنی که به صورت سرد شکل داده شده ترسیم شده است.

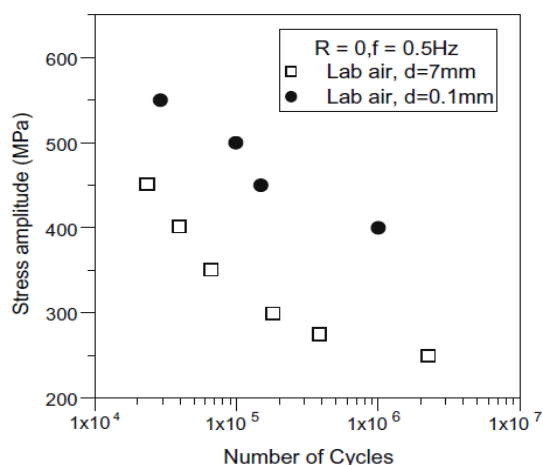
Xu Chen و Hong Gao در سال ۲۰۰۸ طی آزمایش‌هایی به مطالعه‌ی اثر کرنش رچتینگ محوری بر عمر خستگی پیچشی نوعی لچیم بدون سرب پرداختند. آنها با استفاده از بارگذاری‌های تنش-کنترل چند محوره در دمای اتاق دریافتند که با افزایش کرنش رچتینگ محوری عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین معادلاتی را برای بیان عمر خستگی تحت بارگذاری‌های چند محوره بیان نمودند [۹]. در شکل (۳-۸) رفتار رچتینگ محوری ماده‌ی مذکور نشان داده شده است.



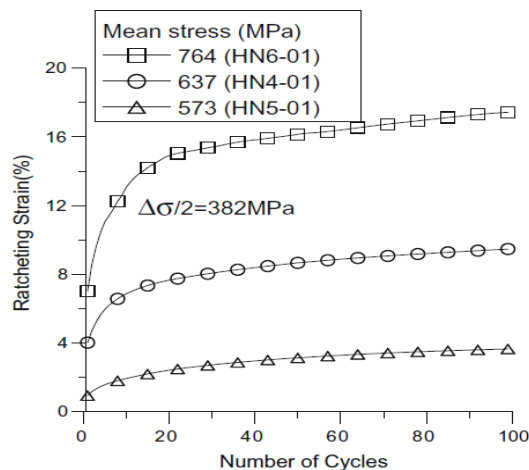
شکل ۳-۸- رفتار رچتینگ محوری نوعی لچیم بدون سرب [۹]

در سال ۲۰۰۸ Gang Chen و همکاران آزمایش‌هایی را در رابطه با مطالعه‌ی خواص خستگی و رچتینگ فولادهای نیتروژن دار (X13CrMnMoN18-14-3)، تحت بارگذاری تک محوره انجام دادند. در این آزمایش‌ها آنها به بررسی اثرات دامنه‌ی تنش، تنش میانگین، تاریخچه‌ی بارگذاری و نرخ تنش بر رفتار رچتینگ این نوع فولادها پرداختند. بحث در مورد اثر اندازه‌ی نمونه‌ها بر رفتار خستگی این مواد از دیگر مباحثی می‌باشد که در این مطالعه به آن پرداخته شده است [۱۰].

در شکل (۳-۹) نمودار کرنش رچتینگ، و در شکل (۳-۱۰) دامنه تنش بر حسب عمر خستگی مربوط به فولاد نیتروژن دار آورده شده است.



شکل ۳-۱۰- دامنه تنش در آزمایش‌های تنش-کنترل بر حسب عمر خستگی [۱۰]

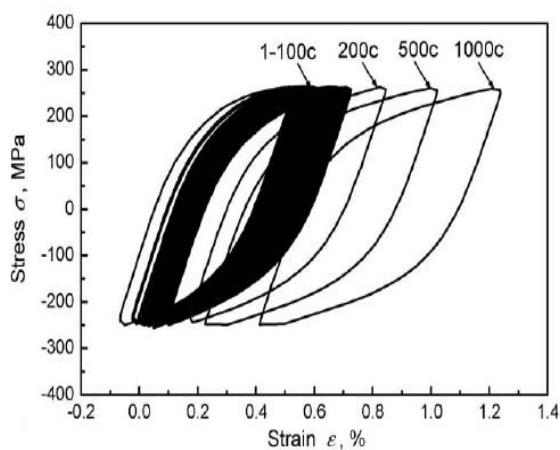


شکل ۳-۹- نمودار کرنش رچتینگ فولاد نیتروژن دار [۱۰]

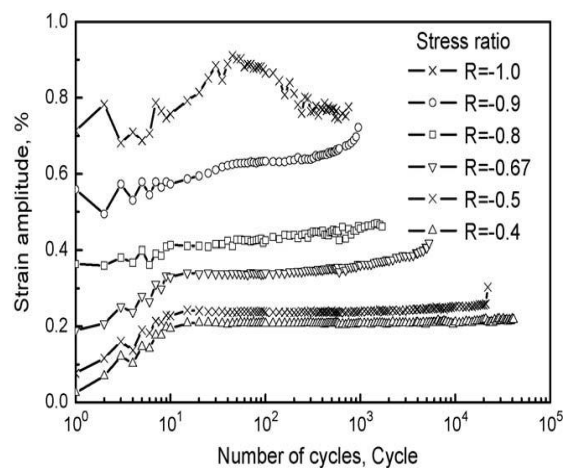
Xu Chen و همکارانش در سال ۲۰۰۵ نوعی لحیم قلع-سرب یونکتیک را تحت بارگذاری چند محوره و تک محوره قرار داده و به مطالعه‌ی رفتار رچتینگ آن پرداختند. این ماده تحت بارگذاری‌های تک محوره، پیچش خالص و محوری-پیچشی از خود رفتار نرم شوندگی نشان داد. همچنین در این مطالعه اثرات نرخ کرنش اعمالی در حالت‌های مختلف بر کرنش رچتینگ مورد بررسی قرار گرفت [۱۱].

Kang و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی تاثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضد زنگ SS304 در بارگذاری تک محوره تحت شرایط تنش-کنترل و در دمای اتاق اقدام کردند. تاثیرات تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش بر کرنش رچتینگ و عمر نمونه‌ها در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی این ماده وابستگی زیادی به تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش دارد. همچنین مشخص شد که دو نوع شکست، ناشی از رچتینگ با گلوپی شدن کاملاً مشهود، به علت کرنش‌های بزرگ رچتینگ و شکست خستگی به علت خستگی کم تکرار با دامنه‌ی کرنش تقریباً ثابت که به ترتیب رخ می‌دهند، بسته به سطح تنش اعمالی در آزمایش می‌باشند [۱۲].

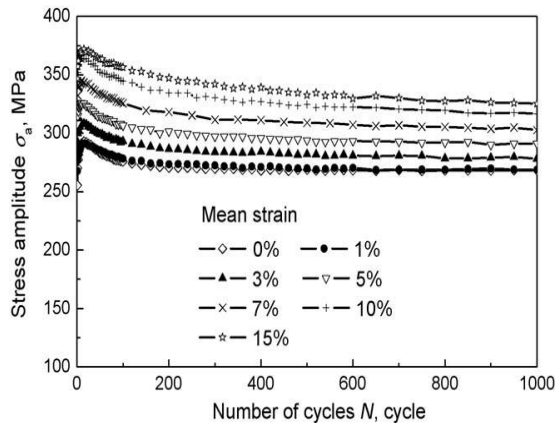
در شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۴) برخی نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده در مرجع [۱۲] آورده شده است.



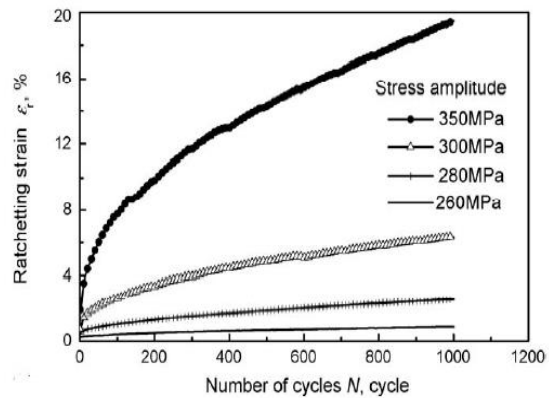
شکل ۳-۱۲- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش فولاد SS304 [۱۲]



شکل ۳-۱۱- تغییرات دامنه کرنش فولاد SS304 تحت بارگذاری تنش-کنترل [۱۲]



شکل ۳-۱۴- تغییرات دامنه تنش فولاد SS304 تحت بارگذاری کرنش-کنترل [۱۲]



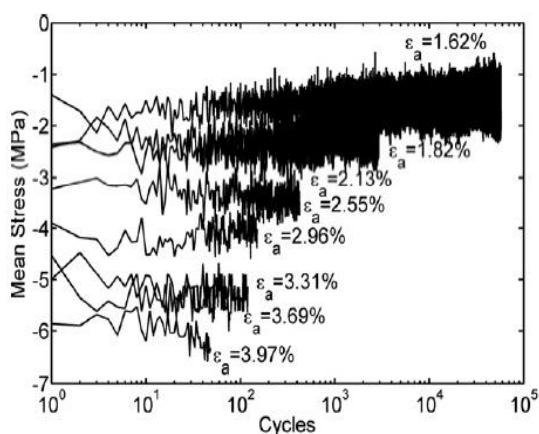
شکل ۳-۱۳- کرنش رچتینگ فولاد SS304 با تنش میانگین 10MPa و دامنه تنش متغیر [۱۲]

۳-۲- بارگذاری‌های سیکلی بر روی مواد پلیمری

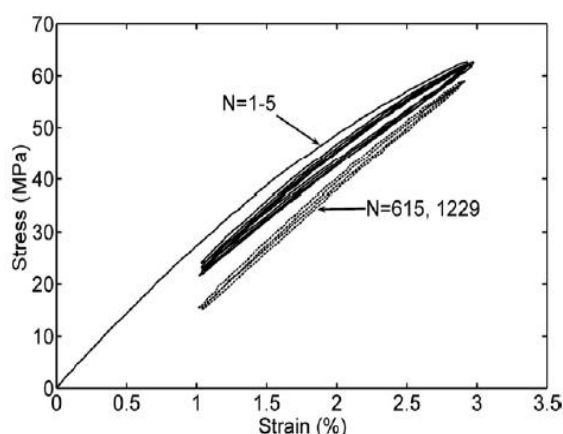
در سال ۲۰۰۷، Zihui Xia و Gang Tao به بررسی اثر تنش میانگین و کرنش میانگین بر رفتار خستگی نوعی اپوکسی رزین پرداختند. در این پژوهش به واسطه مجموعه‌ای از آزمایش‌های کرنش-کنترل متشکل از چهار مجموعه با نسبت‌های کرنش متفاوت در دمای اتاق، اثر تنش میانگین و کرنش میانگین بر عمر خستگی اپوکسی رزین Epon 826/Epi مخلوط شده با Curing Agent 9551 را مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل‌های کمی خواص مکانیکی نظیر، رهایش تنش میانگین، تحول حدود تغییرات تنش و چگالی انرژی کرنشی بر اساس داده‌های تنش-کرنش به دست آمده از "سیستم اندازه‌گیری کرنش غیرتماسی بلادرنگ" انجام شده است. تابع تنش یا کرنش میانگین بر حسب پارامتر آسیب معادل شامل اثر تنش یا کرنش میانگین بر عمر خستگی این ماده‌ی اپوکسی پلیمر معرفی شده است. همچنین در این مقاله نحوه‌ی تعیین تابع تنش یا کرنش میانگین مشخص شده و ثابت‌های ماده برای همه‌ی دیدگاه‌های تنش، کرنش و انرژی به دست آمده است. مشاهده شد که سطح تنش میانگین در طول مرحله‌ی اول از عمر خستگی دچار رهایش شده و سپس در طول مرحله‌ی بعدی به حد پایدار خود می‌رسد و این مقدار در باقیمانده‌ی عمر نمونه ثابت باقی می‌ماند. در نهایت نیز تطابق

خوبی بین پیش‌بینی‌ها و داده‌های تجربی وجود داشت؛ خصوصاً برای پیش‌بینی‌هایی که با استفاده از روش انرژی انجام شده بود. [۱۳].

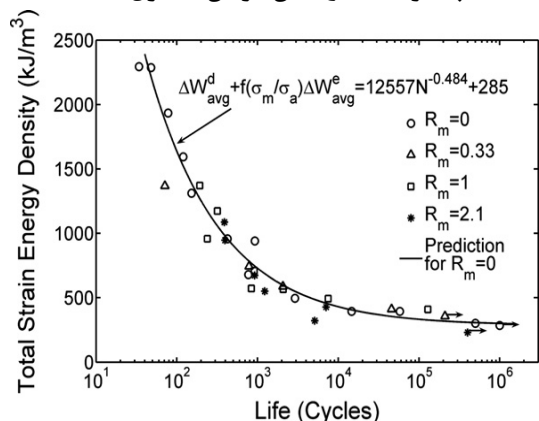
در شکل (۳-۱۵) حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش این اپوکسی پلیمر تحت آزمایش کرنش-کنترل ترسیم شده است. در شکل (۳-۱۶) تغییرات تنش میانگین همین ماده تحت بارگذاری کرنش-کنترل آورده شده است. در شکل‌های (۳-۱۷) و (۳-۱۸) به ترتیب تغییرات چگالی انرژی کرنشی و چگالی انرژی کل بر حسب عمر خستگی آورده شده است.



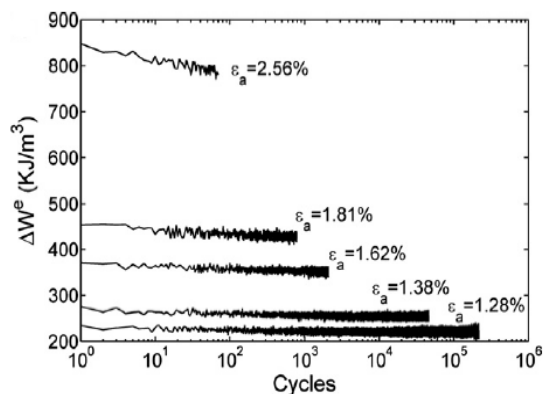
شکل ۳-۱۶- تغییرات تنش میانگین نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمایش کرنش-کنترل [۱۳]



شکل ۳-۱۵- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش نوعی اپوکسی تحت آزمایش کرنش-کنترل [۱۳]



شکل ۳-۱۸- چگالی انرژی کرنشی کل بر حسب عمر خستگی [۱۳]



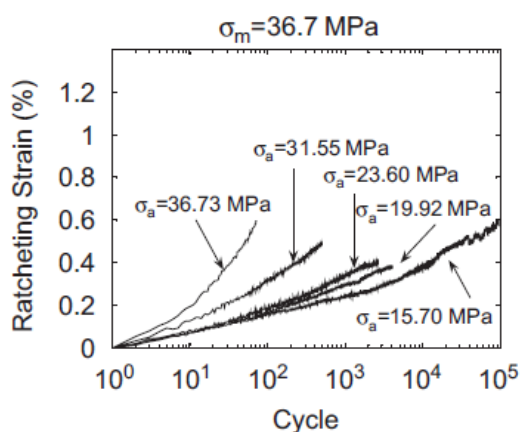
شکل ۳-۱۷- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک نوعی اپوکسی پلیمر [۱۳]

Gang Tao و Zihui Xia باز هم در سال ۲۰۰۷ به بررسی رفتار رچتینگ همان اپوکسی پلیمر

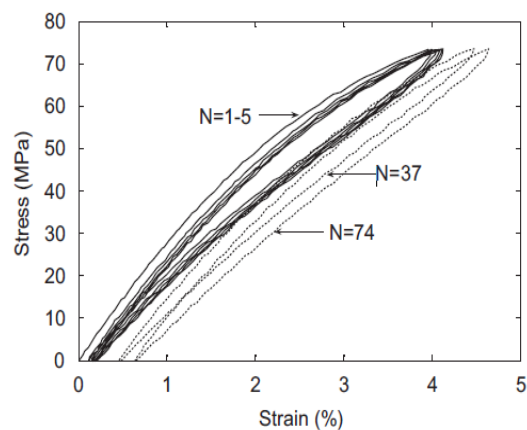
و اثر آن بر عمر خستگی پرداختند. همه‌ی آزمایش‌های این مطالعه تحت شرایط تنش-کنترل و در

دمای اتاق و با همان سیستم اندازه‌گیری کرنش غیرتماسی بلادرنگ انجام شد. همانند مقاله‌ی پیشین‌شان نتایج کمی این آزمایش‌ها همانند کرنش رچتینگ، حدود تغییرات کرنش و چگالی انرژی کرنشی در تنش‌های میانگین و دامنه‌های تنش متفاوت از داده‌های تنش-کرنش به دست آمده است. در این مطالعه مشخص شد که مقدار کرنش رچتینگ و نرخ آن متأثر از تنش میانگین و دامنه‌ی تنش است. عمر خستگی به دست آمده از این آزمایش‌ها با نتایج مقاله‌ی قبلی که تحت شرایط کرنش-کنترل انجام گرفته بود، مقایسه شد و مشخص شد که کرنش رچتینگ اثر قابل توجهی بر عمر خستگی این ماده‌ی پلیمری ندارد. در نهایت نیز در این پژوهش آزمایش‌های تنش-کنترل با اعمال دوره‌های استراحت به منظور تحقیق در مورد مکانیزم‌های تجربی مشاهده شده بر روی این پلیمر انجام گرفته است. مشاهده شد که کرنش رچتینگ در این اپوکسی پلیمر، اساساً تغییر شکل ویسکوالاستیک قابل بازیافتی است که تاثیری بر آسیب این ماده ندارد [۱۴].

در شکل‌های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) به ترتیب حلقه‌های هیستریزیس تنش و کرنش رچتینگ ماده مذکور آورده شده است.



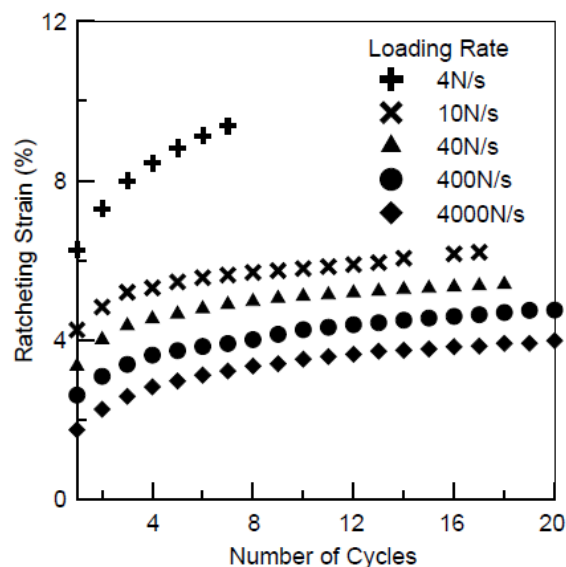
شکل ۳-۲۰- کرنش رچتینگ نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمون تنش-کنترل [۱۴]



شکل ۳-۱۹- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش نوعی اپوکسی پلیمر تحت آزمون تنش-کنترل [۱۴]

در سال ۲۰۰۵، Xu Chen و Shucai Hui در مقاله‌ای به بررسی رفتار رچتینگ پلیمر PTFE تحت بارگذاری سیکلی فشاری پرداختند. آنها در این مقاله اثرات نرخ بارگذاری، تنش میانگین و دامنه‌ی تنش را بر روی رفتار رچتینگ PTFE مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش مشخص شد که این پلیمر ماده‌ای وابسته به نرخ بارگذاری است؛ اما اگر نرخ بارگذاری بیشتر از 40 N/s باشد، حساسیت این ماده به نرخ بارگذاری از بین خواهد رفت. مشاهده شد که کرنش رچتینگ با کاهش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد و وقتی که نرخ بارگذاری بزرگتر از 40 N/s باشد، اثر نرخ بارگذاری بر نرخ کرنش رچتینگ کوچک است. همچنین با انجام این مطالعه مشخص شد که در یک دامنه‌ی تنش یا تنش میانگین ثابت، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش تنش میانگین یا دامنه‌ی تنش افزایش می‌یابند [۱۵].

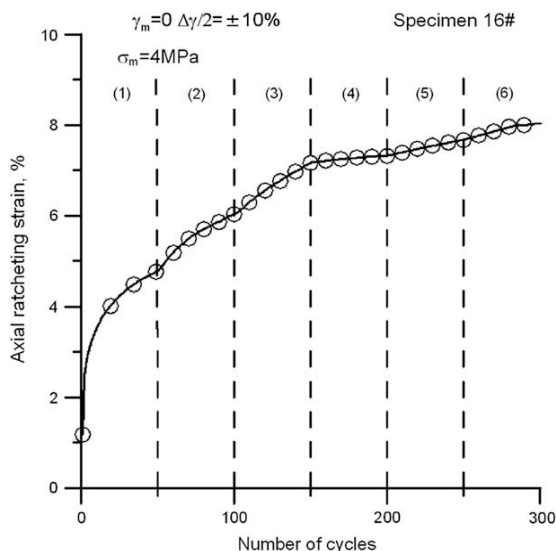
در شکل (۳-۲۱) کرنش رچتینگ PTFE تحت بارگذاری سیکلی تنش-کنترل فشاری نشان داده شده است. در این شکل سرعت بارگذاری متغیر است.



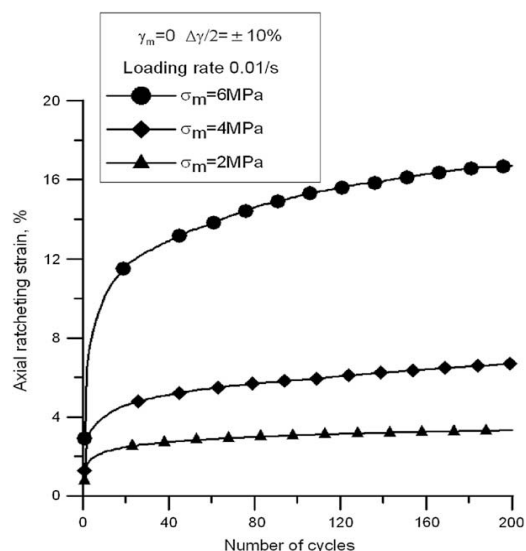
شکل ۳-۲۱- کرنش رچتینگ PTFE تحت بارگذاری سیکلی فشاری با نرخ‌های مختلف بارگذاری [۱۵]

Xu Chen و Zhe Zhang در سال ۲۰۰۸ اقدام به مطالعه‌ی رفتار رچتینگ چند محوره‌ی PTFE در دمای اتاق نمودند. در این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایش‌های رچتینگ چند محوره بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر پلی‌تترافلورئیداتیلن انجام گرفت. همه‌ی آزمایش‌ها با اعمال کرنش برشی سیکلی و با تنش محوری ثابت در دمای اتاق انجام شد. اثرات تنش محوری، حدود تغییرات کرنش برشی، نرخ کرنش برشی و تاریخچه‌ی آنها بر رفتار خستگی PTFE مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که کرنش رچتینگ وابسته است به تنش محوری ثابت، حدود تغییرات تنش برشی سیکلی و نرخ تنش برشی. به ازاء تنش محوری ثابت بزرگتر یا حدود تغییرات بزرگتر کرنش برشی یا نرخ کرنش برشی کوچکتر، کرنش رچتینگ بیشتر افزایش می‌یابد. به علاوه مشخص شد که تاریخچه‌ی بارگذاری نقش بسیار مهمی در کرنش رچتینگ دارد [۱۶].

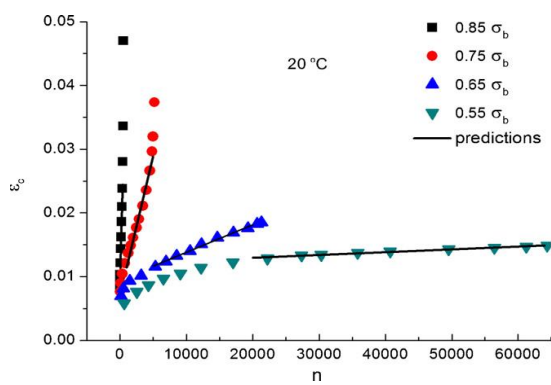
در شکل (۳-۲۲) کرنش رچتینگ محوری PTFE نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳-۲۳) کرنش رچتینگ محوری همراه با تاریخچه بارگذاری آورده شده است. با توجه به این شکل وابستگی کرنش رچتینگ به تاریخچه بارگذاری مشخص می‌شود.



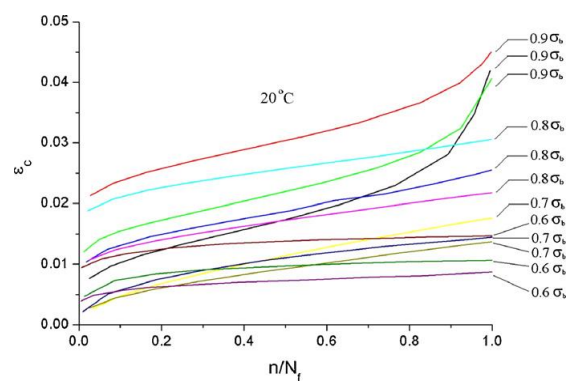
شکل ۳-۲۲- کرنش رچتینگ محوری PTFE همراه با تاریخچه بارگذاری [۱۶]



شکل ۳-۲۳- کرنش رچتینگ محوری PTFE تحت بارگذاری چند محوره [۱۶]



شکل ۳-۲۵- پیش بینی کرنش رچتینگ پایدار با



شکل ۳-۲۴- کرنش رچتینگ PMMA تحت بارگذاری

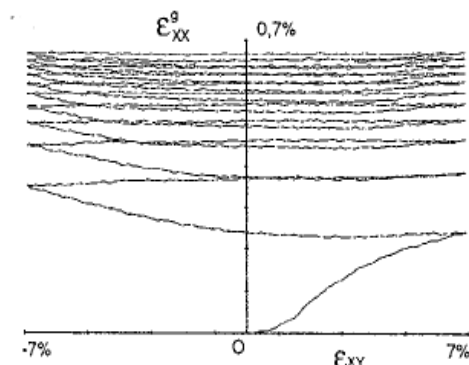
تنش-کنترل تک محوره [۱۷] استفاده از تئوری فرآیند فعال شده حرارتی [۱۷] در سال ۲۰۰۸، Wei Liu و همکارانش به بررسی کرنش‌های رج‌تینگ پلی متیل متاآکریلیت (PMMA) در دماهای متفاوت و سطوح مختلف تنش پرداختند. از آنجایی که کرنش رج‌تینگ پایدار ناحیه‌ای است که با نرخ ثابت رشد می‌کند و قسمت اعظمی از عمر خستگی را به خود اختصاص می‌دهد، در این مقاله توجه ویژه‌ای به آن شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که نرخ رشد ناحیه‌ی رج‌تینگ پایدار با دما و بار اعمالی تغییر می‌کند. در این مقاله تئوری فرآیند فعال شده حرارتی^۱ برای پلیمرهای شیشه‌ای به منظور توضیح تغییر شکل‌های پلاستیک در طول بارگذاری سیکلی استفاده شده است. بر اساس ارتباط بین کرنش رج‌تینگ هر سیکل و انرژی حلقه‌ی هیستریزیس آن، یک مدل جدید انباشتگی کرنش رج‌تینگ برای مواد پلیمری توسعه داده شده است که به طور کمی قادر به تشریح اثرات دما، فرکانس بارگذاری، تنش میانگین و دامنه تنش بر روی نرخ انباشتگی کرنش رج‌تینگ در ناحیه‌ی پایدار می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار انباشتگی کرنش رج‌تینگ در ناحیه‌ی پایدار تحت شرایط دلخواه دمایی و بارگذاری می‌باشد [۱۷]. در شکل‌های (۳-۲۴) و (۳-۲۵) به ترتیب کرنش رج‌تینگ تک محوره PMMA و پیش‌بینی کرنش رج‌تینگ آن با استفاده از تئوری فرآیند فعال شده حرارتی نشان داده شده است.

G.Bles و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به مطالعه‌ی تجربی پلیمر PA66 تحت بارگذاری برشی سیکلی پرداختند. آنها این آزمایش‌ها را بدون اعمال بار عرضی و با اندازه‌گیری دما بر روی ورق‌هایی از جنس پلی‌آمید انجام دادند. این آزمایش‌ها با استفاده از گیره‌های ساده‌ای که به دستگاه آزمایش کشش ساده وصل شده بود انجام گرفت. هدف آنها از این آزمایش‌ها بررسی خواص ترمومکانیکی پلی

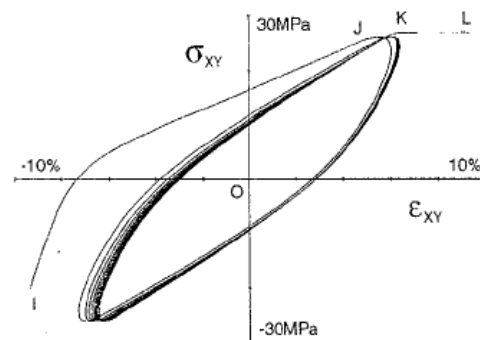
^۱ Thermally Activated Process

آمید در طول بارگذاری برشی سیکلی بود. آنها کمیت‌هایی همچون خصوصیات تنش، کرنش، مدول برشی و کرنش رجتینگ را مورد مطالعه قرار دادند [۱۸].

در شکل‌های (۳-۲۶) و (۳-۲۷) به ترتیب حلقه‌های هیستریزیس و افزایش کرنش محوری پلی آمید تحت بارگذاری کرنش برشی سیکلی نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۷- افزایش کرنش محوری پلی آمید در اثر بارگذاری کرنش برشی سیکلی [۱۸]

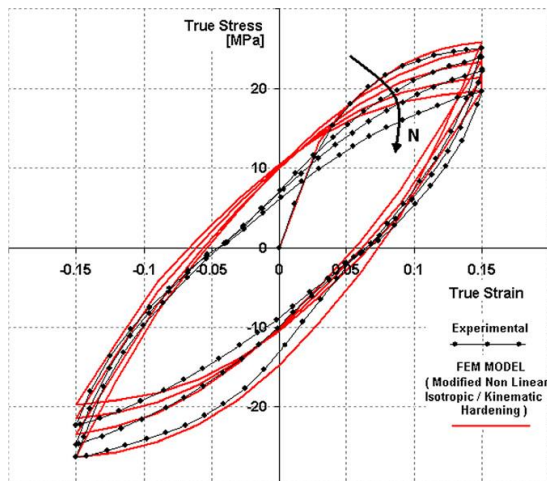


شکل ۳-۲۶- حلقه هیستریزیس تنش-کرنش پلی آمید تحت بارگذاری کرنش برشی سیکلی [۱۸]

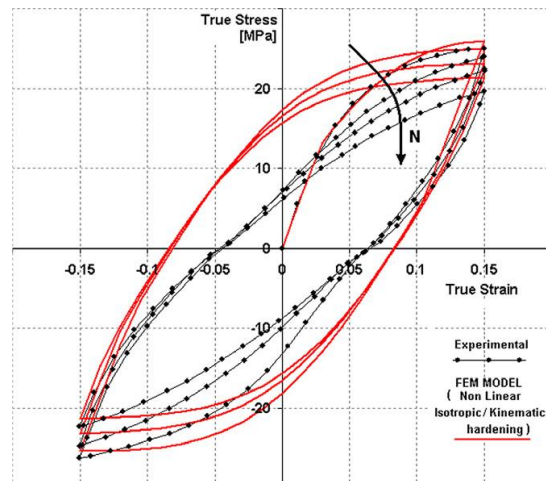
در سال ۲۰۰۷، Andrea Avanzini به مطالعه‌ی خصوصیات مکانیکی و مدل سازی اجزای محدود رفتار تنش-کرنش سیکلی پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق سنگین پرداخت. در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های کرنش-کنترل کاملاً متقارن با و بدون خنک کاری با استفاده از جت هوایی ثابت‌های ماده (استفاده شده در مدل‌های پیشرفته‌ی پلاستیسیته در نرم افزارهای تجاری نظیر ABAQUS به منظور تعیین رفتار سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک ماده) استخراج شده و در نرم افزار ABAQUS به منظور مدل سازی حلقه‌های هیستریزیس استفاده شد [۱۹].

در شکل‌های (۳-۲۸) و (۳-۲۹) به ترتیب مدل سازی حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش پلی اتیلن فوق سنگین با استفاده از مدل‌های سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک و مدل اصلاح شده نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با اینکه این نوع پلیمر رفتار کاملاً متقارنی در

کشش و فشار از خود نشان می‌دهد؛ مدل سازی حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آن به طور کامل بر داده‌های تجربی منطبق نمی‌شود.



شکل ۳-۲۹- مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل اصلاح شده سخت شونده‌گی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک در نرم افزار ABAQUS [۱۹]



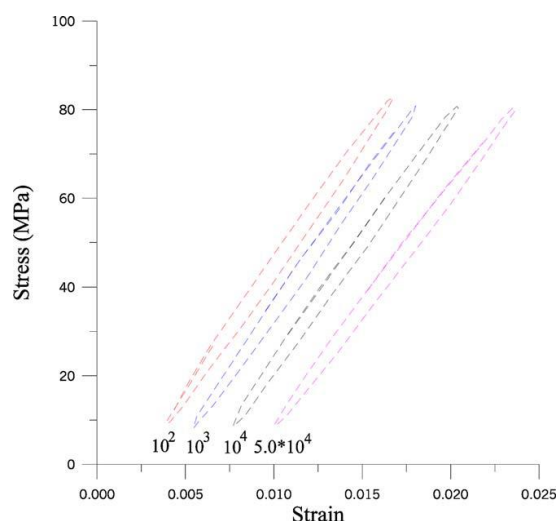
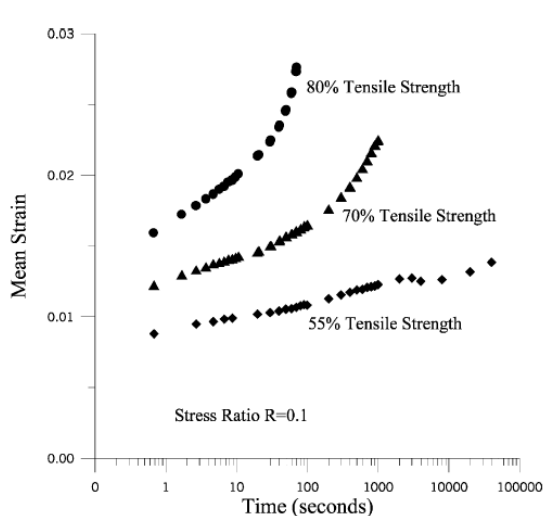
شکل ۳-۲۸- مدل سازی حلقه هیستریزیس با استفاده از مدل سخت شونده‌گی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک نرم افزار ABAQUS [۱۹]

A.Ramkumar و R.Gnanamoorthy در سال ۲۰۰۸ به مطالعه‌ی رفتار خستگی پلی آمید ۶ و نانوکامپوزیت پلی آمید ۶ در دمای اتاق پرداختند. هدف این مقاله مطالعه‌ی اثرات نانو ذرات اضافه شده بر افزایش دما و کاهش مدول در طول بارگذاری سیکلی بود. مشاهده شد که افزایش نانو ذرات باعث کاهش افت مدول و بالا رفتن دما می‌شود [۲۰].

در سال ۲۰۰۴، P.K.Mallick و Yuanxin Zhou به مطالعه‌ی اثر تنش میانگین بر خستگی تنش-کنترل بر پلی آمید ۶۶ تقویت شده با فیبرهای کوتاه E-glass پرداختند. آزمایش‌های خستگی انجام گرفته به گونه‌ای بوده است که نمونه فقط تحت کشش قرار داشته است و تنش میانگین با تغییر نسبت تنش مینیمم به ماکزیمم تغییر کرده است. در طول آزمایش برای این ماده پدیده رچتینگ مشاهده شده و یک معادله‌ی اصلاح شده گربر برای تشریح اثر تنش میانگین بر مقاومت خستگی این کامپوزیت استفاده شده است. در این پژوهش مشاهده شد که افزایش نسبت تنش منجر به کاهش

مقاومت خستگی می‌شود و همچنین در طول بارگذاری سیکلی کرنش میانگین (کرنش رچتینگ) نیز افزایش می‌یابد [۲۱].

در شکل‌های (۳-۳۰) و (۳-۳۱) به ترتیب حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش و کرنش رچتینگ پلی‌آمید تقویت شده با فیبرهای کوتاه E-glass آورده شده است.



شکل ۳-۳۰- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش پلی‌آمید تقویت شده [۲۱]

شکل ۳-۳۱- کرنش رچتینگ پلی‌آمید تقویت شده [۲۱]

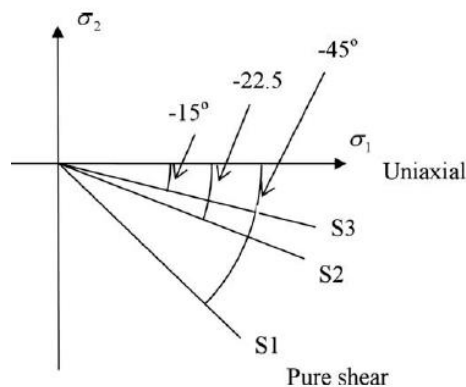
در سال ۲۰۰۸، Gang Tao و Zihui Xia طی آزمایش‌هایی به بررسی رفتار خستگی دو محوره‌ی نوعی اپوکسی پلیمر با اثر تنش میانگین پرداختند. این آزمایش‌ها تحت شرایط بارگذاری برشی سیکلی و برش محوری متناسب ترکیب شده با کرنش میانگین انجام شد. در این آزمایش‌ها کرنش‌های محوری و برشی به طور همزمان توسط سیستم اندازه‌گیری کرنش غیر تماسی بلادرنگ در طول آزمایش ثبت شده است. ویژگی‌های مکانیکی نظیر تنش، کرنش، انرژی کرنشی و غیره به طور

کمی مورد بررسی قرار گرفت. طی این آزمایش‌ها مشخص شد تحلیل‌های خستگی که بر اساس دیدگاه‌های تنش و انرژی کرنشی باشند مطابقت بهتری با داده‌های تجربی دارند [۲۲].

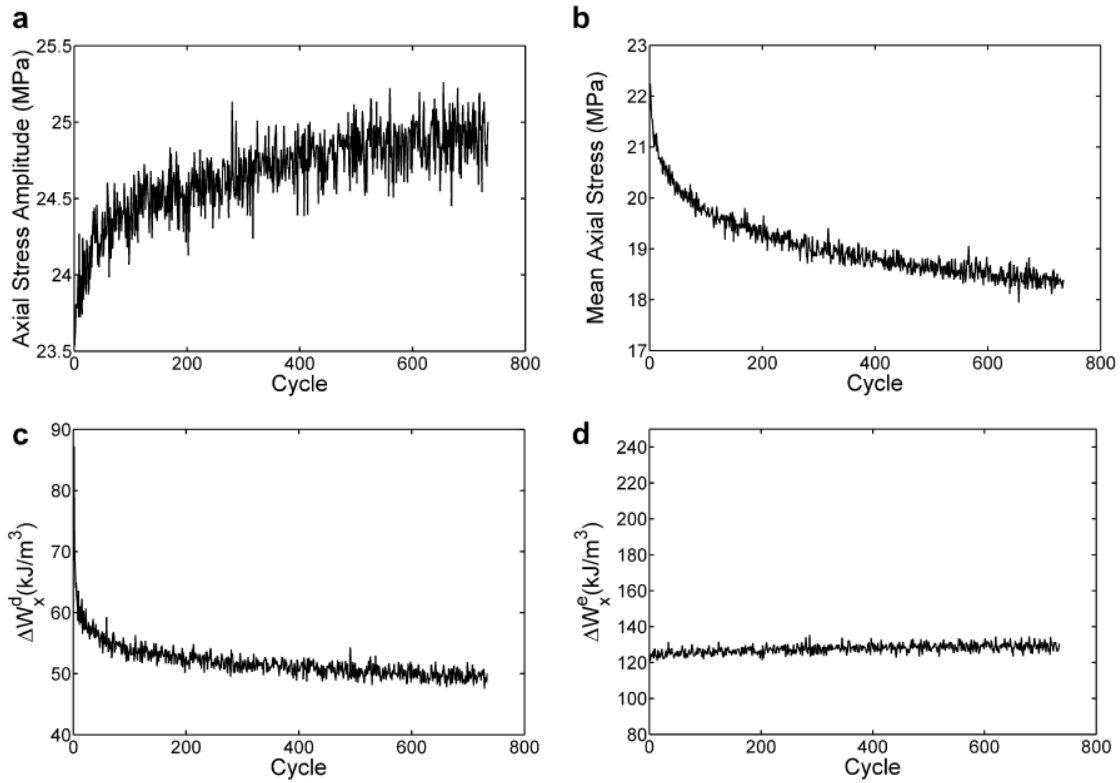
با توجه به جدول (۲-۳) و شکل (۳-۳) بارگذاری‌های انجام شده در مرجع [۲۲] مشخص شده است. همچنین در شکل (۳-۳) نتایج بارگذاری آزمون S3-2 آورده شده است.

جدول ۲-۳- بارگذاری‌های انجام شده در مرجع [۲۲]

No.	Axial						Shear						N (cycles)
	$\epsilon_{x,a}$ (%)	$\epsilon_{x,m}$ (%)	$\sigma_{x,a}$ (MPa)	$\sigma_{x,m}$ (MPa)	$\Delta W_{x,avg}^d$ (kJ/m ³)	$\Delta W_{x,avg}^c$ (kJ/m ³)	$\gamma_{xy,a}$ (%)	$\gamma_{xy,m}$ (%)	$\tau_{xy,a}$ (MPa)	$\tau_{xy,m}$ (MPa)	$\Delta W_{xy,avg}^d$ (kJ/m ³)	$\Delta W_{xy,avg}^c$ (kJ/m ³)	
S1-1	0	0	0	0	0	0	3.14	3.11	23.77	18.07	135.94	378.62	579
S1-2	0	0	0	0	0	0	3.02	2.99	22.94	17.82	121.38	353.60	803
S1-3	0	0	0	0	0	0	2.69	2.70	21.62	16.52	73.64	296.14	5850
S1-4	0	0	0	0	0	0	2.39	2.38	20.20	16.15	48.24	248.05	18,621
S1-5	0	0	0	0	0	0	2.20	2.20	19.46	15.27	47.53	216.77	17,371
S1-6	0	0	0	0	0	0	2.22	0.75	20.82	5.57	55.32	224.37	400,000
S2-1	1.04	1.09	20.81	14.26	73.85	99.26	3.10	3.10	22.17	15.71	204.98	329.93	331
S2-2	0.72	0.76	16.90	14.41	27.58	58.14	2.20	2.34	17.72	15.91	67.53	197.41	896
S2-3	0.51	0.55	13.13	11.89	13.07	30.79	1.50	1.69	13.34	13.11	24.94	100.46	3968
S2-4	0.48	0.48	12.87	9.67	7.71	30.58	1.59	1.43	14.43	10.59	23.41	115.42	22,782
S2-5	0.45	0.45	12.28	9.84	9.63	25.74	1.30	1.37	12.14	10.85	19.35	78.07	17,463
S3-1	1.26	1.26	26.60	19.75	92.83	166.06	2.72	2.51	19.06	13.94	138.00	259.36	129
S3-2	1.04	1.04	24.66	19.05	51.89	127.64	2.15	2.10	16.90	13.48	62.17	187.98	737
S3-3	0.78	0.79	20.30	16.71	25.52	78.62	1.61	1.61	13.83	11.82	26.99	114.49	1634
S3-4	0.65	0.65	17.80	13.85	11.80	58.77	1.43	1.28	12.85	9.82	16.94	93.28	9652
S3-5	0.55	0.55	15.25	12.32	8.00	42.47	1.17	1.05	11.01	8.75	11.46	63.90	16,320



شکل ۳-۳- شماتیک سه نوع بارگذاری انجام شده در مرجع [۲۲]



شکل ۳-۳- تغییرات کمیت‌های مکانیکی آزمایش S3-2 در جهت محوری (a) دامنه تنش (b) تنش میانگین (c) چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده (d) دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک [۲۲]

آزمایش‌های تجربی

در فصل‌های پیشین کاربردهای روزافزون مواد پلیمری و اهمیت مطالعه‌ی رفتار این گونه مواد به طور گسترده‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این فصل به بیان چگونگی انجام آزمایش‌های تجربی بر روی POM و نتایج حاصل شده می‌پردازیم.

۴-۱- آماده سازی نمونه‌های آزمایش

همانطور که گفته شد، ماده‌ی پلیمری که در این پژوهش از آن استفاده شده است؛ پلی استال یا پلی اکسی متیلن^۱ (POM) است که در بازار با نام تجاری دلرین^۲ نیز شناخته شده است.

تست‌های خستگی تک محوره و یا به طور کلی تست‌های سیکلی که بر روی مواد پلیمری انجام می‌شود، اغلب با استفاده از نمونه‌هایی که بر اساس استاندارد ASTM D638 و یا استاندارد معادل آن یعنی ISO527 می‌باشند، انجام می‌گیرد [۲۳ و ۲۴ و ۲۵].

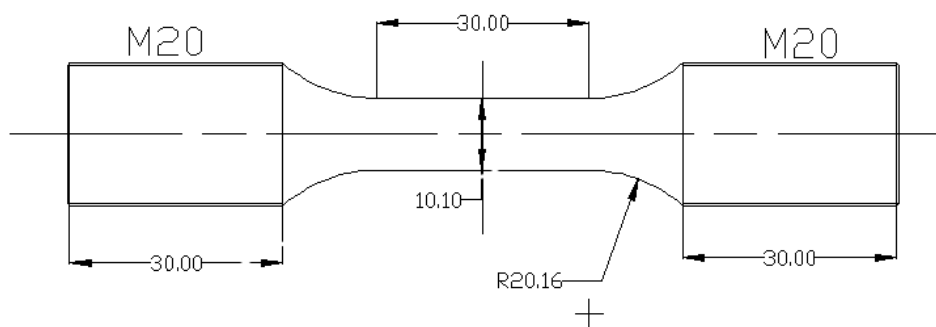
از آنجایی که قطر نمونه‌ها در این حالت در مقایسه با طول آنها کوچک به شمار می‌آید، اعمال بار فشاری بدون خطر کمانش (هر چند که بار فشاری اعمال شده کوچک باشد) ممکن نیست. به هر حال آزمایش‌های سیکلی بر روی مواد پلیمری در حالتی که هم بار فشاری و هم بار کششی اعمال شود، با هیچ نمونه‌ی استاندارد خاصی پوشش داده نشده است. برای این نوع بارگذاری‌ها نمونه‌های متفاوتی را در مقالات مختلف می‌توان پیدا نمود که هر یک هندسه‌ی خاص خود را دارد.

برای تهیه‌ی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از میلگردهای پلی استال با قطر 20mm استفاده شده است. این میلگردها با استفاده از دستگاه تراش CNC به منظور به دست آوردن نمونه‌های آزمایش یکسان تراش داده شده‌اند. همان طور که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود؛ طول

^۱ Polyoxymethylene

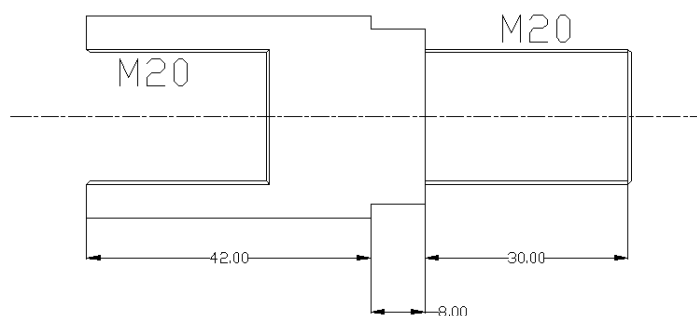
^۲ Delrin

سنج نمونه‌ها (gage length) برابر 25mm و قطر آن برابر 10.1mm می‌باشد. به علت نرم بودن مواد آزمایش نسبت به فشاری که گیره‌های دستگاه آزمایش برای نگه داشتن آن اعمال می‌کند، لهیدگی دوسر نمونه‌ها حتمی است. به همین دلیل برای اجتناب از لهیدگی دو سر نمونه‌ها که درون گیره‌های دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد دوسر نمونه‌ها به صورت پیچ M20 تراش داده شده است.



شکل ۴-۱- شماتیک نمونه

از آنجا که دو سر نمونه‌ها به صورت پیچ طراحی شده‌اند، برای اتصال نمونه‌ها به فک‌های دستگاه آزمایش اقدام به طراحی فیکسچرهای گردید که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- شماتیک فیکسچرها

شکل (۴-۳) نمونه و نحوه‌ی اتصال فیکسچر به نمونه و فک‌های دستگاه آزمایش را نشان

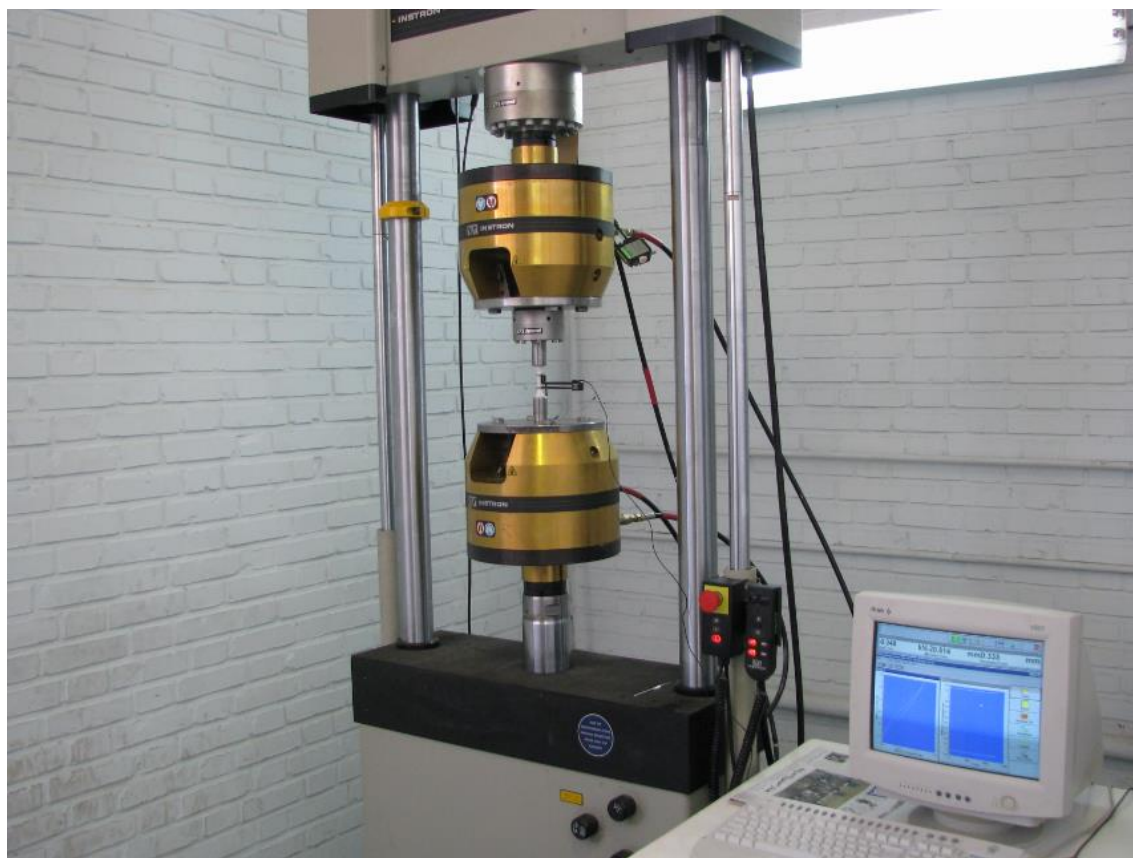
می‌دهد.



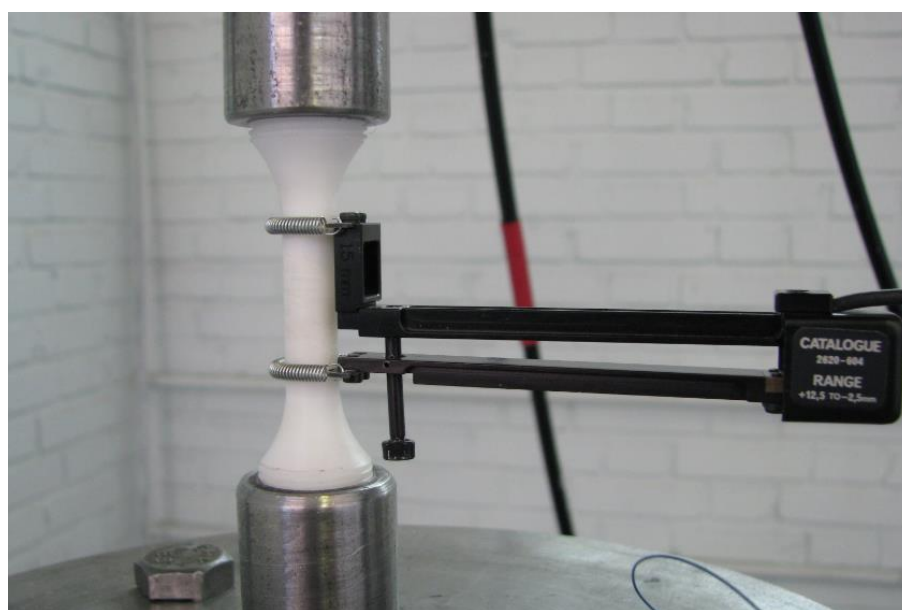
شکل ۴-۳- تصویر نمونه و فیکسچر

۴-۲- دستگاه آزمایش

همه‌ی آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802 انجام شده است (شکل ۴-۴). این دستگاه به صورت دینامیکی توانایی اعمال بار تا مقدار $250kN$ را دارد. به دلیل اینکه حداکثر نیروهای اعمالی در این آزمایش‌ها همگی مقداری کمتر از $10kN$ را دارند، و برای داشتن دقت بیشتر در اندازه‌گیری نیروها از نیروسنج دیگر دستگاه که ظرفیتی معادل $25kN$ را دارد، استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری کرنش در طول آزمایش‌ها از اکستنسومتر، دستگاه INSTRON با طول سنج $25mm$ استفاده شده است (شکل ۴-۵).



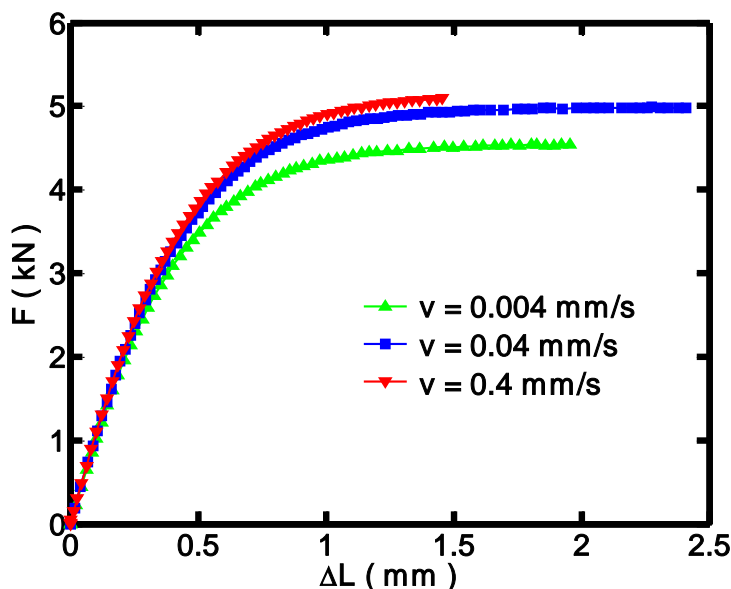
شکل ۴-۴- دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802



شکل ۴-۵- تصویر اکستنسومتر

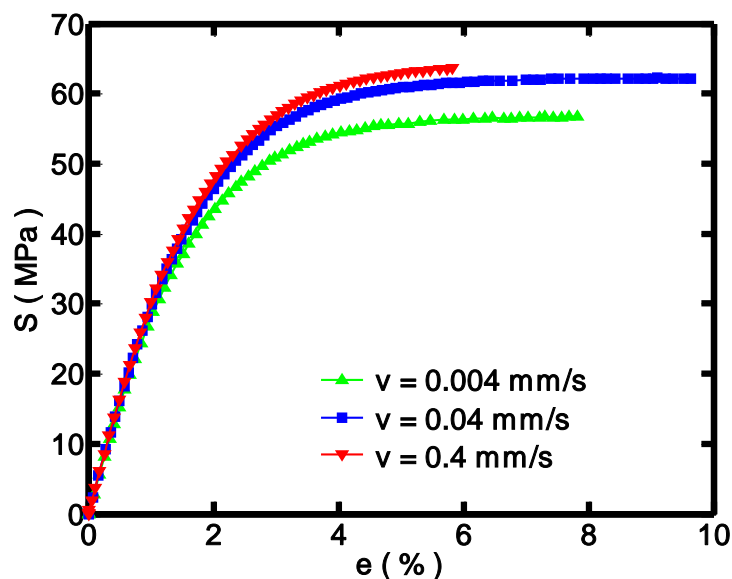
۳-۴- تعیین خواص مکانیکی POM

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش کشش ساده می‌پردازیم. این آزمایش به منظور به دست آوردن مدول یانگ و تنش تسلیم ماده‌ی مورد آزمایش انجام می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۴-۶) دیده می‌شود، آزمایش کشش ساده بر روی پلی استال با سه سرعت متفاوت 0.4 mm/s ، 0.04 mm/s و 0.004 mm/s به صورت جابجایی کنترل انجام شده است.

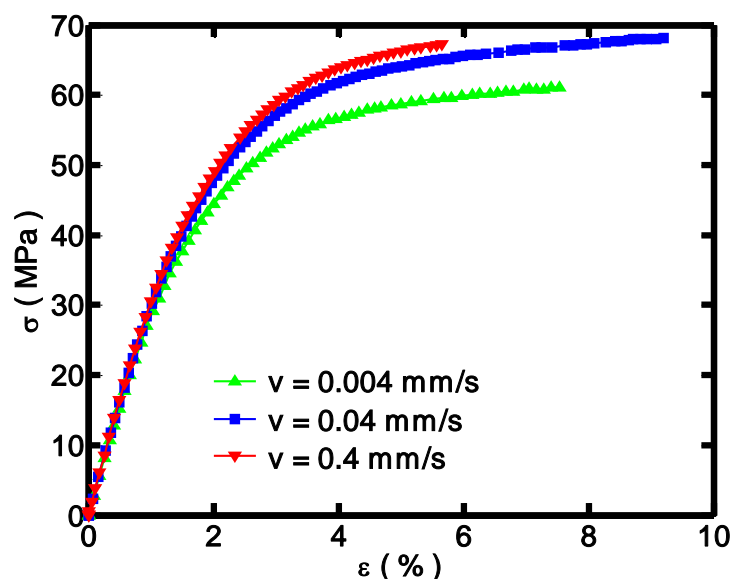


شکل ۴-۶- منحنی نیرو جابجایی نمونه‌ی پلی استال

این اعداد نشان دهنده‌ی سرعت حرکت فک دستگاه در طول انجام آزمایش می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) دیده می‌شود، هرچه سرعت انجام آزمایش بیشتر باشد، پلی استال استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد. بدین معنی که برای رسیدن به یک کرنش مشخص در ناحیه‌ی پلاستیک، با افزایش سرعت بارگذاری، تنش بیشتری می‌بایست اعمال شود. این امر را می‌توان ناشی از خواص ویسکوپلاستیک پلی استال و به طور کلی پلیمرها دانست.



شکل ۴-۷- منحنی تنش- کرنش اسمی پلی استال تحت کشش یکنواخت



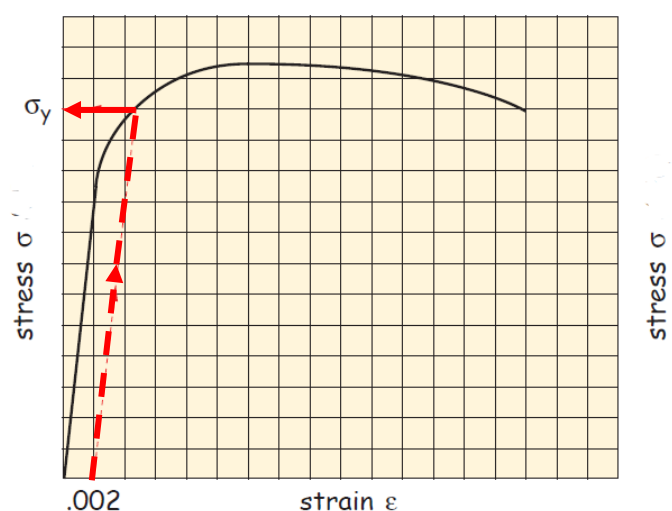
شکل ۴-۸- منحنی تنش- کرنش حقیقی پلی استال تحت کشش یکنواخت

۴-۳-۱- محاسبه‌ی مدول یانگ و تنش تسلیم

همان طور که می‌دانیم برای محاسبه مدول یانگ یک ماده با استفاده از منحنی تنش-کرنش می‌بایست شیب قسمت خطی منحنی را محاسبه نمود که عدد به دست آمده همان مدول یانگ ماده تحت آزمایش می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۸) مشاهده می‌شود که سرعت انجام آزمایش تاثیری بر

شیب قسمت خطی منحنی نداشته و مدول یانگ را می‌توان با استفاده از هر یک از سه منحنی شکل (۴-۸) محاسبه نمود. این کار را با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.6 انجام گردید و مدول یانگ برای پلی استال مقدار $3100MPa$ به دست آمد.

برای محاسبه‌ی تنش تسلیم از روش ترسیمی خط 0.2% استفاده شد. شکل (۴-۹) بیانگر روش استفاده از این قانون برای به دست آوردن تنش تسلیم می‌باشد.



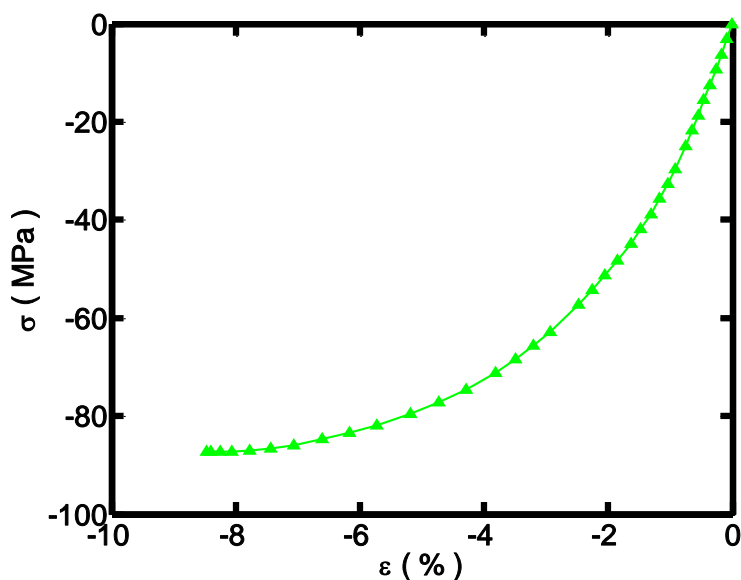
شکل ۴-۹- روش ترسیمی خط 0.2% برای محاسبه‌ی تنش تسلیم

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود به منظور به دست آوردن تنش تسلیم، می‌بایست از نقطه‌ای با مقدار کرنش $\epsilon = 0.002$ و یا $\epsilon = 0.2\%$ خطی با شیبی معادل مدول یانگ ماده که همان شیب قسمت خطی منحنی می‌باشد، ترسیم نمود. نقطه‌ی تقاطع خط رسم شده با منحنی تنش-کرنش نشان دهنده‌ی مقدار تنش تسلیم ماده می‌باشد.

با استفاده از این قانون مقدار تنش تسلیم پلی استال مورد استفاده در این مطالعه، $39.9MPa$ به دست آمد.

۴-۴- آزمایش فشار

برای به دست آوردن خواص پلی استال وقتی که تحت تنش‌های فشاری قرار می‌گیرد، آزمایش فشار ساده انجام شد. در شکل (۴-۱۰) منحنی تنش-کرنش فشاری پلی استال را می‌توان مشاهده کرد. مدول یانگ و تنش تسلیم در حالت فشار نیز همانند حالت کشش محاسبه شده است.



شکل ۴-۱۰- منحنی تنش-کرنش حقیقی پلی استال در حالت فشاری

خواص مکانیکی پلی استال را می‌توان در جدول (۴-۱) مشاهده نمود.

جدول ۴-۱- خواص مکانیکی پلی استال در کشش و فشار

خواص مکانیکی	کشش	فشار
مدول یانگ (E)	3100MPa	3400MPa
تنش تسلیم (σ_y)	39.9MPa	-39.78MPa
کرنش تسلیم (ϵ_y)	1.49%	-1.37%

با توجه به جدول (۴-۱) معلوم می‌شود که این ماده در کشش و فشار، رفتار یکسانی از خود

نشان نمی‌دهد.

۴-۵- آزمایش‌های تنش-کنترل

همه‌ی آزمایش‌هایی که در این قسمت انجام شده است تحت شرایط تنش-کنترل و در دمای محیط آزمایشگاه انجام شده‌اند. سرعت انجام همه آزمایش‌ها به گونه‌ای بوده است که در خلال انجام آزمایش تغییر محسوسی در دمای نمونه‌ها ایجاد نشود. برای ایجاد چنین شرایطی سرعت بارگذاری نباید بیشتر از 10 MPa/s باشد [۱۴]. بنابراین سرعت بارگذاری همه آزمایش‌ها برابر 10 MPa/s بوده است.

در جدول (۴-۲) دامنه‌ی تنش و تنش میانگین اعمال شده در هر آزمایش آورده شده است.

جدول ۴-۲- خلاصه آزمایش‌های تنش-کنترل

Tests	σ_m (MPa)	σ_a (MPa)	frequency(Hz)	N_f (Cycles)
T1	0.00	60.63	0.421	46
T2	0.00	53.87	0.474	158
T3	0.00	47.11	0.542	566
T4	0.00	40.35	0.632	3312
T5	33.59	30.21	0.842	32
T6	33.59	26.83	0.948	306
T7	33.59	23.45	1.083	1556
T8	33.59	20.07	1.264	26678
T9	30.21	33.59	0.758	64
T10	30.21	30.21	0.842	204
T11	30.21	26.83	0.948	302
T12	30.21	23.45	1.083	3008
T13	30.21	20.07	1.264	180930
T14	26.83	30.21	0.842	238
T15	26.83	26.83	0.948	796
T16	26.83	25.14	1.018	3264
T17	26.83	23.45	1.083	80096
T18	23.45	31.21	0.842	596
T19	23.45	26.83	0.948	76488
T20	28.52	23.45	1.083	12458

جدول ۴-۲- خلاصه آزمایش‌های تنش-کنترل (ادامه)

T21	35.62	20.07	1.264	9944
T22	40.35	20.07	1.264	1962
T23	-16.69	43.73	0.583	448
T24	-16.69	40.35	0.632	1154
T25	-16.69	36.97	0.689	36784

در جدول (۳-۴) مقادیر میانگین کمیت‌های مکانیکی نظیر کرنش میانگین، دامنه کرنش، چگالی انرژی کرنش اتلاف شده و چگالی دامنه انرژی کرنش الاستیک آورده شده است. برای محاسبه این کمیت‌ها مقدار هر کمیت در همه‌ی سیکل‌ها با هم جمع و بر تعداد سیکل تقسیم شده است. از این اعداد در فصل ششم استفاده خواهد شد.

به منظور تحقیق درباره‌ی اثر مقادیر مختلف تنش‌های میانگین و دامنه‌های تنش متفاوت، آزمایش‌هایی که در این قسمت انجام شده است را می‌توان به نه گروه GT1 تا GT9 تقسیم نمود. در هر یک از این گروه‌ها پارامتر تنش میانگین یا دامنه‌ی تنش ثابت است، حال آنکه پارامتر دامنه‌ی تنش یا تنش میانگین متغیر است. به این ترتیب به راحتی می‌توان تاثیرات بارگذاری را در هر آزمایش مشاهده نمود. این گروه بندی در جدول (۴-۴) آورده شده است.

در طول انجام هر آزمایش، داده‌های تغییر طول و نیروی سیکل‌های زوج ثبت شده است. علت اینکه فقط اطلاعات سیکل‌های زوج ثبت شده است، کاهش حجم داده‌های تولید شده و در نتیجه سرعت بیشتر انجام محاسبات و تحلیل‌های انجام شده بوده است. با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.6 و این داده‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های هر آزمایش محاسبه شده و بر اساس تنش و کرنش‌های حاصل، تحلیل کمی پارامترهای مکانیکی نظیر کرنش رجتینگ، حدود تغییرات کرنش، چگالی انرژی کرنش و شیب حلقه‌های هیستریزیس انجام گرفته است.

در ادامه به بحث و بررسی هریک از این پارامترهای مکانیکی خواهیم پرداخت.

جدول ۴-۳- مقادیر میانگین برخی کمیت‌های مکانیکی آزمایش‌های تنش-کنترل

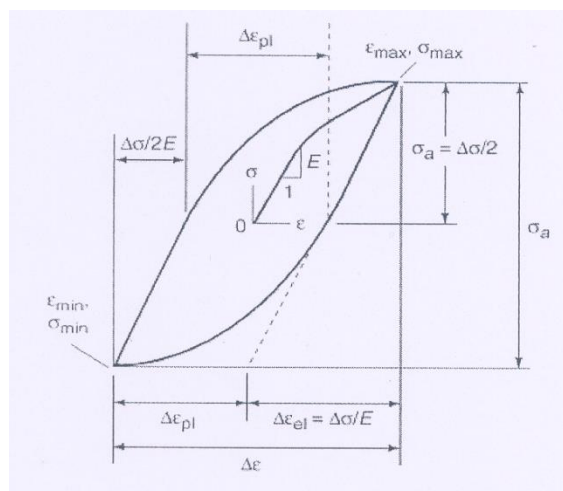
Tests	ε_m^{avg} (%)	ε_a^{avg} (%)	ΔW_{avg}^d (kJ/m ³)	ΔW_{avg}^e (kJ/m ³)
T1	1.21	3.51	790.4	978.4
T2	0.47	3.09	545.5	748.1
T3	0.37	2.50	300.8	550.1
T4	0.14	1.98	149.4	364.6
T5	3.14	2.08	357.3	236.7
T6	3.94	1.81	195.3	193.7
T7	4.84	1.53	111.2	148.2
T8	5.48	1.09	42.8	100.1
T9	3.20	2.44	554.5	319.8
T10	3.31	2.11	284.6	239.0
T11	3.55	1.89	198.7	199.3
T12	4.68	1.57	106.7	156.7
T13	5.39	1.04	27.8	80.9
T14	2.74	2.03	249.7	235.3
T15	2.76	1.69	149.8	191.1
T16	3.81	1.65	121.7	163.9
T17	3.90	1.16	46.8	123.1
T18	2.36	1.88	195.1	228.7
T19	2.83	1.07	37.8	116.0
T20	4.28	1.43	82.2	151.5
T21	6.79	1.23	57.9	114.5
T22	6.64	1.19	67.2	107.7
T23	-1.41	2.55	354.5	436.7
T24	-1.30	2.22	249.8	354.8
T25	-2.13	2.06	195.8	315.0

جدول ۴-۴- گروه بندی آزمایش‌های تنش-کنترل

شماره گروه	تنش میانگین	دامنه تنش	شماره آزمایش‌های
GT1	ثابت	متغیر	T1, T2, T3, T4
GT2	ثابت	متغیر	T5, T6, T7, T8
GT3	ثابت	متغیر	T9, T10, T11, T12, T13
GT4	ثابت	متغیر	T14, T15, T16, T17
GT5	ثابت	متغیر	T23, T24, T25
GT6	متغیر	ثابت	T5, T10, T14, T18
GT7	متغیر	ثابت	T6, T11, T15, T19
GT8	متغیر	ثابت	T7, T12, T20, T17
GT9	متغیر	ثابت	T22, T21, T8, T13

۴-۵-۱- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش

اطلاعات پایه‌ای رفتار سیکلی یک ماده را می‌توان در شکل حلقه هیستریزیس تنش-کرنش سیکلی آن ماده جستجو کرد. تغییر شکل سیکلی، باعث به دست آمدن یک حلقه هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد. نمونه‌ای از یک حلقه هیستریزیس در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱- شماتیک حلقه‌ی هیستریزیس تنش-کرنش سیکلی بدست آمده در تست خستگی کم چرخه [۲۶]

همانطور که در این شکل مشخص شده است، برخی از کمیت‌های مهم همانند کرنش‌های الاستیک و پلاستیک سیکلی را می‌توان به طور مستقیم از روی این حلقه محاسبه کرد.

مطابق با شکل (۴-۱۱) برای شرایط تنش-کنترل و کاملاً معکوس با تنش میانگین برابر با صفر، ارتفاع کل حلقه هیستریزیس برابر با محدوده‌ی تنش اعمال شده ($\Delta\sigma$) است، بطوری که:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a \quad (۴-۱)$$

که در آن σ_a دامنه‌ی تنش اعمال شده می‌باشد.

همچنین پهنای کل حلقه هیستریزیس برابر با محدوده‌ی کرنش تحمل شده است، بطوری که:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min} = 2\varepsilon_a \quad (۴-۲)$$

که در آن ε_a دامنه‌ی کرنش تحمل شده می‌باشد.

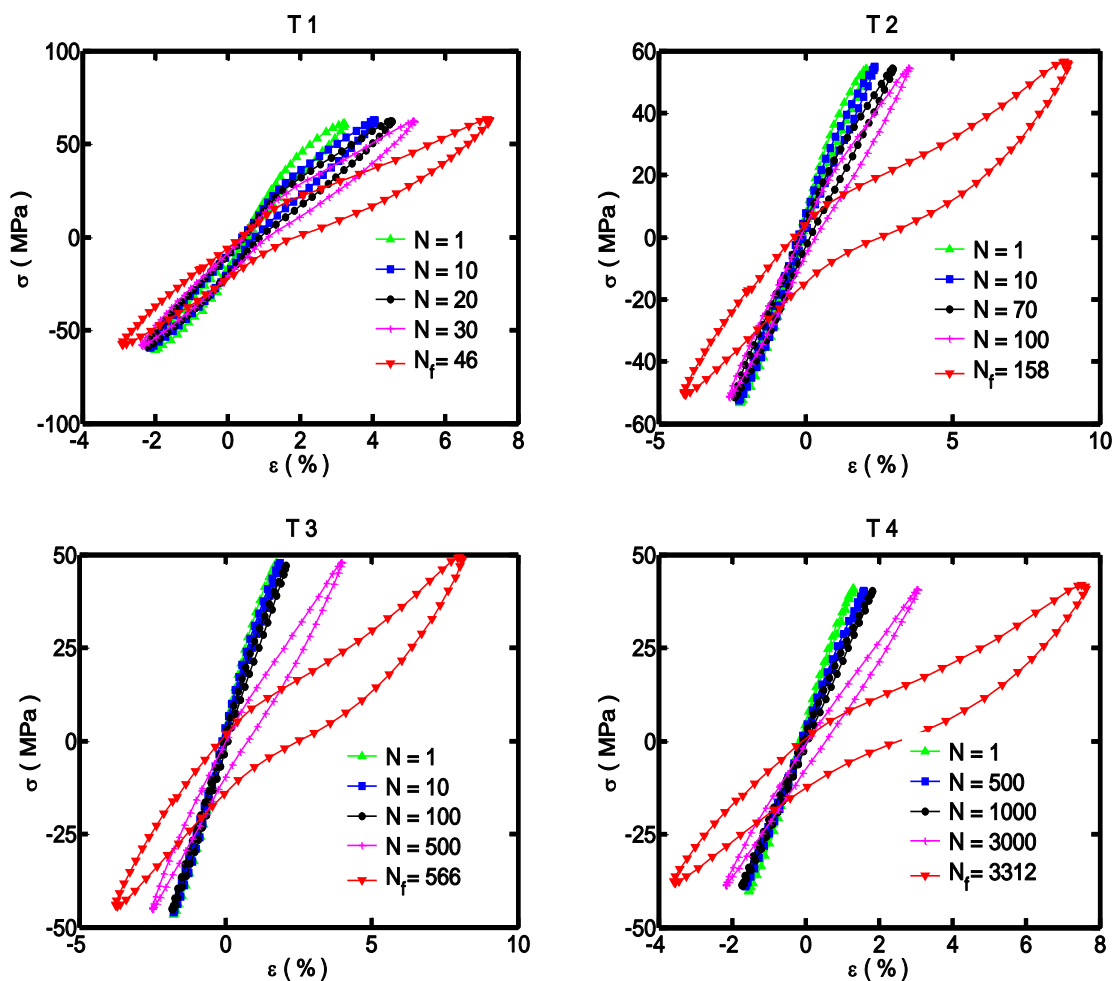
لازم به ذکر است که حلقه هیستریزیس می‌تواند نشان دهنده فرآیندهای تغییر شکل میکروسکوپی رخ دهنده در طول یک سیکل بارگذاری نیز باشد. در واقع، حلقه هیستریزیس نه تنها به ماده، بلکه به فرکانس و همچنین شرایط اعمال بار (تنش یا کرنش-کنترل بودن) نیز بستگی دارد [۲۶ و ۲۷].

در اینجا بیان این نکته ضروری است که دستگاه سروهیدرولیکی که در این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، قادر به کنترل و اندازه‌گیری دو کمیت نیرو و جابجایی می‌باشد. بنابراین برای محاسبه تنش و کرنش می‌بایست از روابط زیر استفاده نمود:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad , \quad e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (۴-۳)$$

$$\sigma = S(1+e) \quad , \quad \varepsilon = \ln(1+e) \quad (4-4)$$

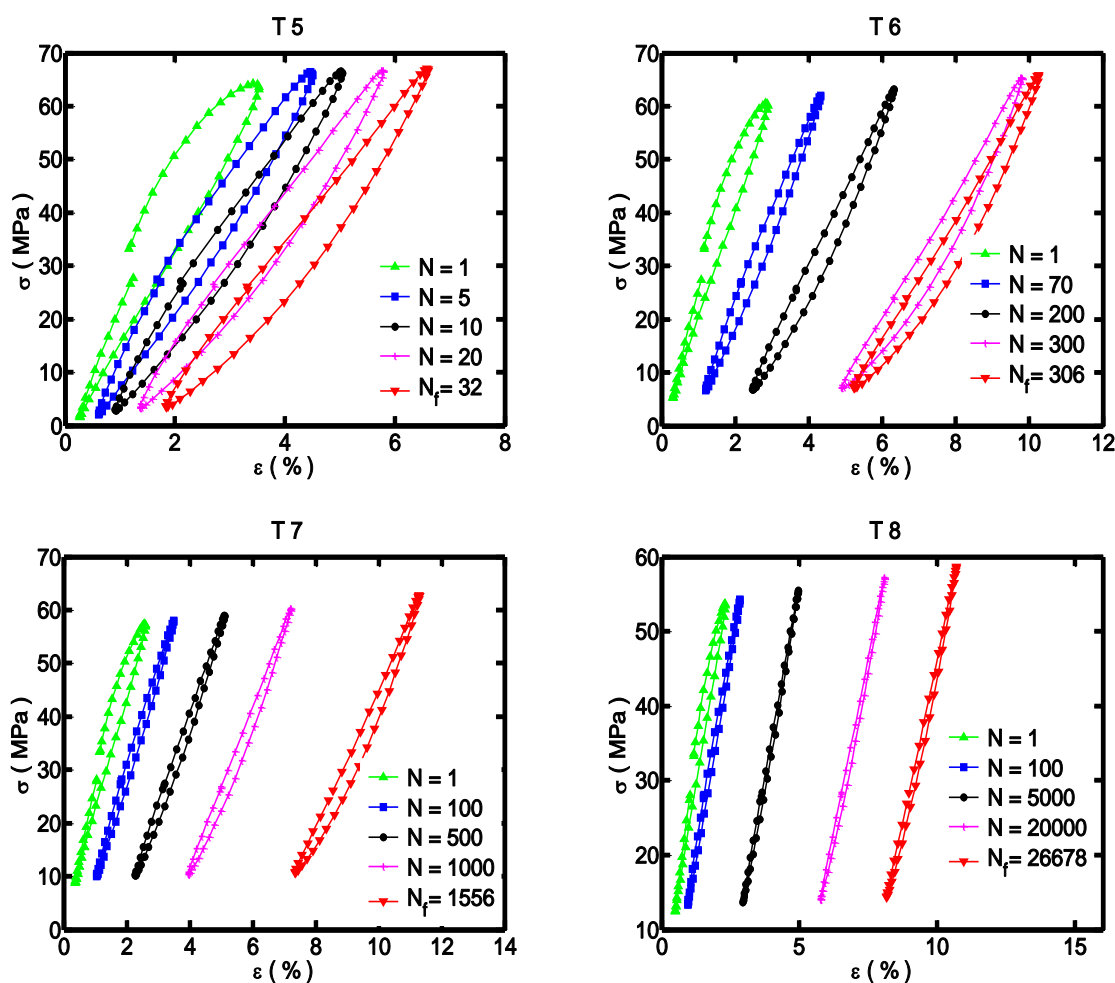
کلیه محاسبات انجام شده در این مطالعه بر مبنای نمودار تنش-کرنش حقیقی می‌باشد. بر این اساس حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش همه‌ی آزمایش‌های تنش-کنترل در زیر آورده شده است.



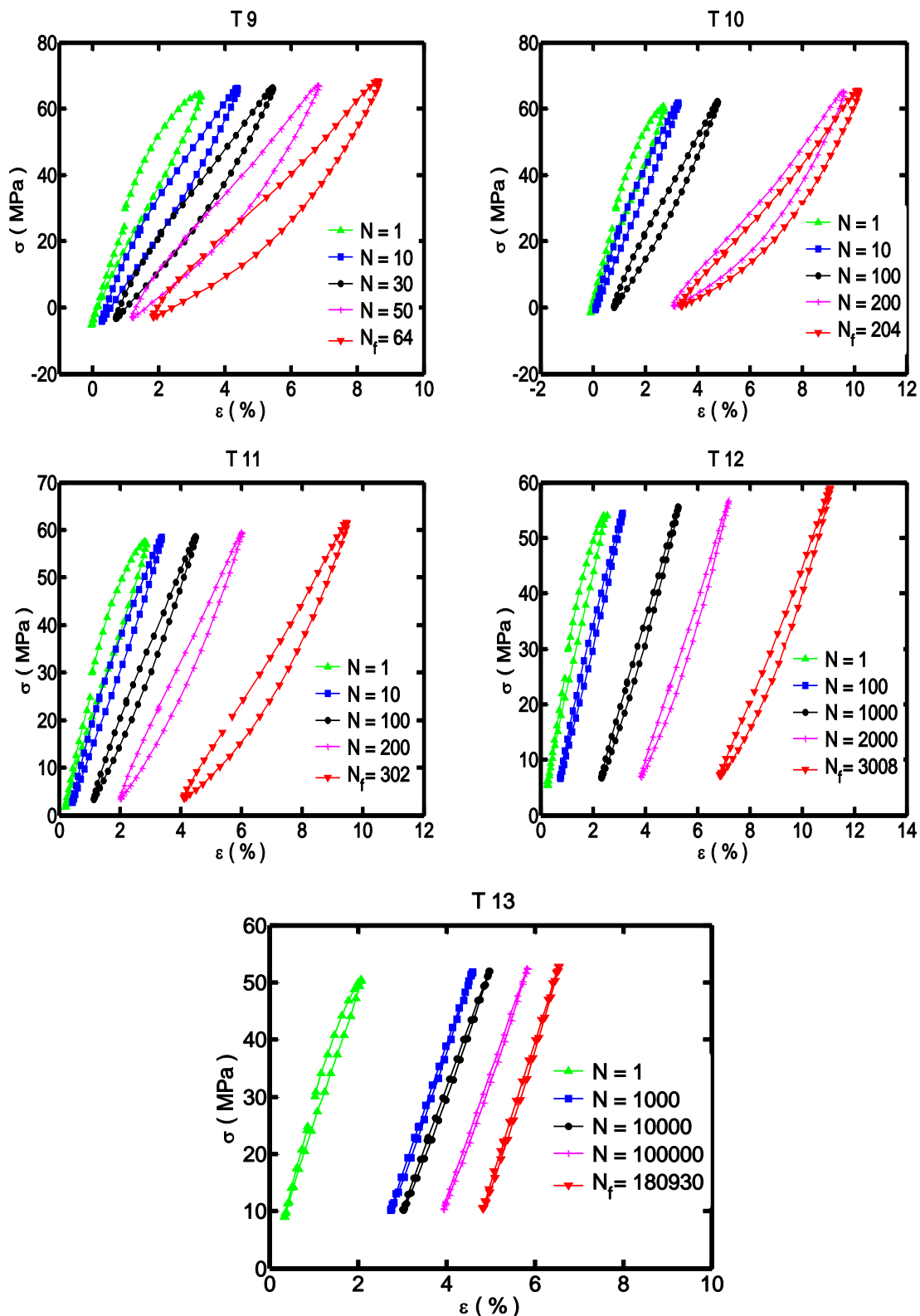
شکل ۴-۱۲- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT1

شکل (۴-۱۲) نشان دهنده‌ی حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT1 می‌باشد. برای این گروه آزمایش‌ها، تنش میانگین برابر صفر می‌باشد. همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد و در شکل (۴-۱۲) قابل مشاهده است، رفتار این ماده در کشش و فشار یکسان نمی‌باشد. از آنجا که در گروه آزمایش‌های GT1 تنش فشاری قابل ملاحظه‌ای وجود دارد؛ شکل این حلقه‌ها با حلقه‌های سایر گروه‌ها متفاوت است.

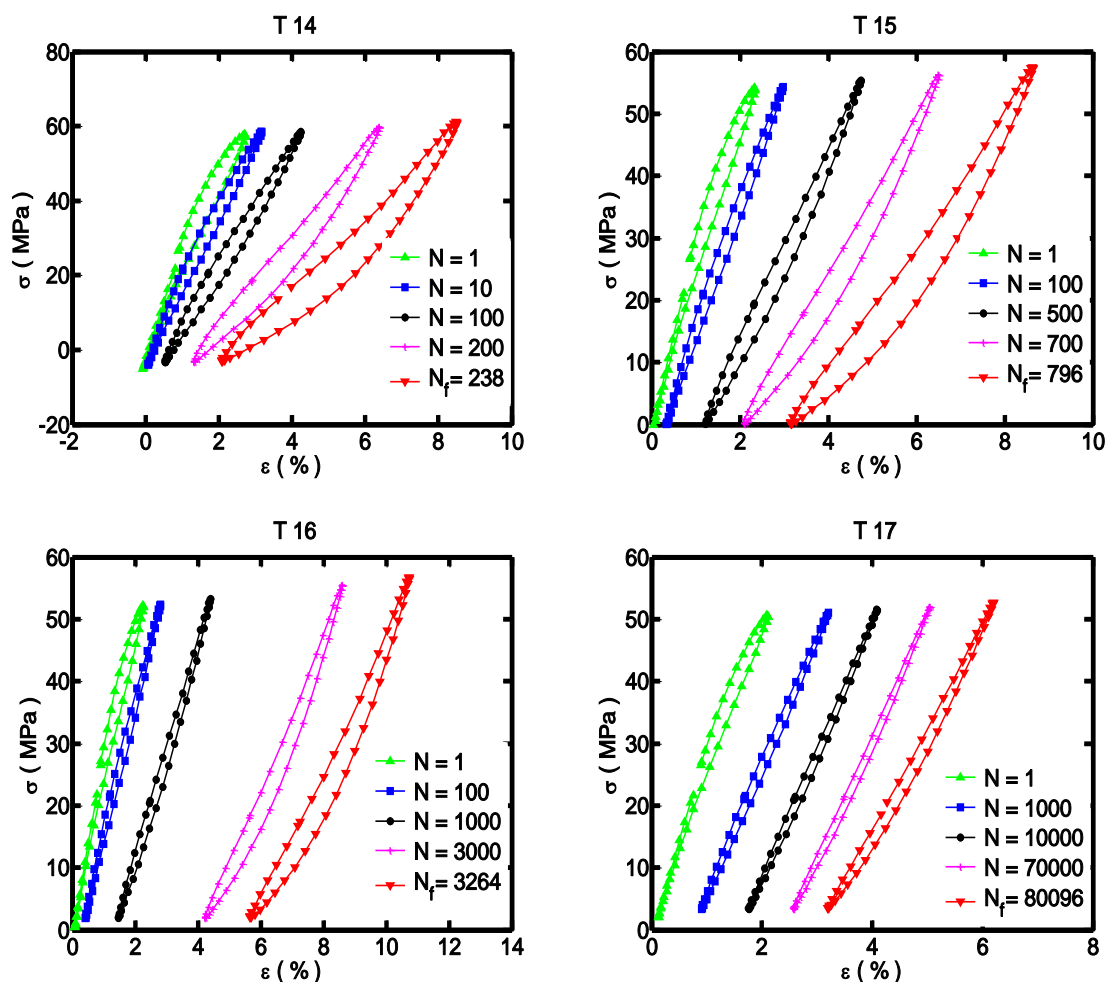
مشاهده می‌شود که با کاهش دامنه‌ی تنش در آزمایش‌های T1 تا T4، چاقی حلقه‌ها کم می‌شود. این پدیده در گروه‌های GT2 تا GT5 نیز مشاهده می‌شود. به طور کلی برای این پنج گروه آزمایش، همان طور که در شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۶) می‌توان مشاهده کرد، می‌توان این طور بیان کرد که با افزایش دامنه‌ی تنش و ثابت ماندن تنش میانگین، حلقه‌ها چاق تر می‌شوند.



شکل ۴-۱۳- حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT2

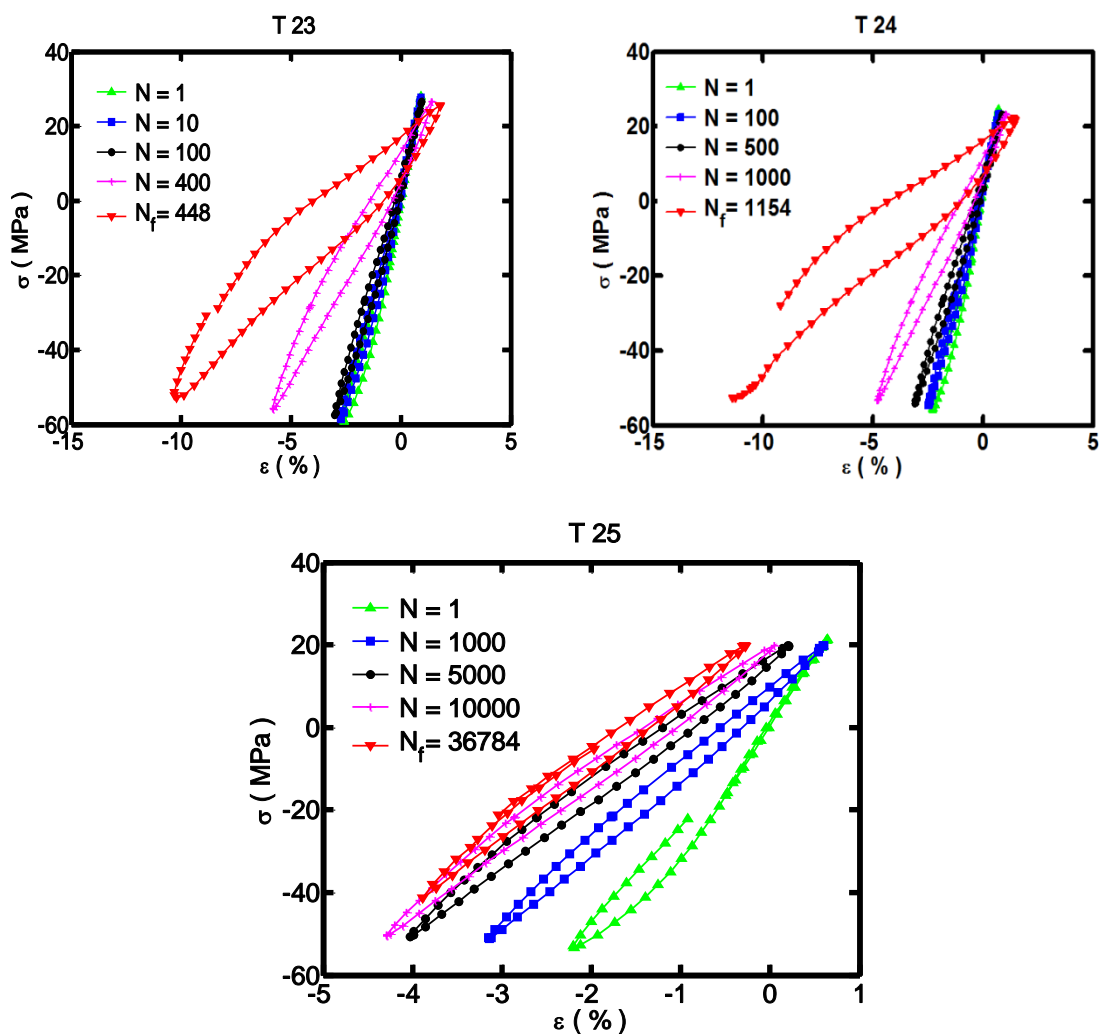


شکل ۴-۱۴- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT3



شکل ۴-۱۵- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT4

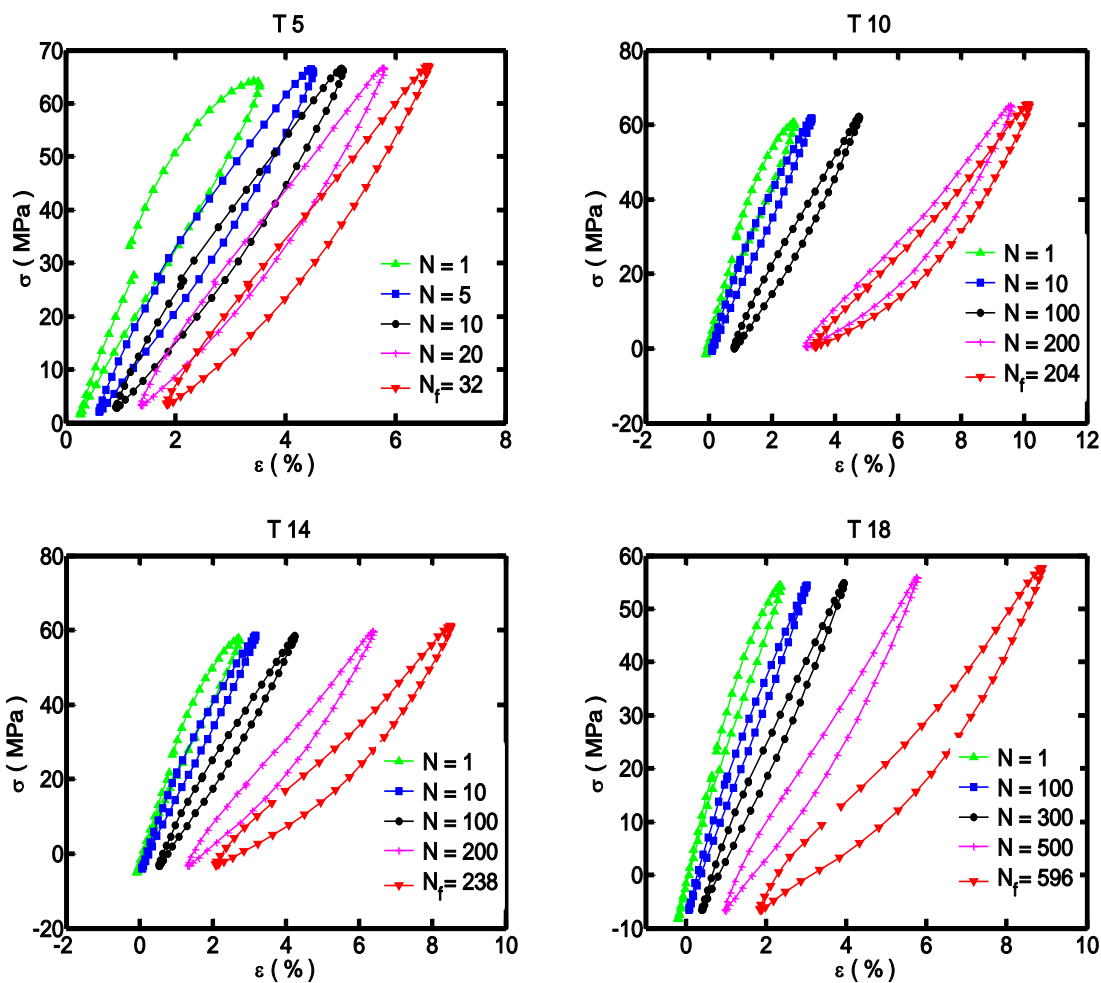
با توجه به شکل (۴-۱۶) مشخص می‌شود که شکل حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GT5 با سایر گروه‌ها تفاوت دارد؛ چرا که در این گروه آزمایش تنش میانگین اعمالی منفی است و از آنجا که رفتار پلی استال در کشش و فشار با یکدیگر متفاوت است، باعث این اختلاف شده است.



شکل ۴-۱۶- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT5

در شکل (۴-۱۷) حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش گروه آزمایش GT6 ترسیم شده است. در این گروه آزمایش بر خلاف آزمایش‌های گروه GT1 تا GT5 که در آنها تنش میانگین ثابت و دامنه تنش در حال تغییر است، دامنه تنش ثابت و تنش میانگین در حال تغییر است.

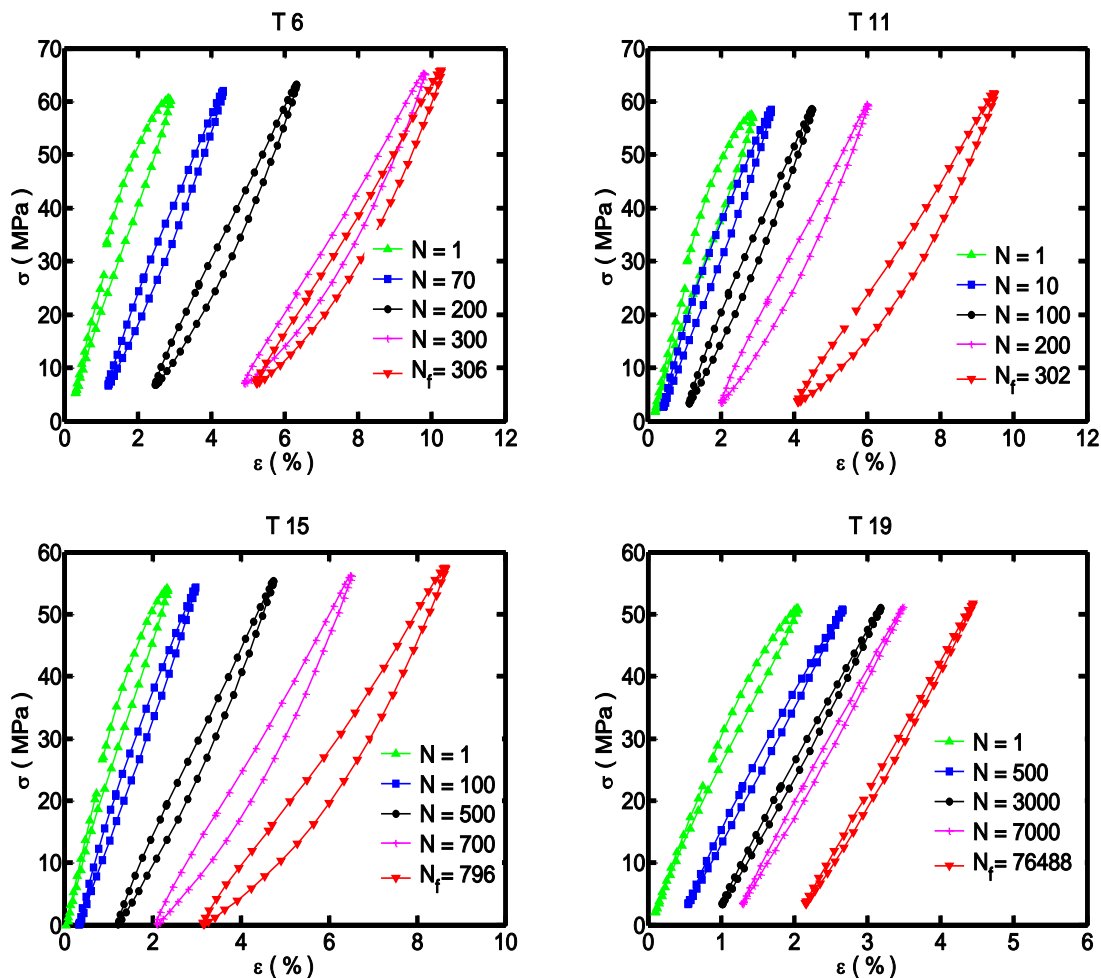
مشاهده می‌شود که با کاهش تنش میانگین اعمالی، عمر نمونه افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۷- حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT6

در شکل (۴-۱۸) حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش گروه آزمایش GT7 نشان داده‌اند. در این گروه آزمایش نیز همانند گروه آزمایش GT6 دامنه تنش ثابت و تنش میانگین به ترتیب از آزمایش T6 تا T19 در حال کاهش است.

با مقایسه نمودارهای T6، T11، T15 و T19 در شکل (۴-۱۸) مشخص می‌شود که با کاهش تنش میانگین اعمالی، مقدار حداکثر کرنش‌ها نیز کاهش می‌یابد.

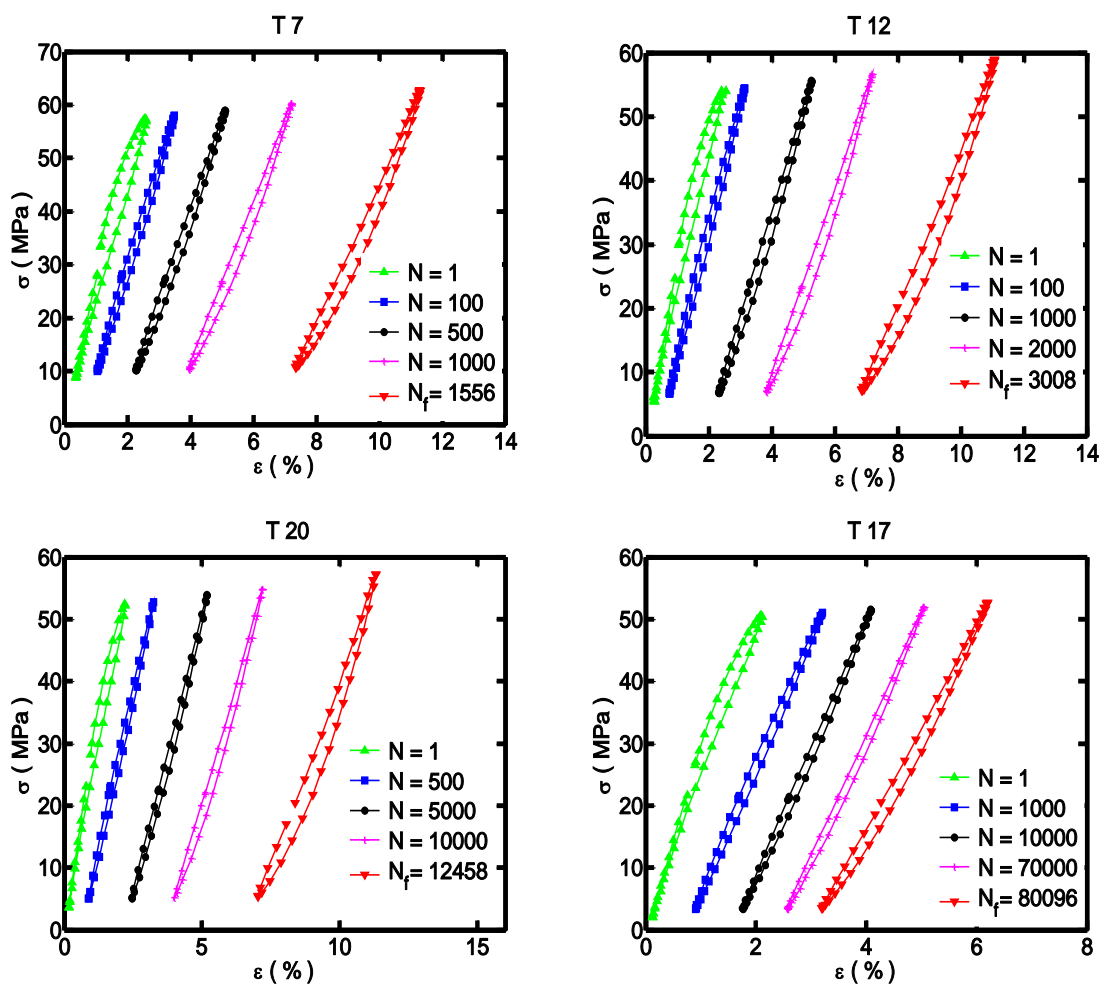


شکل ۴-۱۸- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT7

شکل (۴-۱۹) نشان دهنده‌ی حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GT8 است. در این گروه نیز دامنه

تنش ثابت و تنش میانگین متغیر است.

مشاهده می‌شود که با کاهش تنش میانگین از چاقی حلقه‌ها کاسته می‌شود.

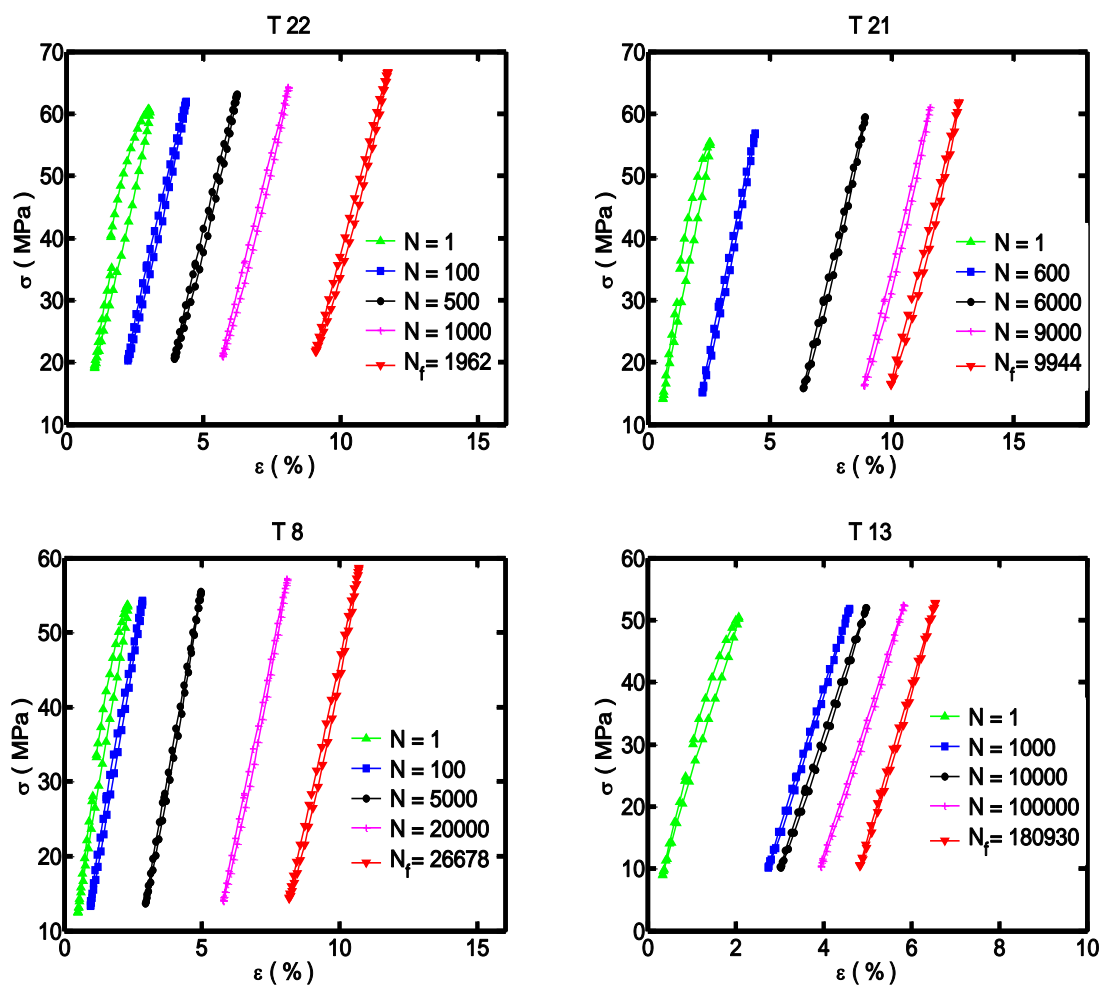


شکل ۴-۱۹- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT8

شکل (۴-۲۰) نشان نیز نشان دهنده‌ی حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش گروه آزمایش GT9 است.

در این گروه آزمایش نیز که در آن دامنه تنش ثابت و تنش میانگین متغیر است، با کاهش تنش

میانگین اعمالی از چاقی حلقه‌ها کاسته می‌شود.



شکل ۴-۲۰- حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT9

۴-۵-۲- کرنش رچتینگ

رچتینگ^۱ نوعی رفتار تغییر شکل سیکلی مواد و سازه‌هایی است که تحت تنش‌های سیکلی با تنش میانگین غیر صفر قرار می‌گیرند. این تنش‌ها می‌بایست بزرگتر از تنش تسلیم ماده باشند. به این معنا که ماده یا سازه‌ی تحت تنش باید وارد ناحیه‌ی پلاستیک شود. بعضی از محققین از رچتینگ به

^۱ Ratcheting

عنوان خزش سیکلی^۱ نیز یاد می‌کنند. رچتینگ اهمیت ویژه‌ای در امنیت و پیش‌بینی عمر سازه‌های مهندسی دارد. در طول دو دهه‌ی گذشته پدیده‌ی رچتینگ به طور گسترده‌ای چه به صورت تجربی و چه به صورت تحلیلی مورد مطالعه واقع شده است.

از زمانی که بسیاری از سازه‌های مهندسی تحت بارگذاری‌های سیکلی تنش-کنترل با تنش میانگین غیر صفر، قرار گرفتند؛ پدیده‌ی رچتینگ اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا کرد و در پیش‌بینی عمر خستگی بسیاری از اجزای سازه‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفت. به عنوان مثال در اوایل دهه‌ی ۹۰ میلادی، رفتار رچتینگ لوله‌های تاسیسات هسته‌ای و اثرات زیان بخش آن بر سازه‌ی راکتورهای هسته‌ای وارد کدهای طراحی ITER ایالات متحده‌ی امریکا و ASME NB 32xx شد [۲۸].

به هر حال از آنجا که رچتینگ پیشرفت تدریجی تغییر شکل‌های پلاستیک و انباشتگی سیکل به سیکل آنهاست، شبیه سازی آن نه تنها کار ساده‌ای نیست، بلکه کار بسیار دشوار و پیچیده‌ای می‌باشد. علاوه بر این، شبیه سازی رچتینگ نمی‌تواند مستقیماً توسط مدل‌های بنیادی سیکلی که با پایه‌ی استفاده از نتایج تجربی آزمایش‌های سیکلی کرنش-کنترل بنا شده‌اند، انجام شود. بنابراین پدیده‌ی رچتینگ در دو دهه‌ی گذشته به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۸].

کرنش رچتینگ را به صورت کمی می‌توان به عنوان نمو پیک کرنش بعد از هر سیکل معرفی نمود (رابطه‌ی (۴-۵)).

$$\delta \varepsilon = \varepsilon_{n+1}^{peak} + \varepsilon_n^{peak} \quad (۵-۴)$$

و یا می‌توان آن را به عنوان کرنش میانگین هر سیکل تعریف کرد. رابطه‌ی (۴-۶) بیان ریاضی این تعریف می‌باشد و ما در این مطالعه از این رابطه برای تعریف کرنش رچتینگ استفاده خواهیم کرد.

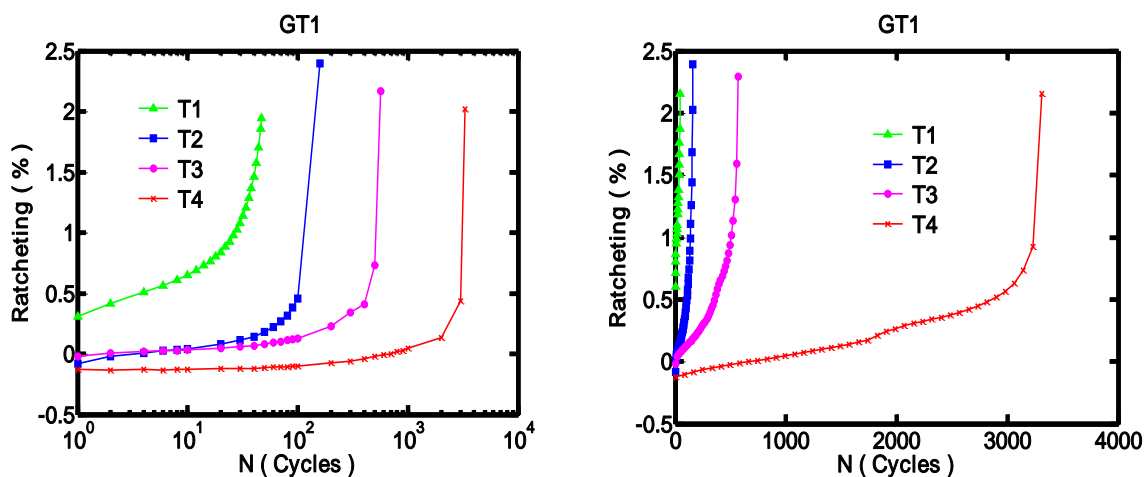
^۱ Cyclic Creep

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}) \quad (6-4)$$

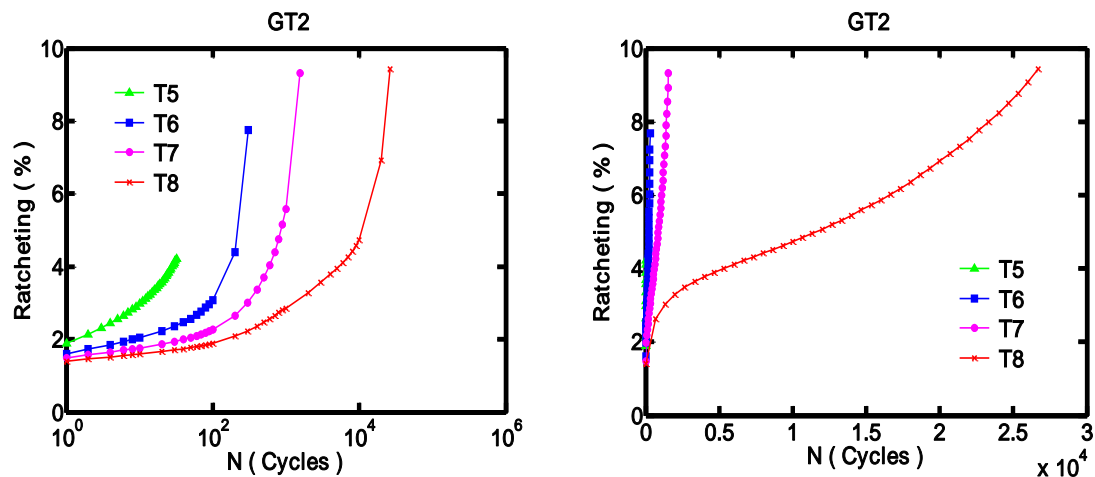
در دو رابطه‌ی بالا ε_n^{peak} و ε_{n+1}^{peak} به ترتیب کرنش‌های پیک در سیکل‌های n و $n+1$ می‌باشند و ε_{\min} و ε_{\max} مقادیر ماکزیمم و مینیمم کرنش‌ها در هر سیکل می‌باشند [۲۸].

در ادامه به بیان نتایج رچتینگ به دست آمده از آزمایش‌های تجربی می‌پردازیم.

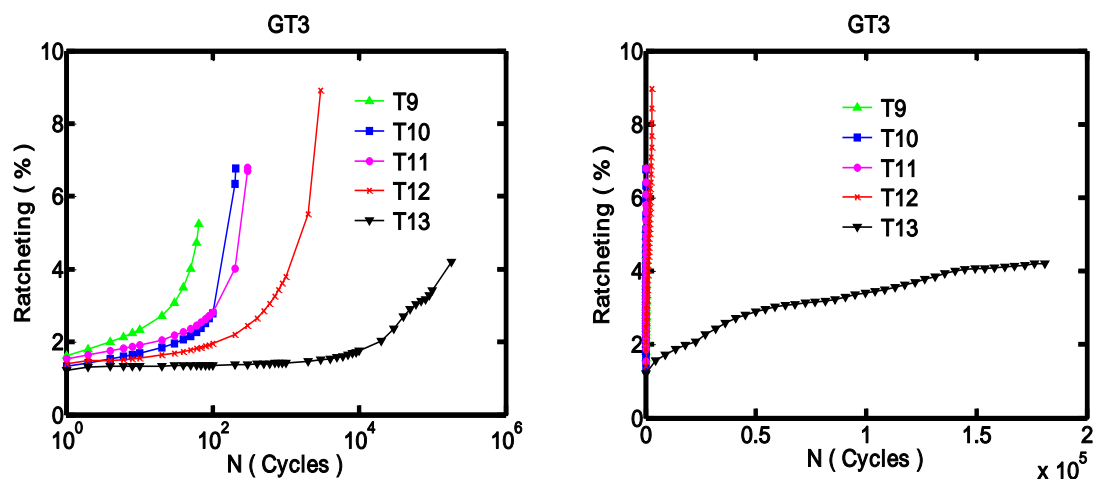
در همه‌ی شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۹) نمودار سمت راست در مقیاس خطی بیان کننده‌ی کرنش رچتینگ، نمودار سمت چپ در مقیاس لگاریتمی می‌باشد. بدیهی است که نرخ واقعی کرنش رچتینگ در نمودار نیمه لگاریتمی قابل مشاهده نمی‌باشد و برای به دست آوردن نرخ کرنش رچتینگ می‌بایست از نمودار سمت راست که در مقیاس خطی ترسیم شده است، استفاده نمود.



شکل ۴-۲۱- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

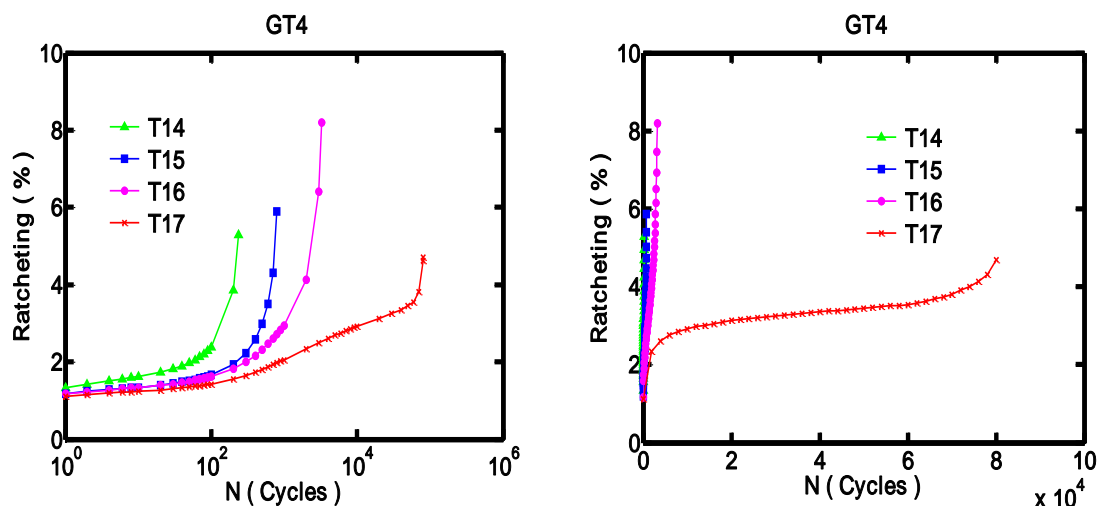


شکل ۴-۲۲- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

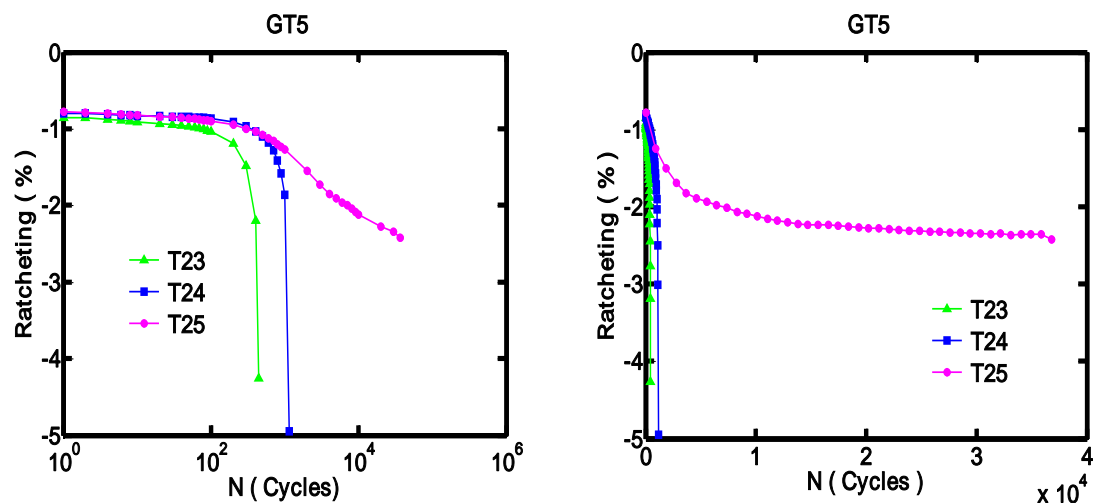


شکل ۴-۲۳- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

با توجه به شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۵) که نشان دهنده‌ی آزمایش‌هایی با تنش میانگین ثابت و دامنه‌ی تنش متغیر می‌باشند، مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی تنش اعمالی، مقدار و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد. نکته‌ی دیگری که با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت این است که شکل نمودار کرنش رچتینگ شبیه به نمودار خزش است و دارای همان سه مرحله‌ی نمودار خزش زمان است. از این روست که به پدیده‌ی رچتینگ خزش سیکلی نیز گفته می‌شود.



شکل ۴-۲۴- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

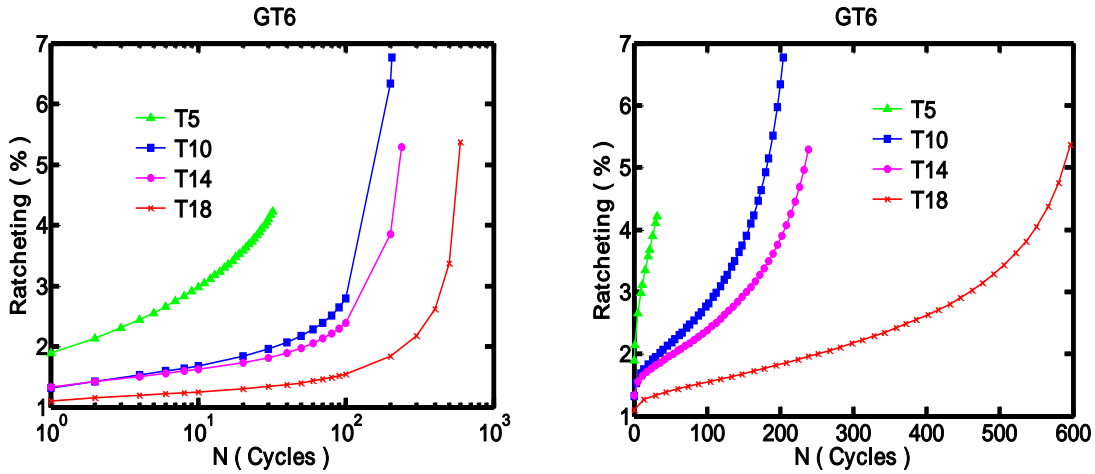


شکل ۴-۲۵- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT5 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

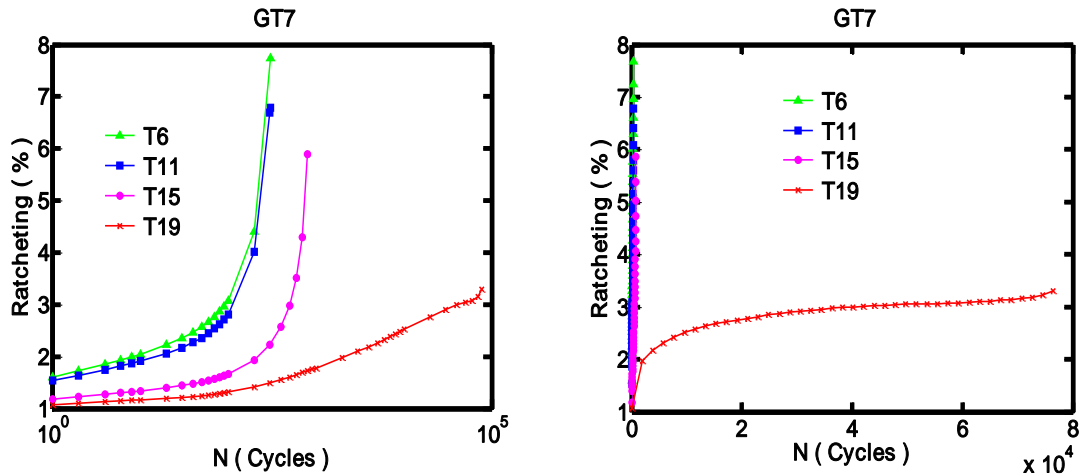
شکل‌های (۴-۲۶) تا (۴-۲۹) نشان دهنده‌ی آزمایش‌هایی می‌باشند که در آنها دامنه‌ی تنش

ثابت و تنش میانگین متغیر است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی تنش اعمالی،

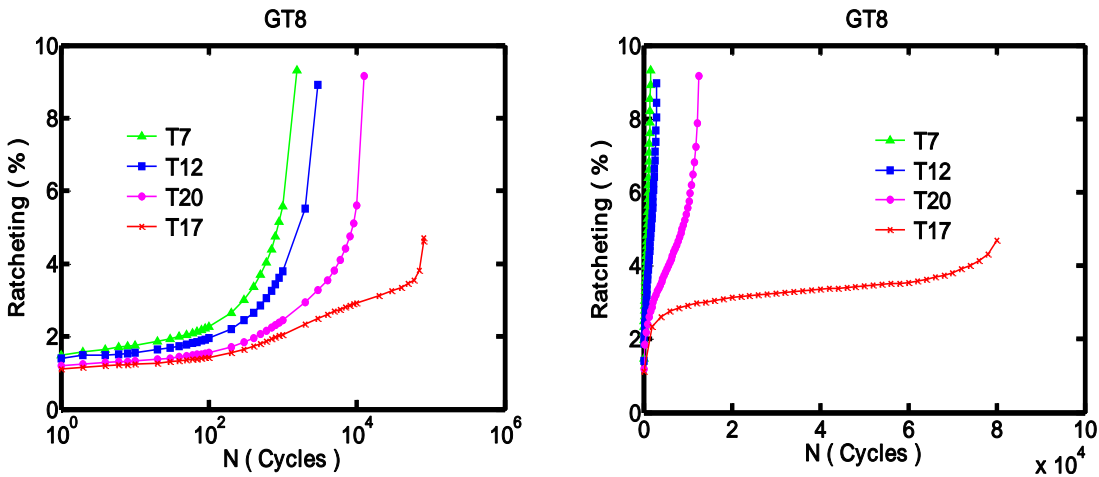
کرنش رچتینگ و نرخ آن افزایش می‌یابد.



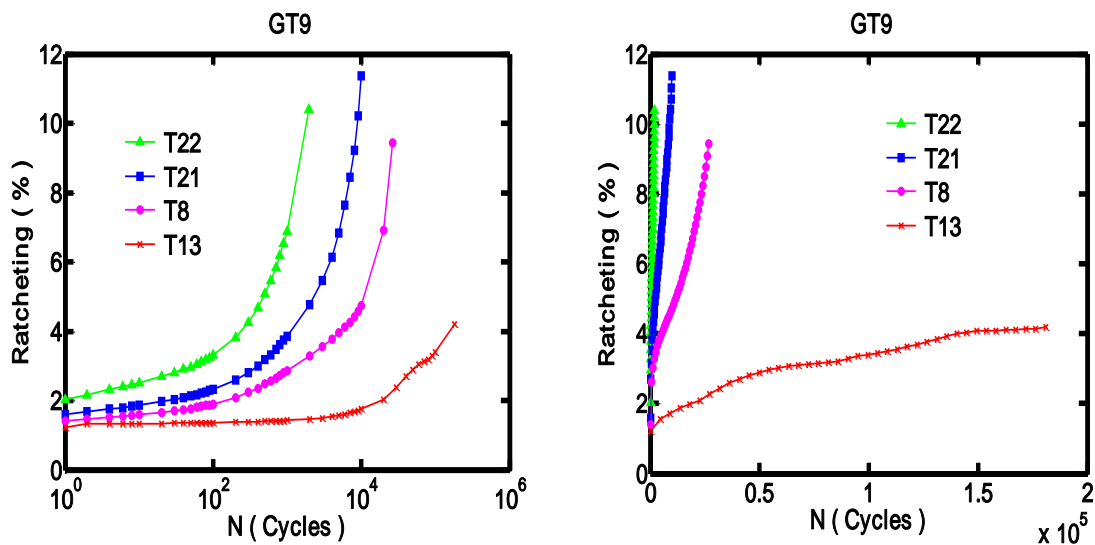
شکل ۴-۲۶- کرنش رجتینگ آزمایش‌های گروه GT6 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی



شکل ۴-۲۷- کرنش رجتینگ آزمایش‌های گروه GT7 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی



شکل ۴-۲۸- کرنش رجتینگ آزمایش‌های گروه GT8 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی



شکل ۴-۲۹- کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9 سمت راست: مقیاس خطی، سمت چپ: مقیاس نیمه لگاریتمی

نکته‌ی دیگری که با توجه به شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۹) می‌توان دریافت این است که برای نرخ کرنش رچتینگ در رژیم‌های خستگی کم تکرار، پایداری مشاهده نمی‌شود و این در حالی است که برای رژیم‌های خستگی پرتکرار این امر به وضوح قابل مشاهده است.

در جدول (۴-۵) مقادیر کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ در 10%، 50% و 90% عمر خستگی آورده شده است. همچنین در ستون آخر نرخ کرنش رچتینگ هر یک از آزمایش‌های در بازه‌ی 20% تا 80% عمر خستگی نیز آورده شده است. در این بازه کرنش رچتینگ پایدار رخ می‌دهد.

نکته قابل توجه این است که مقدار نرخ کرنش رچتینگ در 50% عمر خستگی تقریباً برابر با مقدار نرخ کرنش رچتینگ در بازه‌ی 20% تا 80% عمر خستگی می‌باشد.

جدول ۴-۵- مقادیر کرنش و نرخ کرنش رچتینگ در کسرهای خاصی از عمر خستگی

Tests	ε_r (10%)	ε_r (50%)	ε_r (90%)	$d\varepsilon_r/\text{Cycle}$ (10%)	$d\varepsilon_r/\text{Cycle}$ (50%)	$d\varepsilon_r/\text{Cycle}$ (90%)	$d\varepsilon_r/\text{Cycle}$ (20-80%)
T1	0.51	0.93	1.58	0.0372	0.0229	0.0600	0.0244
T2	0.0647	0.3181	1.2564	0.0034	0.0057	0.0415	0.0072
T3	0.0864	0.3445	1.0190	0.0010	0.0017	0.0072	0.0018
T4	0.0100	0.1553	0.5637	0.0002	0.0002	0.0006	0.0002
T5	2.1409	3.3568	4.1114	0.0152	0.0580	0.0641	0.0620
T6	2.3549	3.7003	6.3033	0.0119	0.0130	0.0367	0.0146
T7	2.4945	4.6766	7.9028	0.0038	0.0037	0.0078	0.0041
T8	3.4853	5.3142	8.2372	0.0003	0.0002	0.0004	0.0002
T9	2.1329	3.1577	4.5699	0.0611	0.0388	0.0819	0.0427
T10	1.8356	3.1993	5.1402	0.0129	0.0156	0.0596	0.0175
T11	2.1706	3.3365	5.6051	0.0102	0.0114	0.0313	0.0129
T12	2.4397	4.6511	7.3700	0.0022	0.0016	0.0038	0.0019
T13	1.9823	3.2836	4.1125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T14	1.7674	2.5655	4.2515	0.0086	0.0106	0.0325	0.0117
T15	1.6025	2.5954	4.4696	0.0029	0.0037	0.0118	0.0041
T16	2.0405	3.6471	6.1582	0.0017	0.0012	0.0039	0.0014
T17	2.8500	3.3526	3.9121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T18	1.4335	2.1683	3.8161	0.0030	0.0038	0.0152	0.0043
T19	2.4242	2.9870	3.1403	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T20	2.5961	4.1829	6.4834	0.0005	0.0003	0.0010	0.0003
T21	3.8485	6.8124	10.1490	0.0012	0.0008	0.0011	0.0007
T22	3.7988	6.8240	9.6082	0.0048	0.0035	0.0038	0.0036
T23	-0.9659	-1.2453	-2.2284	-0.0010	-0.0024	-0.0160	-0.0029
T24	-0.8746	-1.2621	-2.3250	-0.0004	-0.0009	-0.0055	-0.0010
T25	-1.8208	-2.2607	-2.3630	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000

۴-۵-۳- حدود تغییرات کرنش

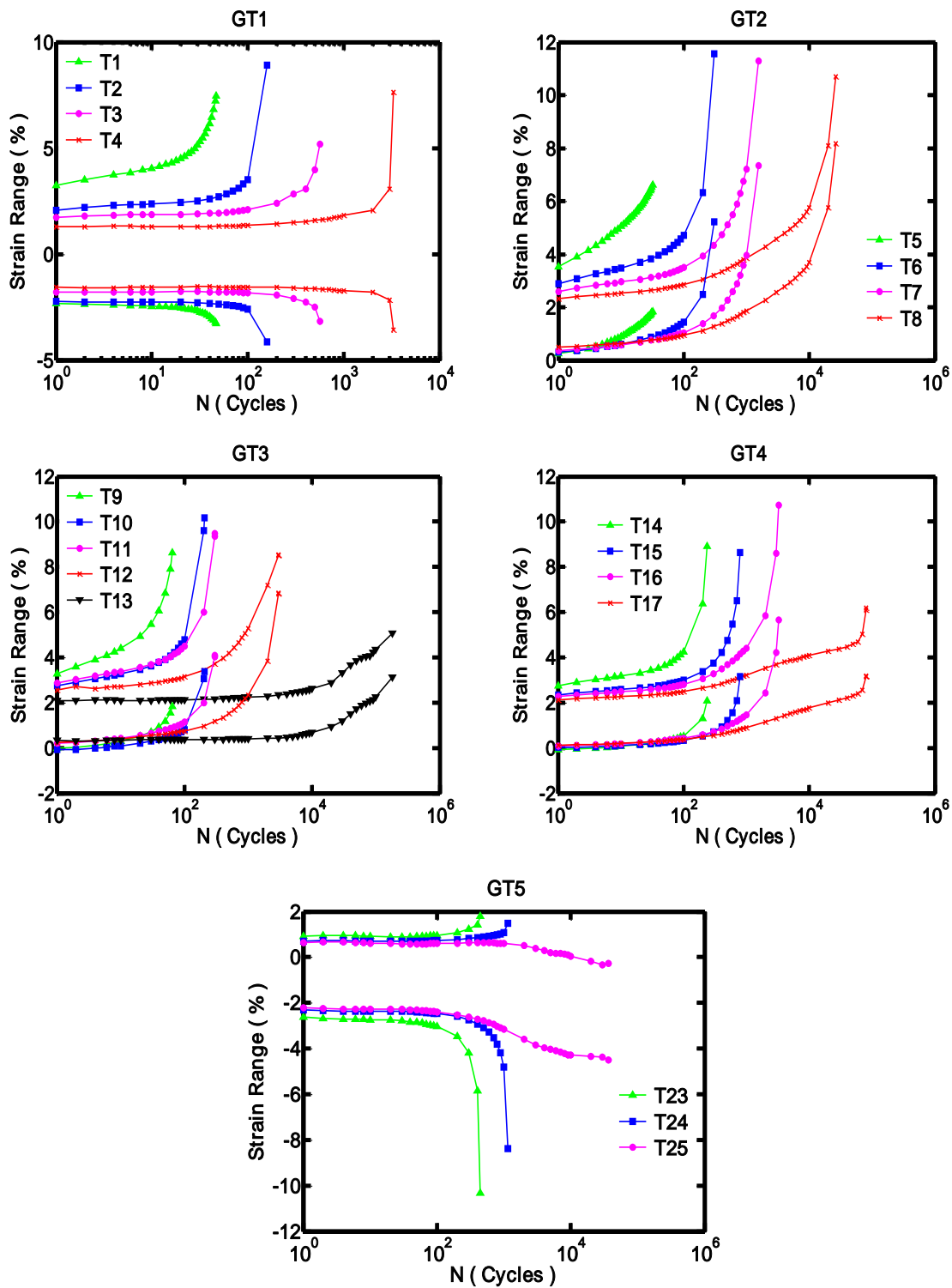
در این قسمت به بررسی حدود تغییرات کرنش پرداخته می‌شود. به این منظور همان طور که در شکل‌های (۴-۳۰) و (۴-۳۱) مشاهده می‌شود، مقادیر ماکزیمم و مینیمم کرنش در طول هر آزمایش در این شکل‌ها ترسیم شده است.

حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل، برای آزمایش‌هایی با تنش میانگین ثابت و دامنه‌ی تنش متغیر (گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5) در شکل (۴-۳۰) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شماره‌ی سیکل، حدود تغییرات کرنش افزایش می‌یابد که این پدیده حاکی از رفتار نرم شوندگی پلی استال تحت بارگذاری سیکلی است.

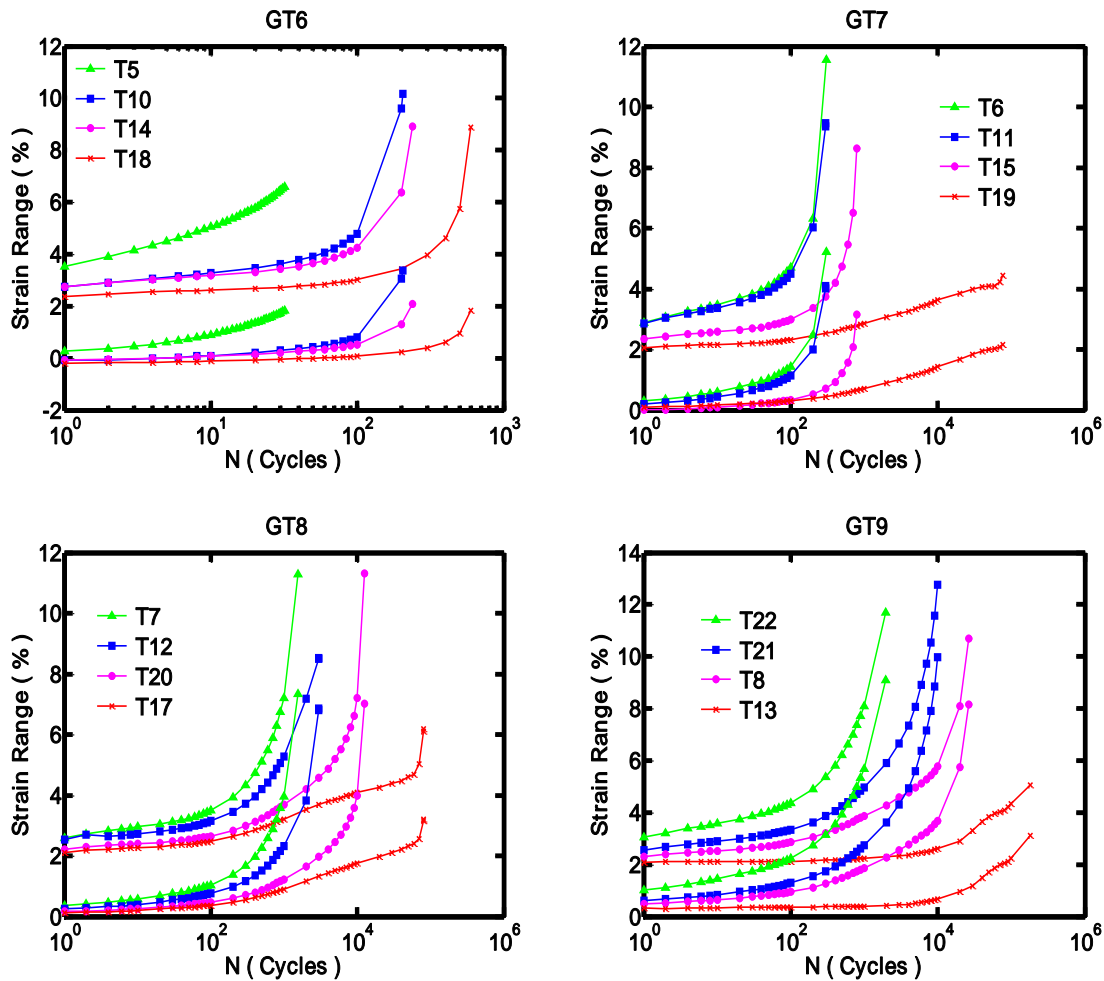
نکته‌ی دیگری که می‌بایست به آن توجه نمود این است که در رژیم‌های خستگی کم تکرار، نرخ تغییرات حدود کرنش بیشتر از نرخ تغییرات حدود کرنش در رژیم‌های خستگی پرتکرار است.

برای آزمایش‌هایی با دامنه‌ی تنش متغیر و تنش میانگین ثابت، هرچه دامنه‌ی تنش اعمالی به نمونه بزرگتر شود، نرخ تغییرات حدود کرنش بیشتر می‌شود.

شکل (۴-۳۱) حدود تغییرات آزمایش‌های تنش-کنترلی را که در آنها تنش میانگین متغیر و دامنه تنش ثابت، بوده است (گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل نیز مشخص می‌شود که با افزایش تنش میانگین با وجود دامنه‌ی تنش ثابت حدود کرنش و نرخ تغییرات حدود کرنش افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۳۰- حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل با تنش میانگین ثابت و دامنه تنش متغیر



شکل ۴-۳۱- حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل با دامنه‌ی تنش ثابت و تنش میانگین متغیر

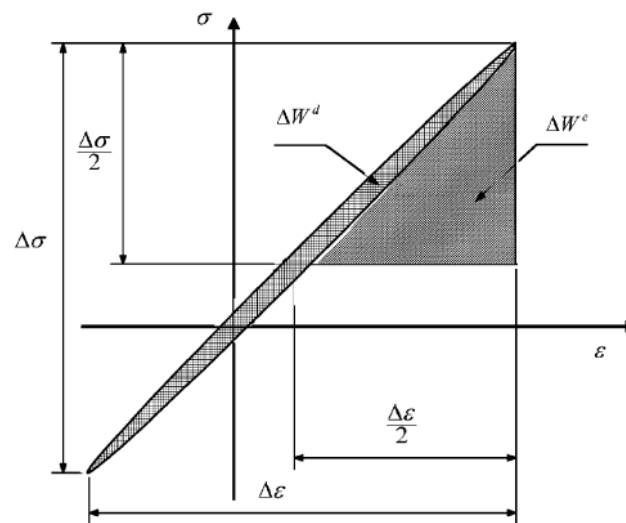
۴-۵-۴- چگالی انرژی کرنشی

در بحث خستگی دو نوع چگالی انرژی کرنشی مطرح می‌شود. یکی چگالی انرژی کرنشی تلف شده^۱ که به اختصار DSED یا ΔW^d نامیده می‌شود، و دیگری دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی الاستیک^۲ که به اختصار ESEDA یا ΔW^e نامیده می‌شود [۱۳]. بر اساس داده‌های تنش-کرنش به

۱ Dissipated Strain Energy Density

۲ Elastic Strain Energy Density Amplitude

دست آمده از آزمایش‌ها و حلقه‌های هیستریزیس ایجاد شده، می‌توان مقادیر ΔW^d و ΔW^e را محاسبه نمود. به این صورت که با انتگرال گیری از سطح داخلی حلقه‌ی هیستریزیس می‌توان به مقدار ΔW^d ، و با انتگرال گیری از سطح زیر حلقه‌ی هیستریزیس و بالای خط تنش میانگین می‌توان به مقدار ΔW^e دست یافت. شکل (۴-۳۲) این مطلب را به روشنی نمایش می‌دهد.

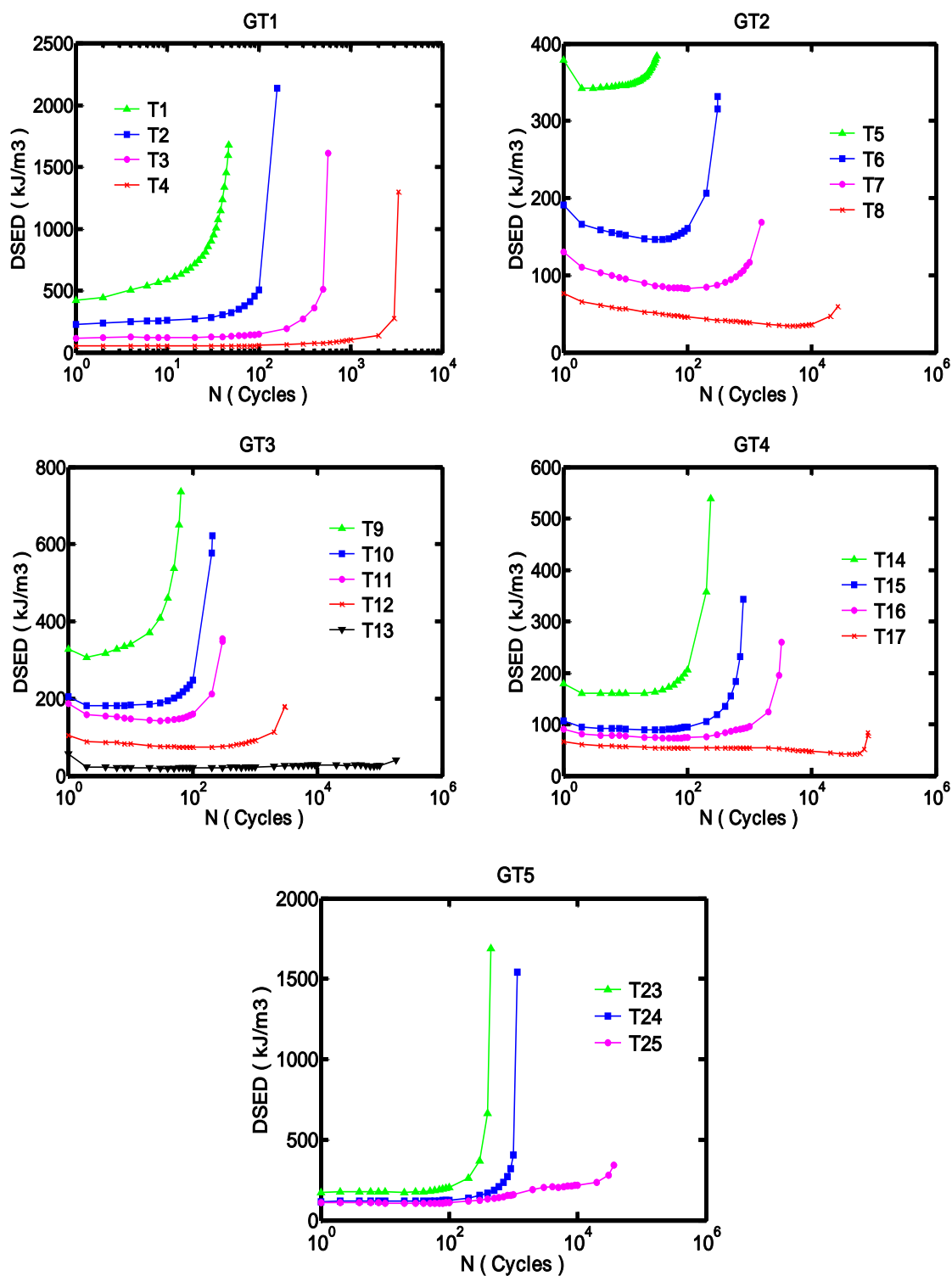


شکل ۴-۳۲-نمایش اجزای چگالی انرژی کرنش [۱۴]

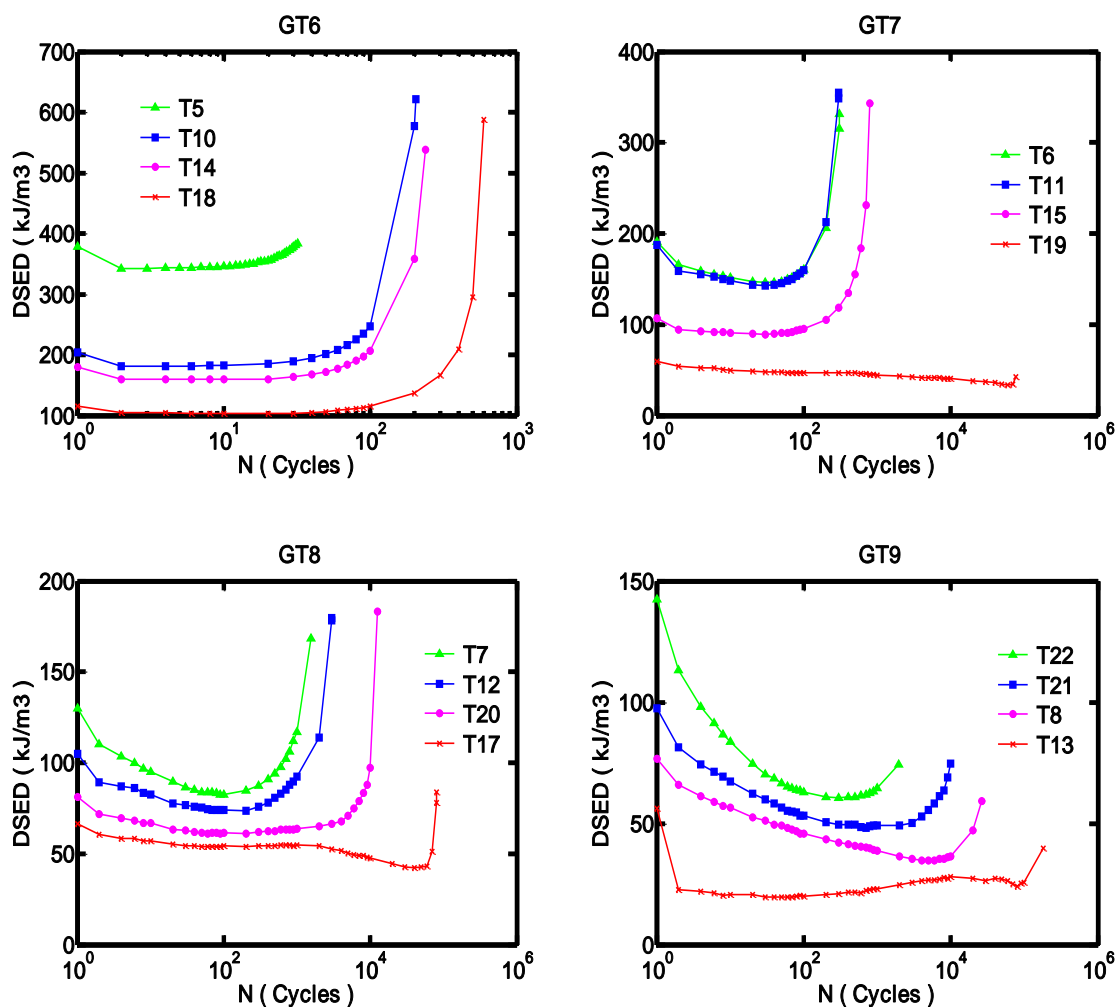
در ادامه به بیان مقادیر هر یک از این دو نوع انرژی کرنشی در آزمایش‌های انجام گرفته خواهیم پرداخت.

با توجه به شکل (۴-۳۳) و (۴-۳۴) مشخص می‌شود که چگالی انرژی کرنش اتلاف شده برای همه‌ی گروه‌های آزمایشی GT2 تا GT9 ابتدا روندی کاهشی و سپس افزایشی دارند. همان طور که در شکل دیده می‌شود، گروه آزمایش GT1 که در آن تنش میانگین صفر می‌باشد، چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده روندی ثابت و یا افزایشی دارد. هرچه دامنه‌ی تنش اعمالی در حالت تنش میانگین صفر کمتر باشد، شیب روند افزایشی کمتر است تا حدی که در آزمایش T4 این نرخ تغییرات چگالی انرژی کرنشی به صفر می‌رسد. نکته جالب توجه این است که در صورت غیر صفر بودن تنش میانگین و به

ازاء هر مقدار دامنه‌ی تنش، نرخ تغییرات چگالی انرژی کرنشی ابتدا منفی، صفر و سپس مثبت خواهد شد.

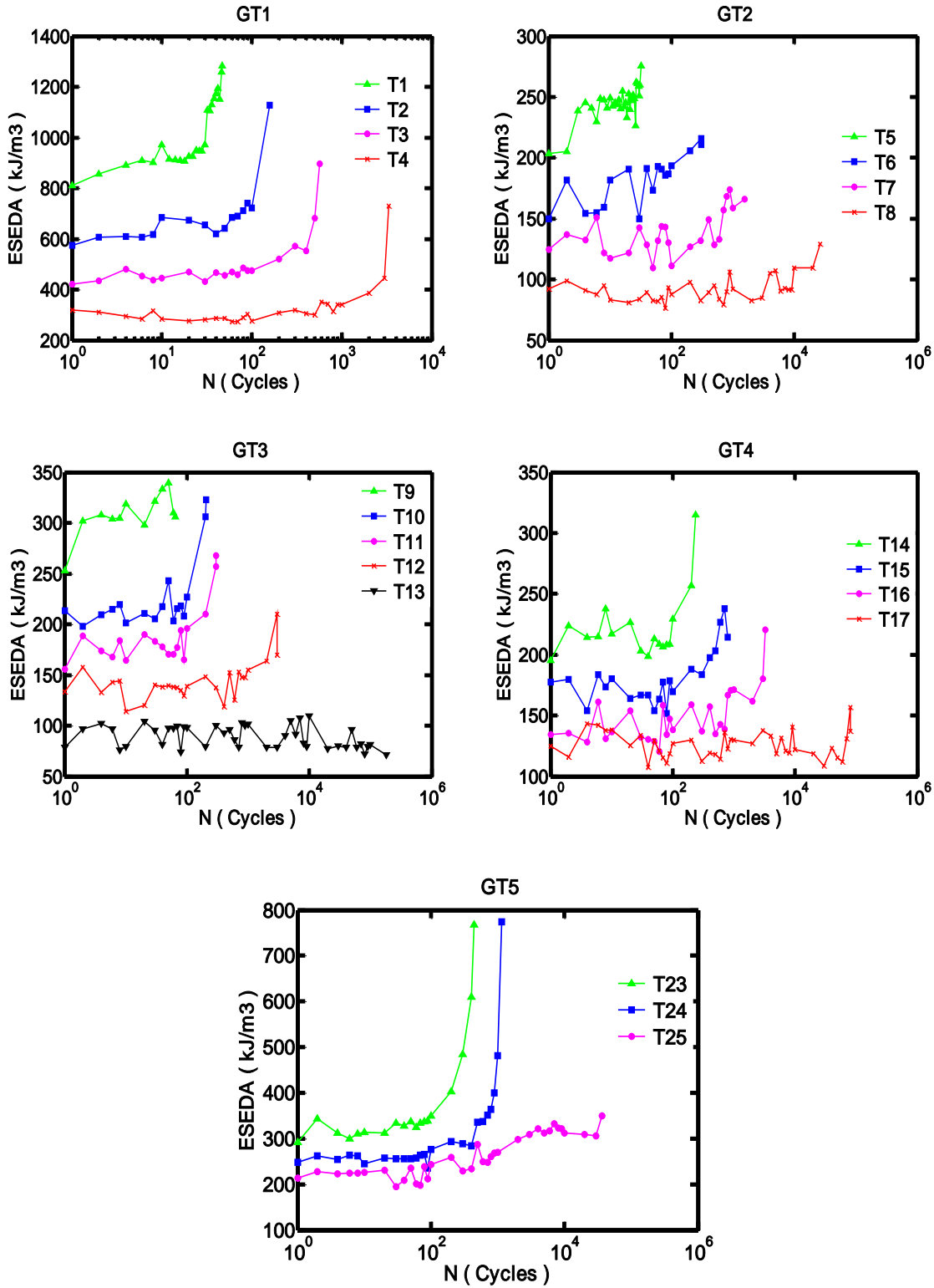


شکل ۴-۳۳- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5

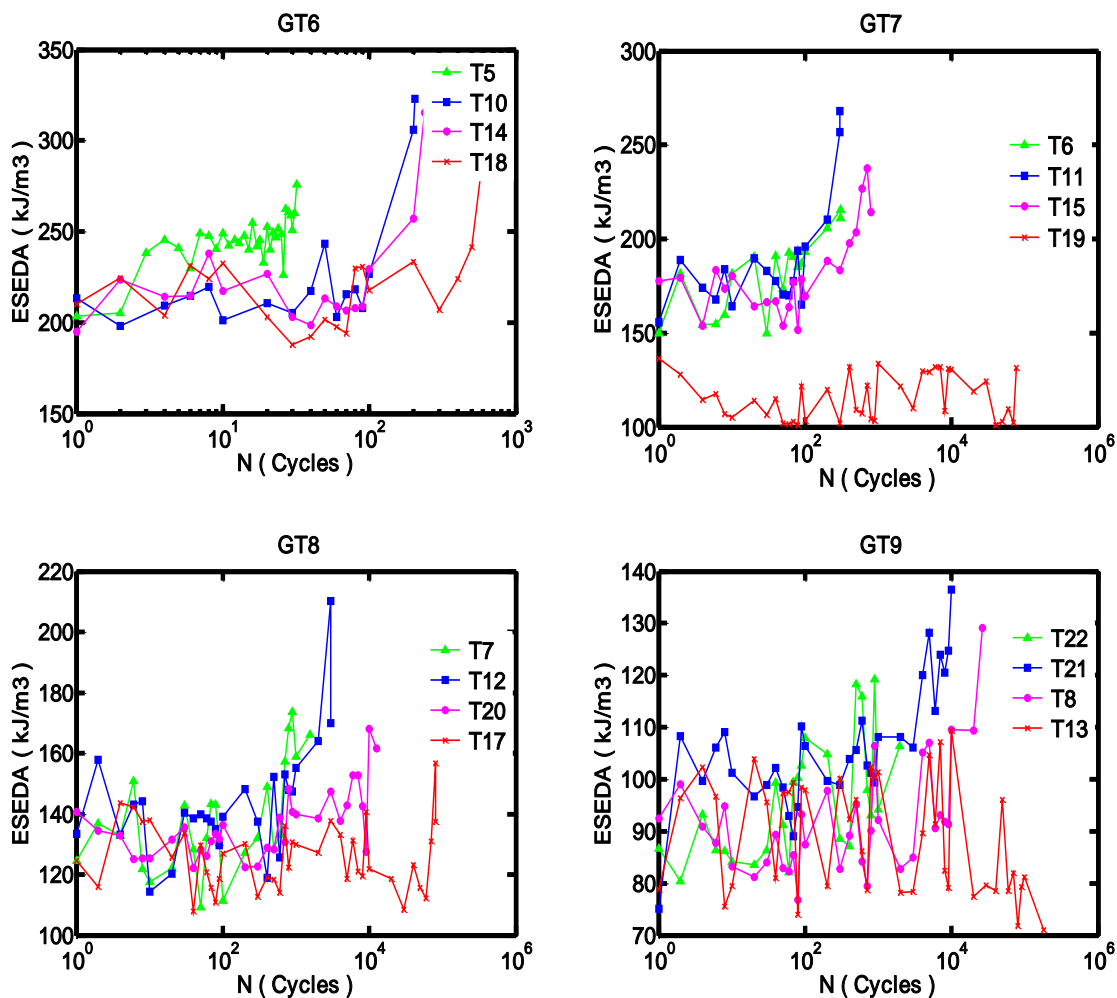


شکل ۴-۳۴- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9

شکل‌های (۴-۳۵) و (۴-۳۶) به ترتیب نشان دهنده‌ی دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک می‌باشند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، به‌طور کلی نرخ تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک مثبت است؛ اما این کمیت رفتار بسیار نامنظمی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۵- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5



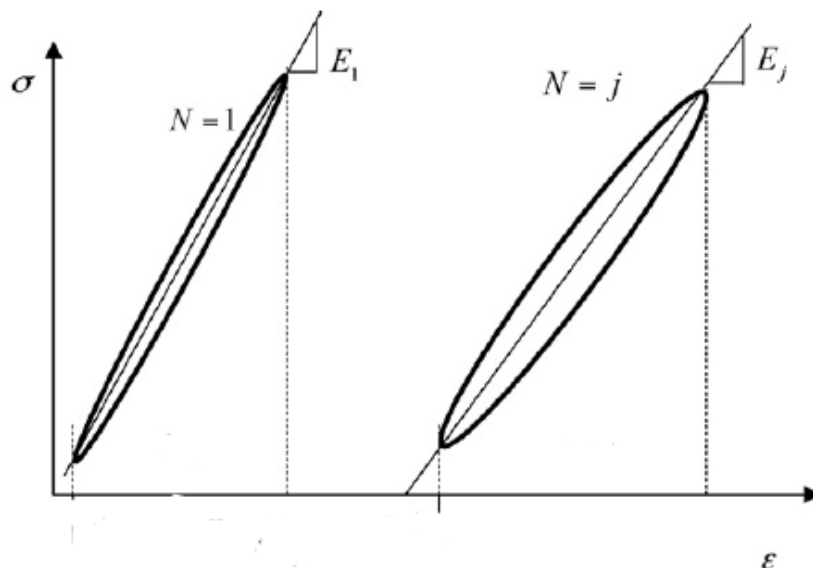
شکل ۴-۳۶- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9

۴-۵-۵- شیب حلقه‌های هیستریزیس

در این قسمت به بررسی کمیتی که در مرجع [۱۷] معرفی شده است، می‌پردازیم. این کمیت

که ما در اینجا از آن به عنوان شیب حلقه هیستریزیس یاد می‌کنیم، عبارت است از شیب خطی که

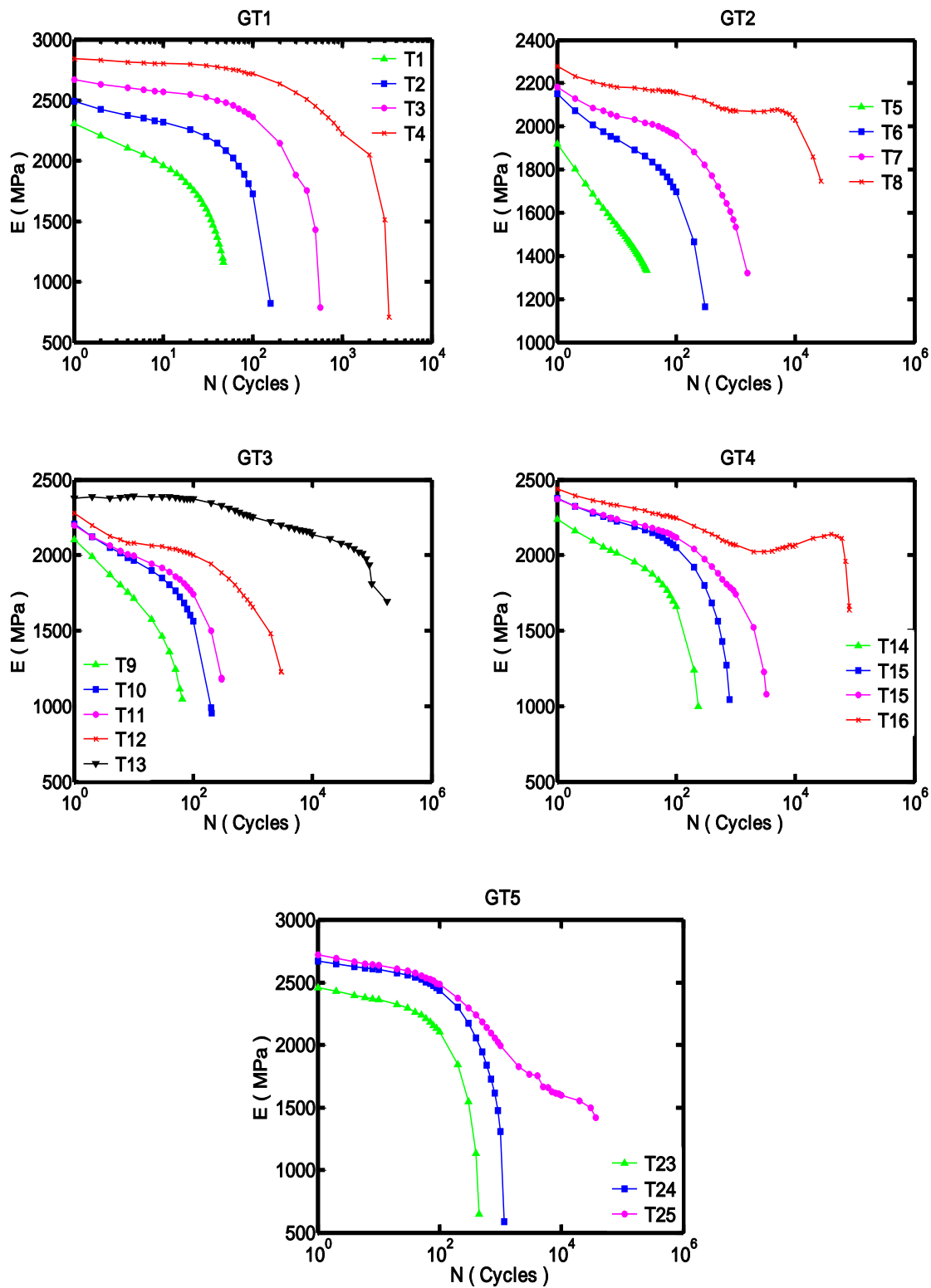
نقاط اکسترمم حلقه هیستریزیس را به هم وصل می‌کند. در شکل (۴-۳۷) این کمیت به صورت نمادین نشان داده شده است.



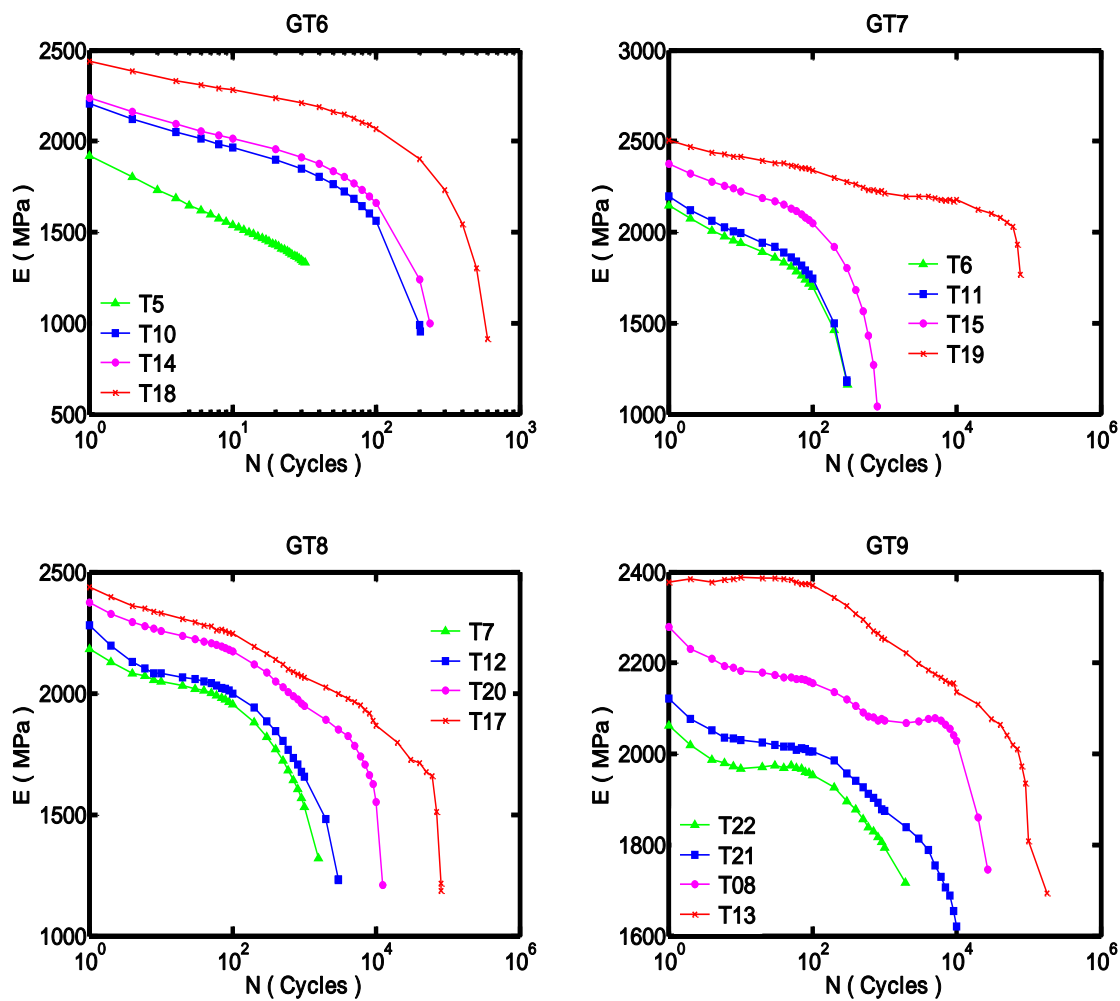
شکل ۴-۳۷-شیب حلقه هیستریزیس [۱۷]

با توجه به شکل (۴-۳۸) مشخص می‌شود که نرخ تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5 همواره منفی است و هرچه دامنه تنش اعمالی به نمونه بزرگتر باشد، این شیب کمتر است و با نرخ بزرگتری کاهش می‌یابد. نرخ منفی تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس را می‌توان ناشی از رفتار نرم شوندگی پلی استال دانست.

شکل (۴-۳۹) نیز تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9 را نشان می‌دهد. در این گروه‌های آزمایش که دامنه تنش ثابت و تنش میانگین متغیر است، با افزایش تنش میانگین اعمالی به نمونه شیب حلقه‌های هیستریزیس کم، و نرخ تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس بیشتر می‌شود.



شکل ۴-۳۸- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT1 تا GT5



شکل ۴-۳۹- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GT6 تا GT9

۴-۶- آزمایش‌های کرنش-کنترل

همه‌ی آزمایش‌هایی که در این قسمت انجام شده است تحت شرایط کرنش-کنترل و در دمای محیط آزمایشگاه بوده‌اند. سرعت انجام آزمایش‌ها به گونه‌ای بوده است که در خلال انجام آزمایش نرخ کرنش همواره مقدار ثابت $\dot{\epsilon} = 0.06 s^{-1}$ بوده و تغییر محسوسی در دمای نمونه‌ها ایجاد نشود. در جدول (۴-۶) اطلاعات مربوط به هر آزمایش آورده شده است.

آزمایش‌های کرنش-کنترل انجام گرفته را می‌توان در چهار گروه مختلف که در هر یک از این گروه‌ها مقدار نسبت تنش مینیمم به ماکزیمم ($R = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$) ثابت است، تقسیم بندی نمود. به این ترتیب می‌توان اثرات نسبت‌های مختلف بارگذاری بر روی نمونه را مشاهده نمود. این گروه بندی در جدول (۴-۷) آورده شده است.

جدول ۴-۶- آزمایش‌های کرنش-کنترل

Tests	ε_m (%)	ε_a (%)	frequency(Hz)	N_f (Cycles)
S1	0.00	4.90	0.306	2348
S2	0.00	4.70	0.319	2642
S3	0.00	4.60	0.326	3196
S4	0.00	4.50	0.333	3276
S5	1.30	3.90	0.385	>4162
S6	1.25	3.75	0.400	3840
S7	1.18	3.53	0.426	6616
S8	1.00	3.00	0.500	7850
S9	2.65	2.65	0.566	11040
S10	2.50	2.50	0.600	>3786
S11	2.30	2.30	0.652	10070
S12	2.20	2.20	0.681	18570
S13	3.19	1.91	0.784	>16300
S14	2.94	1.76	0.851	>5000
S15	2.69	1.61	0.930	>5000
S16	2.44	1.46	1.026	>5000

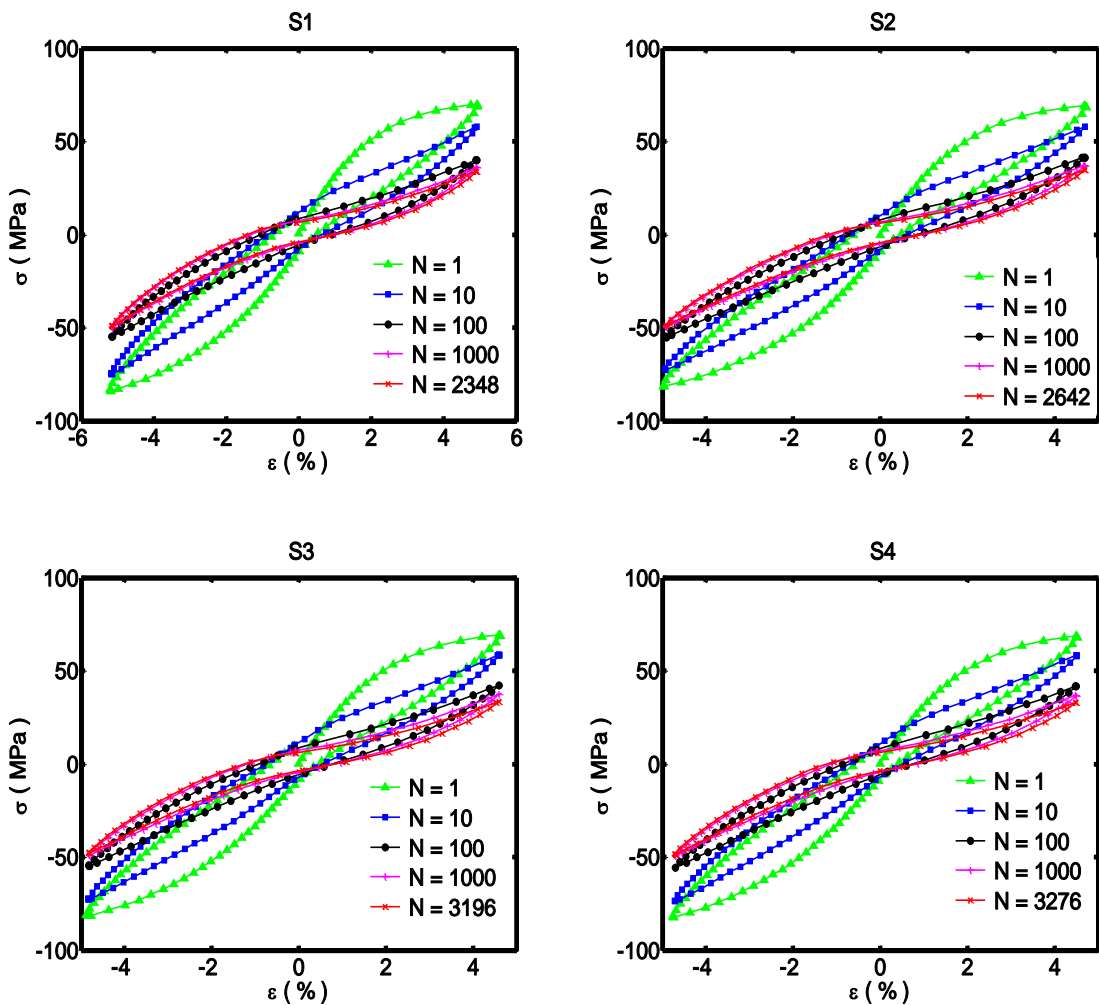
جدول ۴-۷- گروه بندی آزمایش‌های کرنش-کنترل

شماره گروه	$R = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$	$R_m = \varepsilon_m / \varepsilon_a$	شماره آزمایش‌ها
GS1	-1	0	S1, S2, S3, S4
GS2	-0.5	0.33	S5, S6, S7, S8
GS3	0	1	S9, S10, S11, S12
GS4	0.25	1.67	S13, S14, S15, S16

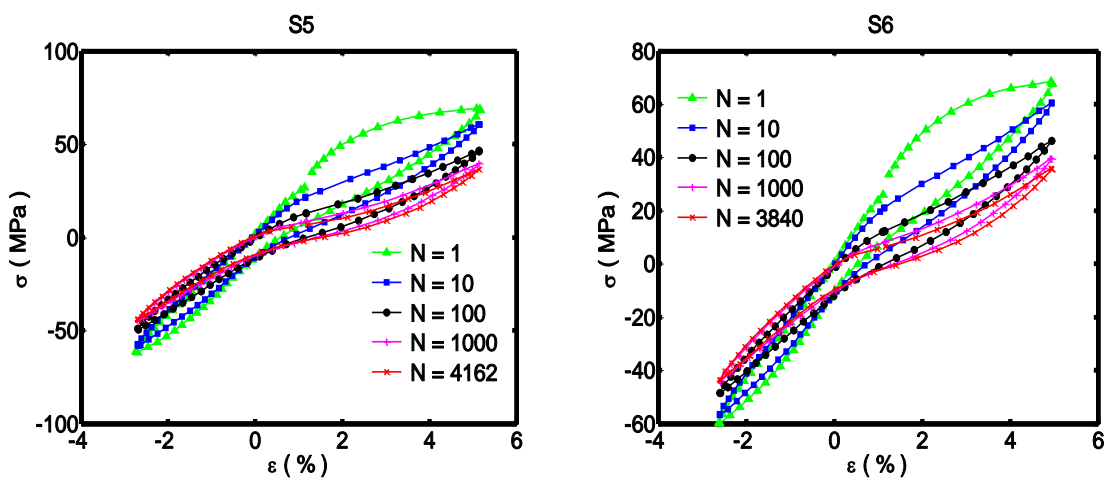
در این قسمت نیز همانند آزمایش‌های تنش-کنترل در طول انجام هر آزمایش داده‌های تغییر طول و نیرو ثبت شده است. با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.6 و این داده‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های هر آزمایش محاسبه شده و بر اساس تنش و کرنش‌های حاصل شده تحلیل کمی پارامترهای مکانیکی نظیر تنش میانگین، حدود تغییرات تنش، چگالی انرژی کرنشی و شیب حلقه‌های هیستریزیس انجام گرفته است.

۴-۶-۱- حلقه‌های هیستریزیس

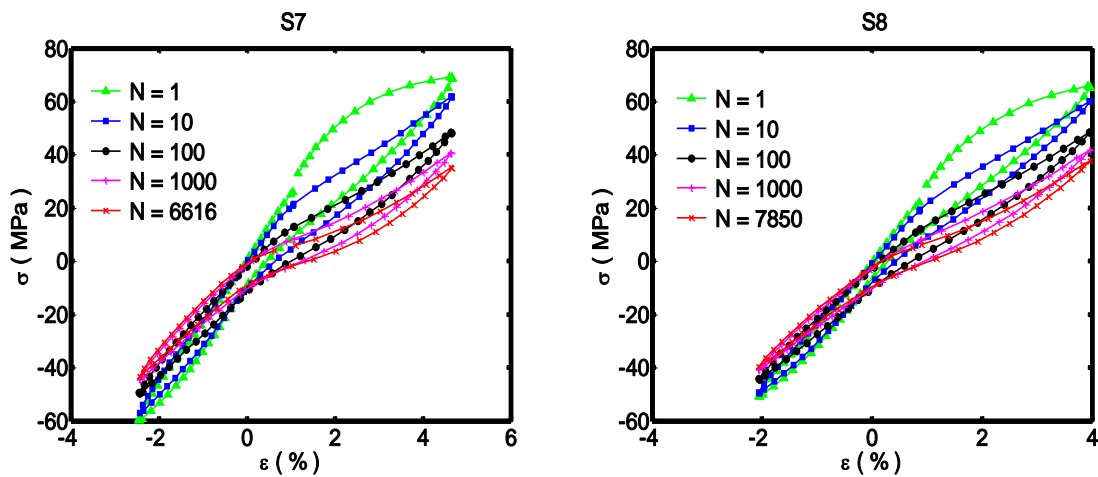
در شکل‌های (۴-۴۰) تا (۴-۴۳) حلقه‌های هیستریزیس همه‌ی آزمایش‌های کرنش-کنترل مشاهده می‌شوند. نحوه محاسبه و ترسیم این شکل‌ها نیز همانند آزمایش‌های تنش-کنترل بوده است. نکته‌ای که به روشنی با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود؛ همان رفتار نرم شوندگی این ماده تحت بارگذاری سیکلی است.



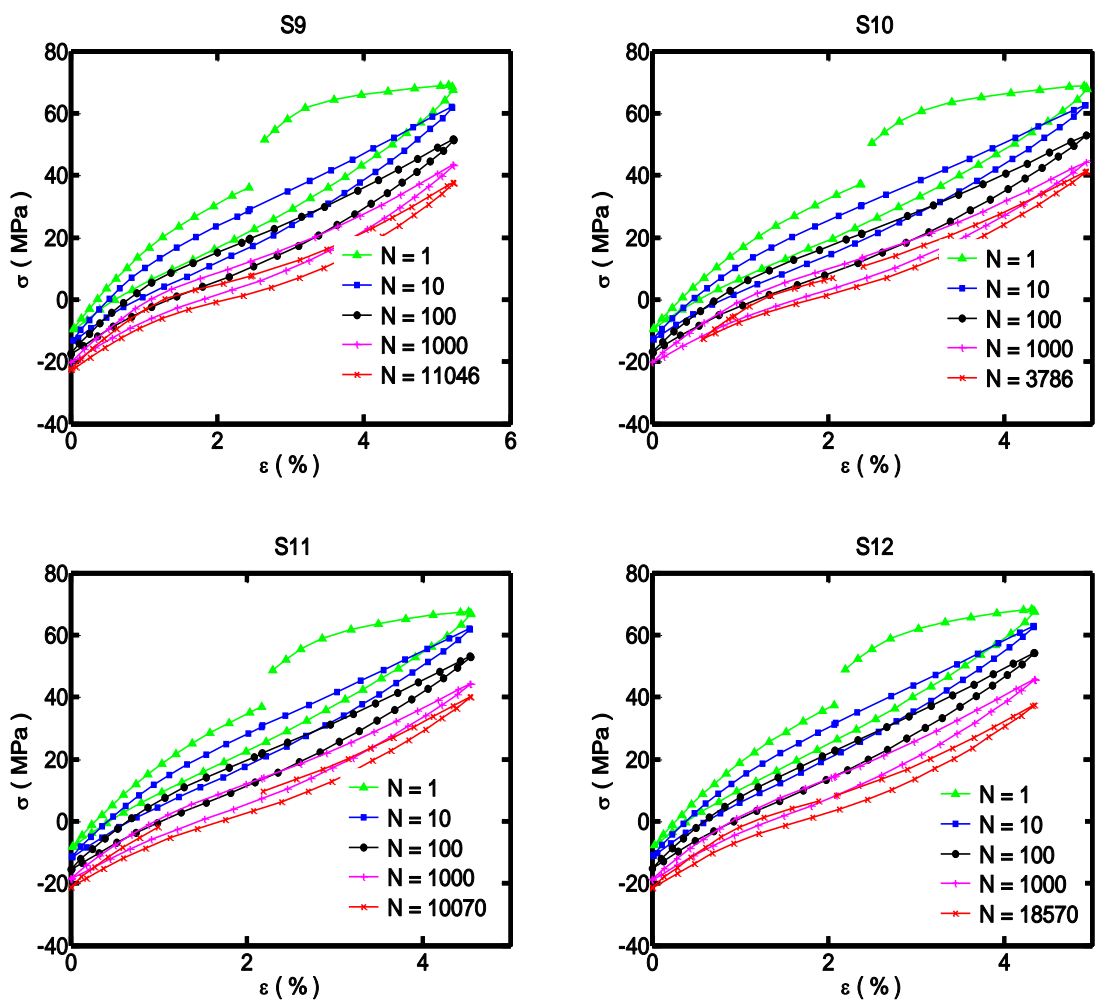
شکل ۴-۴۰- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS1



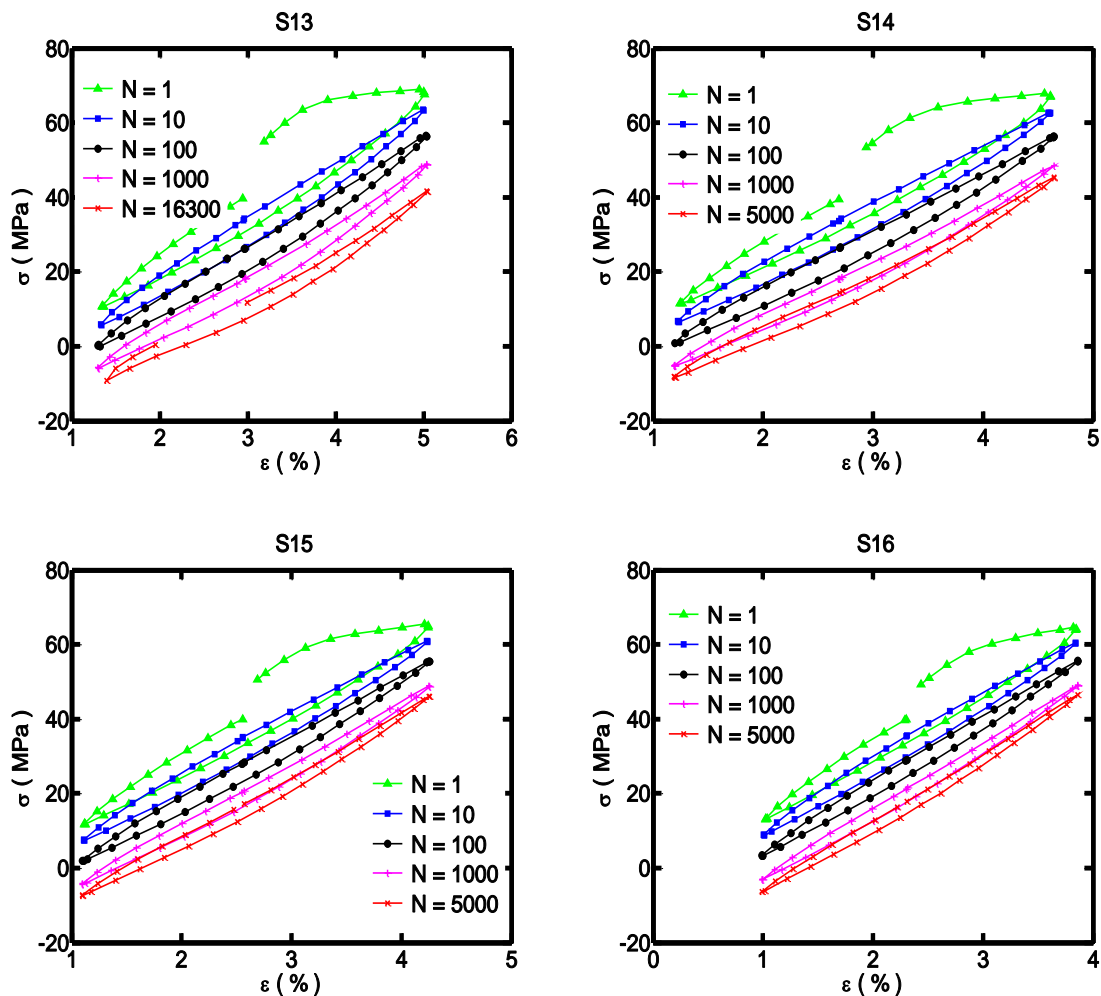
شکل ۴-۴۱- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS2



شکل ۴-۴۱- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS2 (ادامه)



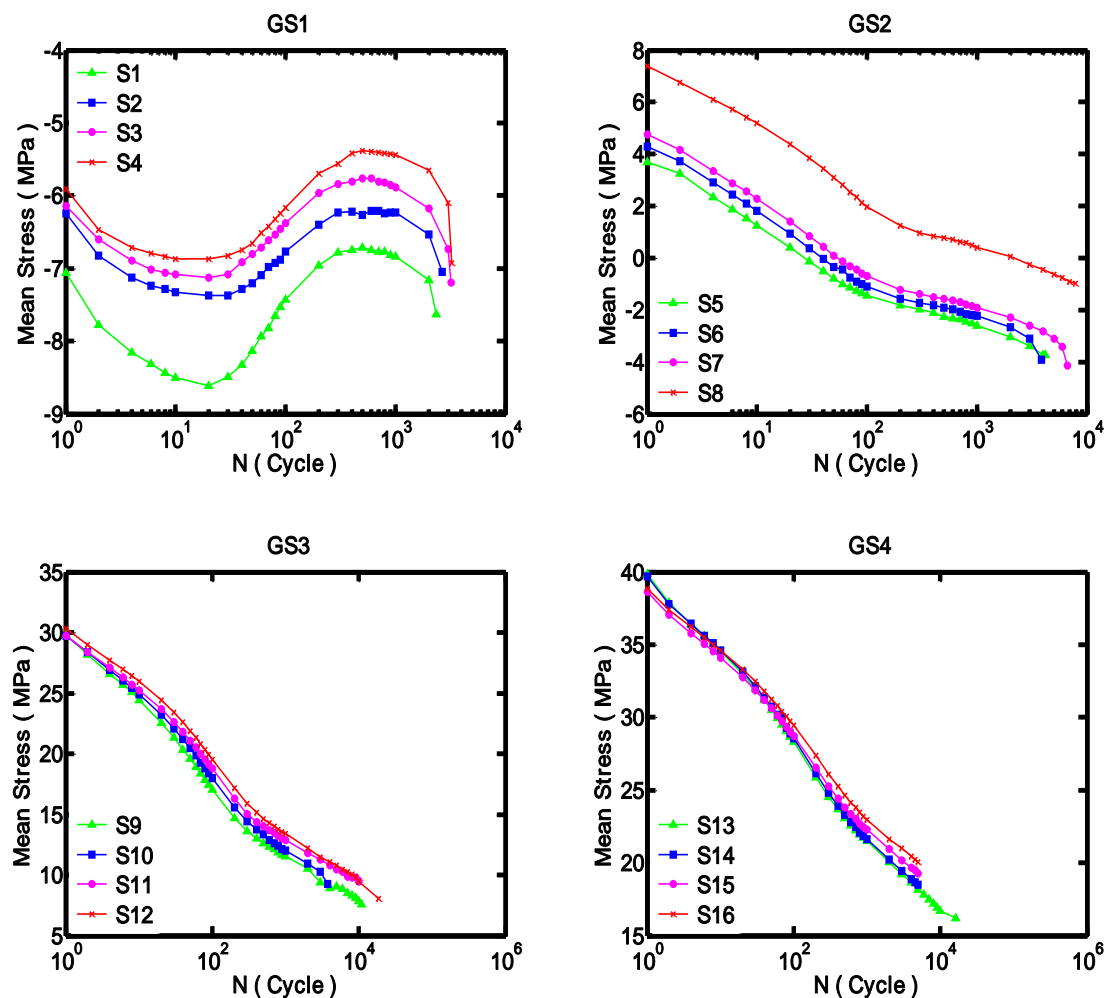
شکل ۴-۴۲- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS3



شکل ۴-۴۳- حلقه‌های هیستریزیس گروه آزمایش GS4

۴-۶-۲- رهایش تنش میانگین

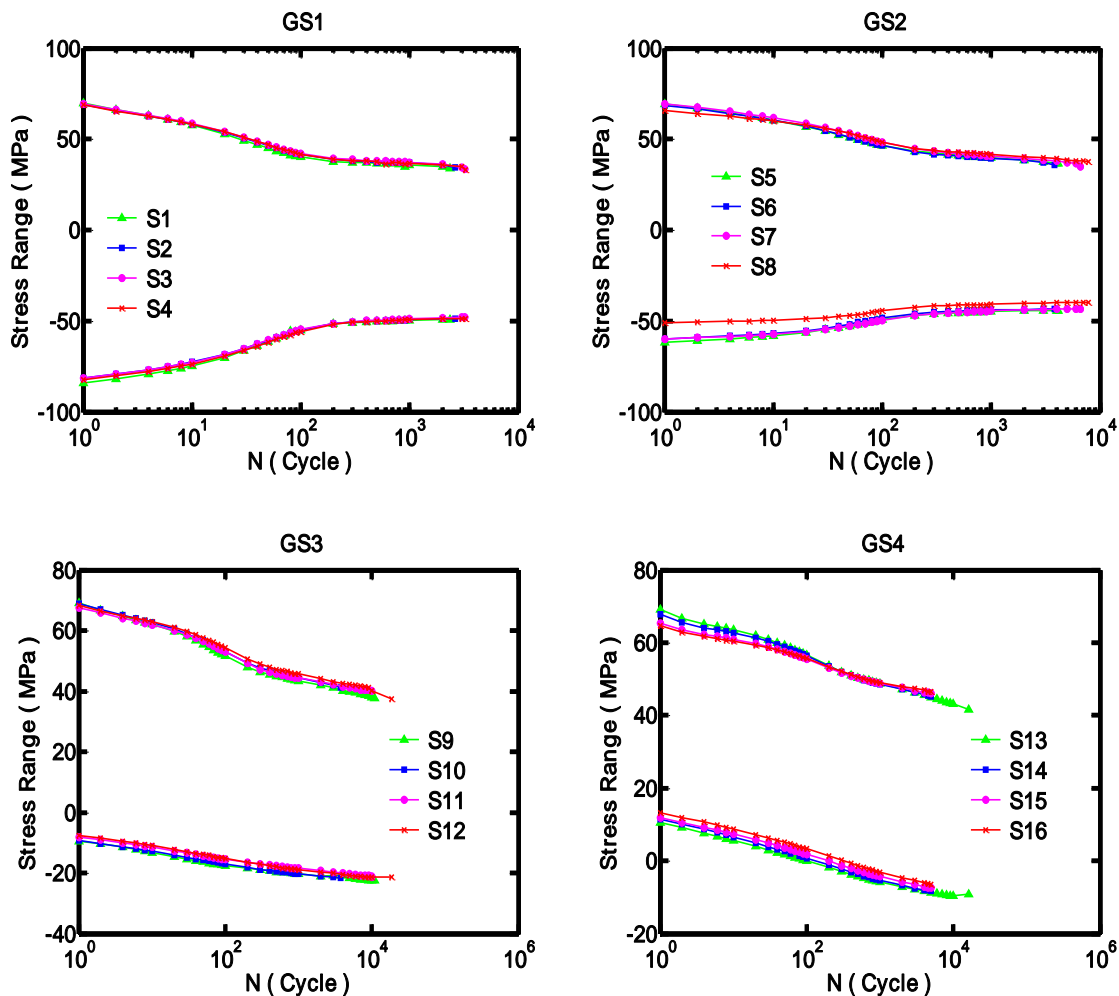
پدیده‌ای که در آزمایش‌های کرنش-کنترل می‌توان آن را متناظر پدیده رچتینگ در آزمایش‌های تنش-کنترل دانست، رهایش تنش میانگین است. همان طور که در شکل (۴-۴۴) مشاهده می‌شود، این پدیده نیز مشابه رچتینگ برای حالتی که کرنش میانگین اعمالی صفر می‌باشد، تقریباً ناچیز است و تغییرات قابل توجهی ندارد (آزمایش گروه GS1). اما برای گروه‌های آزمایش GS2، GS3 و GS4 این پدیده روند کاهشی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴- رهائش تنش میانگین گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4

۳-۶-۴- تغییرات حدود تنش

در شکل (۴-۴) تغییرات حدود تنش گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به علت تفاوت رفتار پلی استال در کشش و فشار، رفتار مقارنی را در گروه آزمایش GS1 نمی‌بینیم. مشاهده می‌شود که برای گروه‌های GS1 و GS2 بعد از حدود ۱۰۰ سیکل حدود تنش به یک مقدار پایدار می‌رسند. اما چنین حالت پایداری را برای گروه‌های GS3 و GS4 نمی‌توان مشاهده نمود.

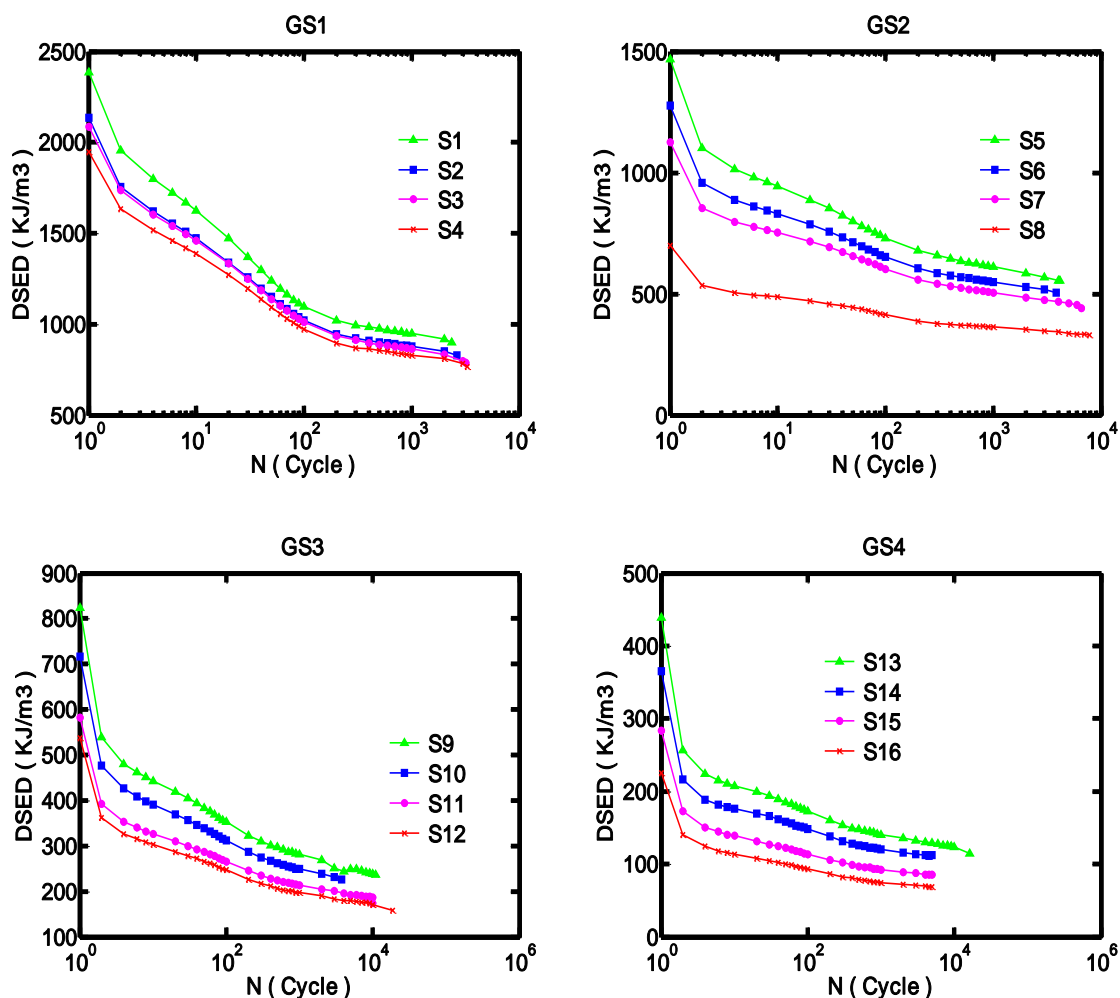


شکل ۴-۴- تغییرات حدود تنش گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4

۴-۶-۴- چگالی انرژی کرنشی

همان طور که در بخش ۴-۵-۴ اشاره شد چگالی انرژی کرنشی را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. برای آزمایش‌های کرنش-کنترل نیز هر یک از این دو بخش چگالی انرژی کرنش محاسبه شده است. در شکل (۴-۴) تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 ترسیم شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، این کمیت برای همه‌ی گروه‌های آزمایش

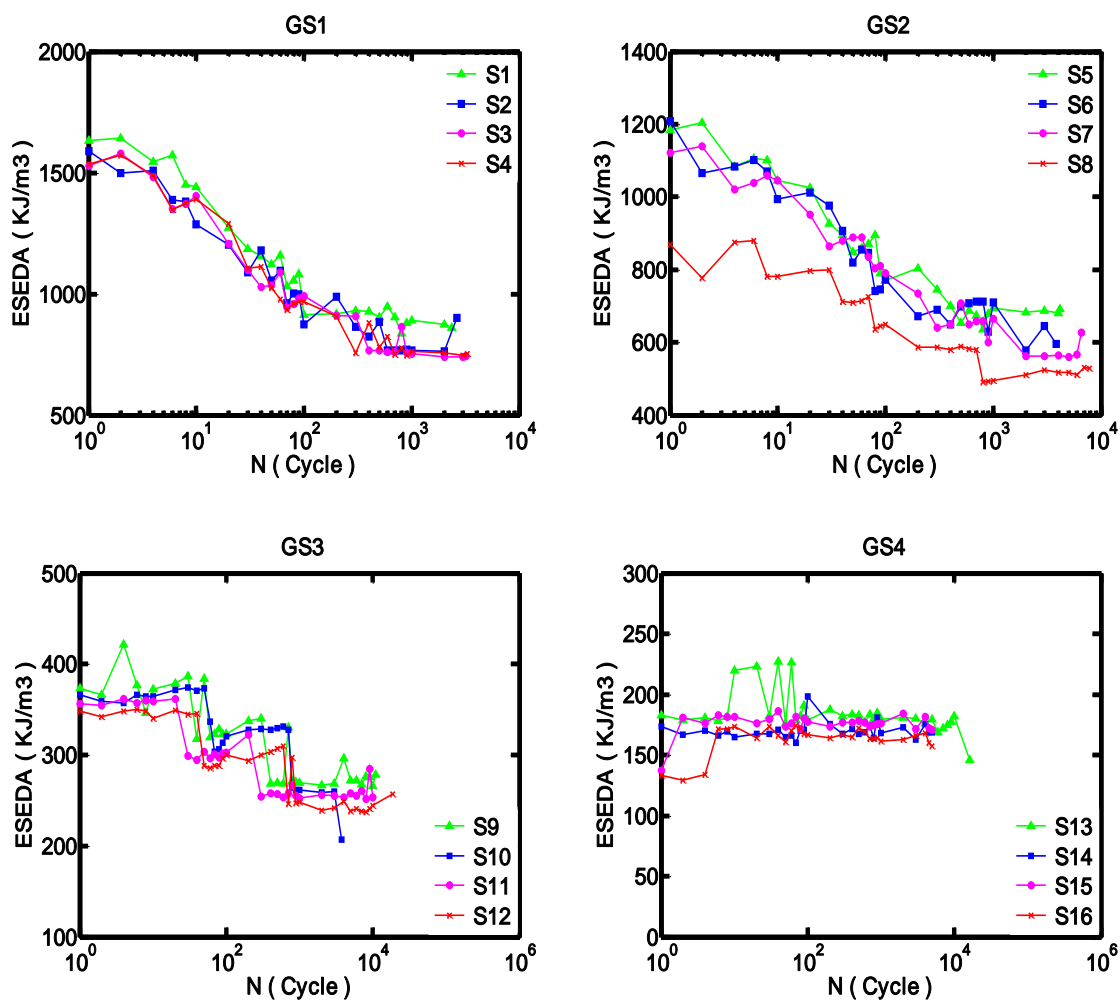
GS1 تا GS4 روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. نکته‌ای که در این شکل جلب توجه می‌کند، همگرا شدن مقدار چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده‌ی هر یک از گروه‌ها به سمت مقداری خاص است.



شکل ۴-۴۶- تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4

در شکل (۴-۴۷) نیز تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 آورده شده است. این کمیت نیز همانند آزمایش‌های تنش-کنترل برای آزمایش‌های کرنش-کنترل رفتار نامنظمی را از خود نشان می‌دهد؛ اما به طور کلی روندی کاهشی دارد. این روند کاهشی برای گروه آزمایش GS4 مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که همانند کمیت چگالی انرژی کرنشی

اتلاف شده، دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک نیز در هر گروه آزمایش به سمت مقداری خاص در حال همگرا شدن می‌باشند.



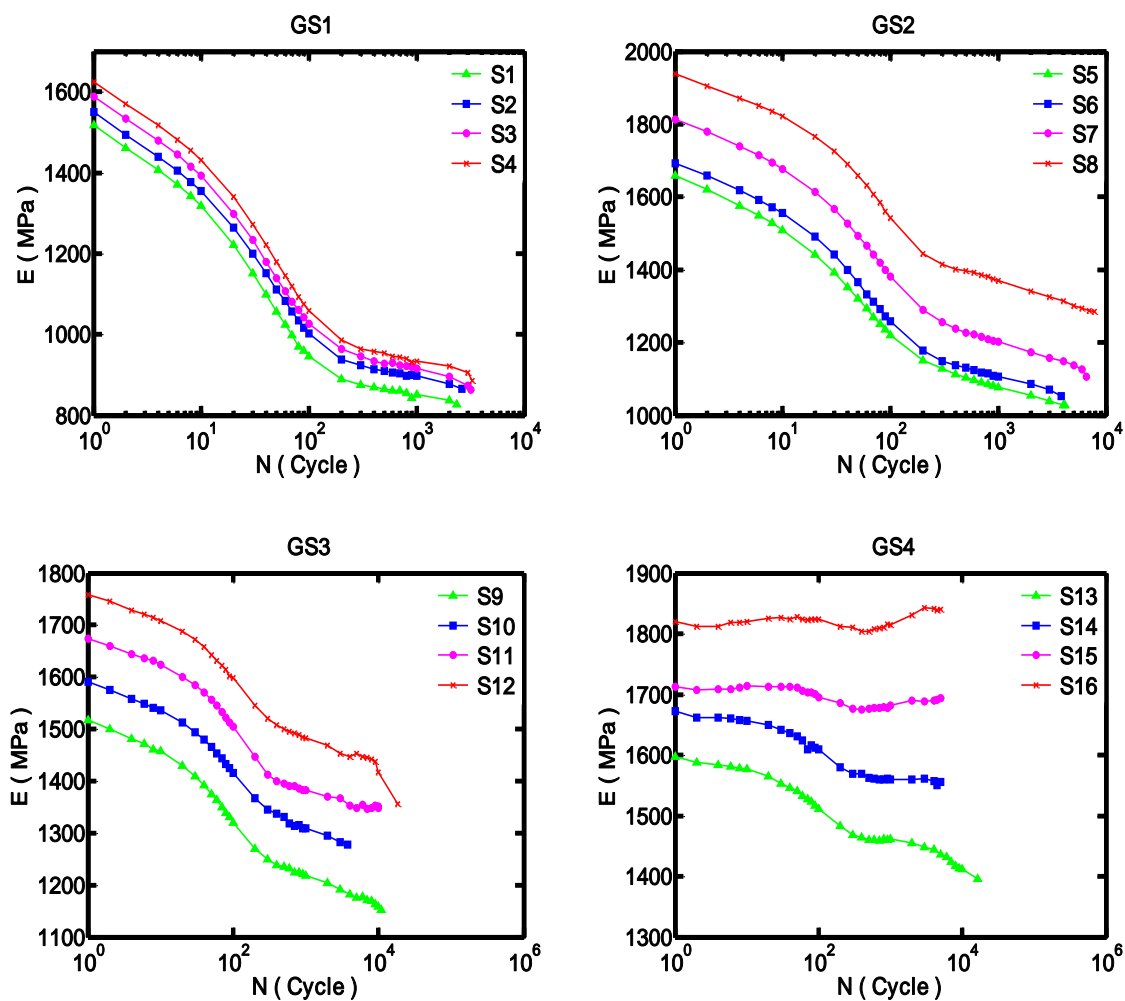
شکل ۴-۴- تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4

۴-۶-۵- شیب حلقه‌های هیستریزیس

همانند آزمایش‌های تنش-کنترل برای آزمایش‌های کرنش-کنترل نیز کمیت شیب حلقه‌های

هیستریزیس (E) مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که از شکل (۴-۴۸) پیداست، این کمیت

برای تمامی آزمایش‌ها به جز آزمایش‌های S15 و S16 روند کاهشی از خود به نمایش می‌گذارد. بیشترین دامنه تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس را در گروه آزمایش GS1 با نسبت $R = -1$ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۴-۴- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4

فصل پنجم

خستگی

در این فصل به بررسی عمر خستگی و بیان معیارهای متفاوتی که برای پیش‌بینی عمر یک سازه استفاده می‌شود، خواهیم پرداخت.

آزمایش‌هایی که به منظور مطالعه‌ی خستگی بر روی مواد انجام می‌شوند، در دو دسته قرار می‌گیرند: آزمایش‌های خستگی تنش-کنترل و آزمایش‌های خستگی کرنش-کنترل. اگر پاسخ رفتار مواد به این آزمایش‌ها در محدوده‌ی الاستیک باشد، این دو مجموعه آزمایش معادل یکدیگر می‌باشند و چنانچه پاسخ مواد در محدوده‌ی الاستیک-پلاستیک باشد نتایج این دو مجموعه آزمایش می‌توانند کاملاً متفاوت از یکدیگر باشند. در آزمایش‌های تنش-کنترل وجود تنش میانگین می‌تواند منجر به انباشتگی کرنش پلاستیک در هر سیکل شود که همان کرنش رچتینگ است. کرنش رچتینگ می‌تواند باعث آسیب بیشتر و در نتیجه عمر خستگی کوتاه‌تر شود. در آزمایش‌های کرنش-کنترل در مراحل اولیه رهایش تنش میانگین رخ می‌دهد که این امر باعث کم شدن اثرات تنش میانگین بر عمر خستگی خواهد شد. تحلیل‌های خستگی که در این فصل انجام خواهد گرفت، بر اساس نتایج آزمون‌های تنش-کنترل خواهد بود.

به طور کلی تئوری‌هایی را که برای بررسی عمر خستگی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسته به دیدگاهی که این تئوری‌ها دارند، می‌توان به سه دسته‌ی کلی تقسیم نمود [۲۹]:

- ۱- خستگی از دیدگاه تنش
- ۲- خستگی از دیدگاه کرنش
- ۳- خستگی از دیدگاه انرژی

در هر یک از این سه دیدگاه رابطه‌ی بین کمیت آسیب^۱ و عمر خستگی به طور عمومی به شکل رابطه‌ی (۱-۵) می‌باشد [۱۳].

$$\psi = \kappa \cdot (N_f)^\gamma + \psi_0 \quad (1-5)$$

به طوری که ψ کمیت آسیب، N_f عمر خستگی، ψ_0 حد خستگی^۲ و κ, γ نیز کمیت‌هایی مربوط به ماده می‌باشند. حال بسته به این که کمیت آسیب انتخاب شده تابعی از تنش، کرنش یا انرژی کرنشی باشد، تحلیل خستگی می‌تواند با هر یک از سه دیدگاه تنش، کرنش و یا انرژی صورت گیرد.

در ادامه به توضیح هر یک از این سه دیدگاه و استفاده از آنها در تحلیل عمر خستگی پلی استال تحت آزمایش‌های تنش کنترل خواهیم پرداخت.

۵-۱- خستگی از دیدگاه تنش

در مرجع [۳۰] یک قانون توانی ساده برای تابع تنش میانگین به شکل زیر بیان شده است:

$$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) = \left(1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)^n \quad (2-5)$$

به طوری که در رابطه‌ی (۲-۵)، n و η ثابت‌های ماده می‌باشند. اگر تابع تنش میانگین را به صورت تنش معادل σ_{eq} در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$\sigma_{eq} = \left(1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)^n \sigma_a \quad (3-5)$$

^۱ Damage Parameter

^۲ Fatigue Limit

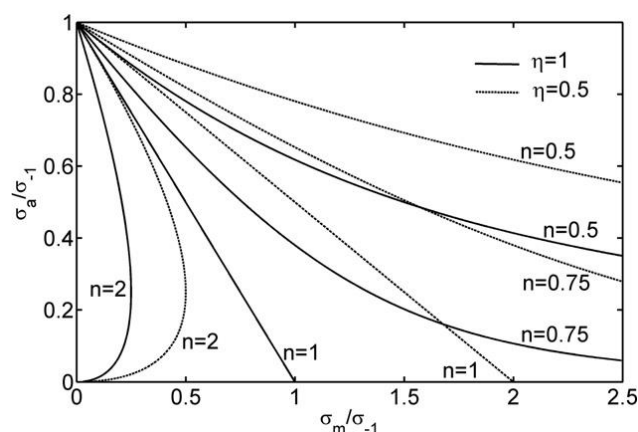
لازم به ذکر است که در آزمایش‌های کاملاً متقارن^۱ که در آنها $\sigma_m = 0$ رابطه‌ی (۳-۵) به صورت $\sigma_{eq} = \sigma_{-1}$ تبدیل خواهد شد؛ به طوری که $n=1$ بیان‌کننده‌ی آزمایش کاملاً متقارن است. بنابراین در حالت کاملاً متقارن، تنش معادل همان دامنه‌ی تنش خواهد بود. با جایگذاری σ_{-1} به جای σ_{eq} رابطه‌ی (۳-۵) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\left(1 + \eta \frac{(\sigma_m / \sigma_{-1})}{(\sigma_a / \sigma_{-1})}\right)^n \frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} = 1 \quad (۴-۵)$$

لازم به ذکر است که این نوع نوشتار در مراجع [۳۱-۳۴] استفاده شده است.

رابطه‌ی $\frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}}$ و $\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}$ با ثوابت مختلف ماده در شکل (۵-۱) ترسیم شده است. برای حالت حدی

$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} \rightarrow 0$ می‌توان مشاهده کرد که برای $n > 1$ ، $\frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}} \rightarrow 0$ و برای $0 < n < 1$ ، $\frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}} \rightarrow \infty$ می‌باشد.



شکل ۵-۱- تابع تنش میانگین با مقادیر مختلف ثابت‌های ماده [۱۳]

هیچ یک از این دو رفتار از لحاظ فیزیکی معنادار نمی‌باشد. زیرا وقتی که دامنه‌ی تنش σ_a صفر باشد، به معنای بارگذاری استاتیکی بوده و تنش میانگین σ_m می‌بایست با مقاومت استاتیکی

^۱ Fully-reversed

ماده مرتبط شود. از آنجایی که در این حالت نسبت $\frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}}$ می‌بایست مقداری نزدیک به صفر داشته

باشد؛ بنابراین، در اینجا فقط مقدار $n = 1$ در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

بنابراین رابطه‌ی (۴-۵) به رابطه‌ی (۵-۵) تبدیل می‌شود.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_{-1}} = 1 \quad (۵-۵)$$

رابطه‌ی (۵-۵) را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۶-۵) نیز نوشت که در آن $\sigma_r = \frac{\sigma_{-1}}{\eta}$ ، تنش مرجع^۱

می‌باشد.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_r} = 1 \quad (۶-۵)$$

σ_r در رابطه‌ی سودربرگ تنش تسلیم (σ_y)، در رابطه‌ی گودمن مقاومت نهایی (σ_u) و در رابطه‌ی مورو مقاومت خستگی (σ'_f) می‌باشد. بر اساس پیشنهاد Zihui Xia و Gang Tao برای مواد پلیمری، σ_r می‌بایست تابعی از σ_{-1} باشد [۱۳]. این موضوع در مرجع [۳۵] نیز عنوان شده است. با ثابت در نظر گرفتن η به طور ضمنی σ_r را تابعی خطی از σ_{-1} در نظر گرفته‌ایم.

به طور کلی بر اساس رابطه‌ی (۱-۵) رابطه‌ای را که برای ارتباط تنش معادل σ_{eq} با عمر

خستگی در نظر می‌گیرند رابطه‌ای توانی به صورت زیر است [۱۳]:

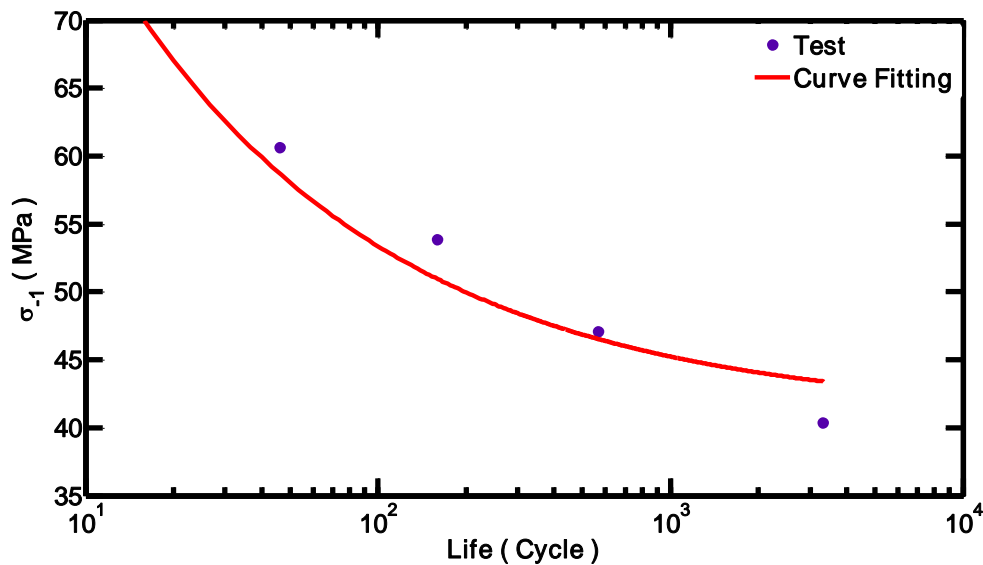
$$\sigma_{eq} = \kappa \cdot N_f^\gamma + \sigma_0 \quad (۷-۵)$$

^۱ Reference Stress

همان طور که گفته شد، چنانچه آزمایش انجام شده به صورت کاملاً متقارن باشد، داریم:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{-1} = \sigma_a \quad \text{بنابراین رابطه‌ی (۷-۵) به صورت } \sigma_{eq} = \sigma_a = \kappa \cdot N_f^\gamma + \sigma_0 \text{ تبدیل می‌شود.}$$

با برازش یک منحنی با استفاده نرم افزار MATLAB 7.6 به شکل زیر، مقادیر κ, γ, σ_0 به دست می‌آیند.



شکل ۵-۲- برازش منحنی توانی از دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1

بنابراین رابطه‌ی (۷-۵) به صورت رابطه‌ی (۸-۵) تکمیل می‌شود.

$$\sigma_{eq} = 103.7 N_f^{-0.461} + 40.93 \quad (۸-۵)$$

پس از مشخص شدن ضرایب κ, γ, σ_0 برای آزمایش‌هایی که در آنها تنش میانگین غیر صفر

وجود دارد، عمر خستگی را در سمت راست رابطه‌ی (۸-۵) قرار می‌دهیم و تنش معادل را به دست

می‌آوریم. حال از رابطه‌ی (۳-۵) داریم:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)} \quad (۹-۵)$$

بنابر مباحث مطرح شده داریم:

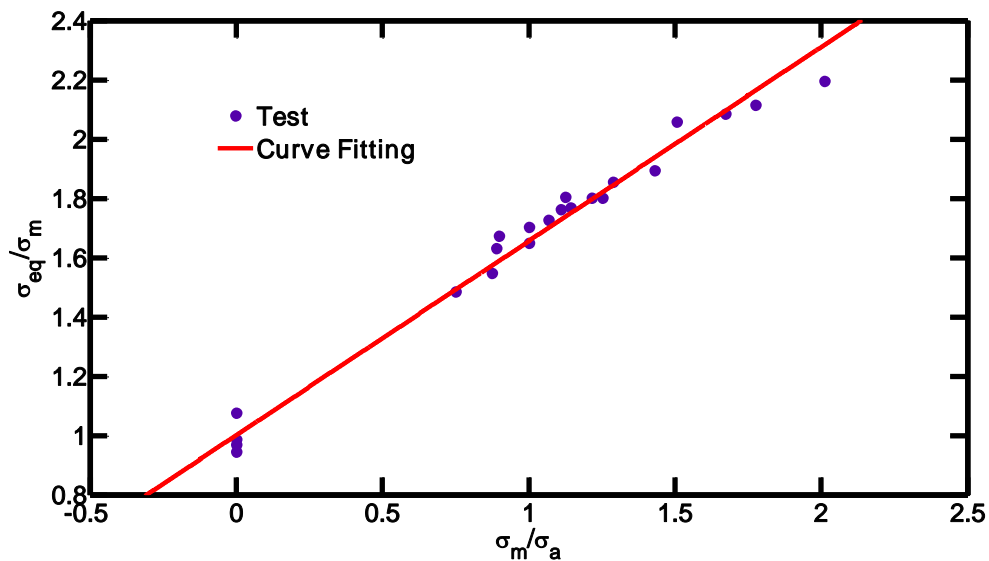
$$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) = 1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \quad (10-5)$$

از ترکیب دو رابطه‌ی (۹-۵) و (۱۰-۵)، رابطه‌ی (۱۱-۵) حاصل می‌شود.

$$\sigma_{eq} = \left(1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) \sigma_a \quad (11-5)$$

حال با برازش یک منحنی از نقاط $\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_a}$ بر حسب $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$ ، مطابق شکل (۳-۵) مقدار η برابر

0.655 به دست خواهد آمد.



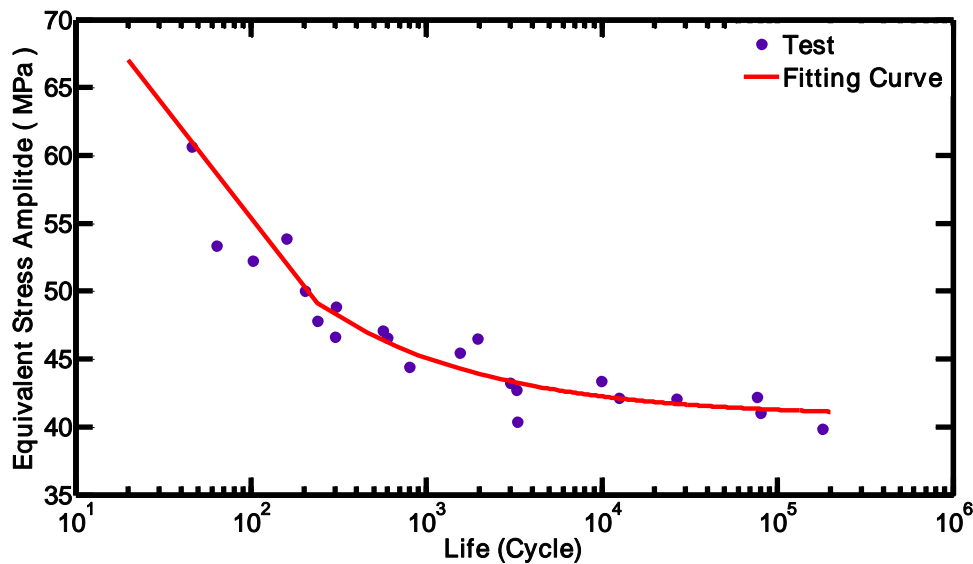
شکل ۳-۵- تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش

بنابراین پیش بینی عمر خستگی برای پلی استال در حالت تنش-کنترل از دیدگاه تنش به

صورت رابطه‌ی (۱۲-۵) خواهد بود.

$$\left(1 + 0.655 \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) \sigma_a = 103.7 N_f^{-0.461} + 40.93 \quad (12-5)$$

این معادله و نتایج آزمایش‌ها در شکل (۴-۵) ترسیم شده‌اند.



شکل ۴-۵- دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی

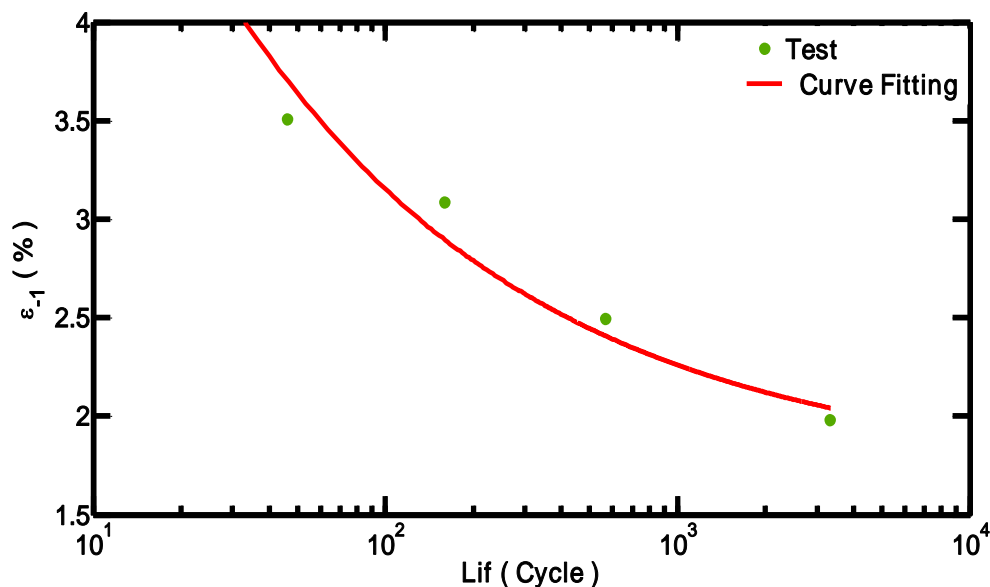
۲-۵- خستگی از دیدگاه کرنش

یکی دیگر از روش‌های بررسی و تحلیل عمر خستگی، بررسی خستگی از دیدگاه کرنش می‌باشد. در این روش نیز همانند دیدگاه تنش از معادله‌ای به شکل زیر همانند رابطه‌ی (۳-۵) برای تعریف کرنش معادل استفاده خواهد شد.

$$\varepsilon_{eq} = \left(1 + \eta \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) \varepsilon_a \quad (13-5)$$

می‌دانیم که در طی آزمایش‌های تنش-کنترل دامنه کرنش و کرنش میانگین مقادیر ثابتی ندارند و همان طور که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای مربوط به آن آورده شد، کرنش میانگین که در این جا همان کرنش رجتینگ می‌باشد، در حال تغییر است. بنابراین برای محاسبات خستگی بر مبنای کرنش در این مطالعه از مقادیر متوسط کرنش میانگین و دامنه کرنش استفاده شده است.

نکته‌ی دیگری که در اینجا باید بدان اشاره کرد، این است که مطابق رابطه‌ی (۵-۱۳) برای آزمایش‌های کاملاً متقارن (آزمایش‌های گروه GT1) مقدار ε_m باید برابر صفر باشد تا $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_a$ و این در حالی است که برای آزمایش‌های گروه GT1 این مقدار صفر نمی‌شود؛ ولی از آنجا که در مقایسه با سایر گروه‌های آزمایش مقدار ε_m برای گروه آزمایش GT1 ناچیز است بنابراین آن را در این مطالعه برابر صفر در نظر می‌گیریم.



شکل ۵-۵- برازش منحنی توانی از دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1

علت غیر صفر شدن مقدار ε_m برای آزمایش‌های کاملاً متقارن را می‌توان ناشی از رابطه‌ی غیر خطی تنش- کرنش پلی استال و همچنین غیرایزوترپ بودن این ماده دانست.

برای بررسی خستگی از دیدگاه کرنش، مشابه رابطه‌ی (۷-۵) می‌توان رابطه‌ای توانی نیز به صورت زیر برای کرنش معادل، در نظر گرفت.

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon_{-1} = \kappa \cdot N_f^\gamma + \varepsilon_0 \quad (14-5)$$

همان طور که در شکل نشان داده شده است با برازش یک منحنی از نقاط گروه آزمایش GT1 رابطه‌ی (۱۴-۵) به صورت رابطه‌ی (۱۵-۵) تکمیل می‌گردد.

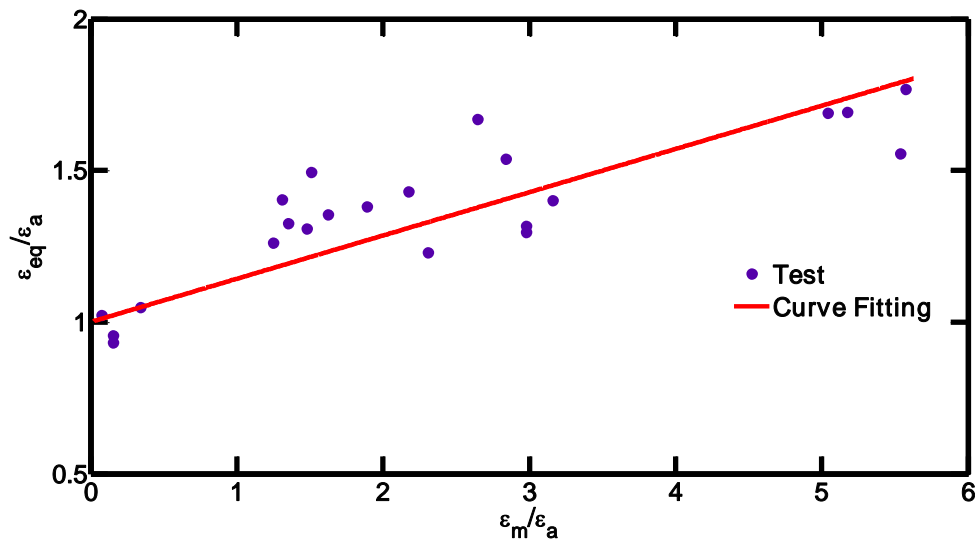
$$\varepsilon_{eq} = 9.921N_f^{-0.421} + 1.7 \quad (15-5)$$

بنابراین مقادیر $\varepsilon_0, \gamma, \kappa$ به ترتیب برابر 1.7, -0.421, 9.921 به دست می‌آیند.

حال با استفاده از رابطه‌ی (۱۵-۵) و جای گذاری عمر خستگی هر آزمایش در سمت راست این معادله اقدام به محاسبه ε_{eq} می‌کنیم.

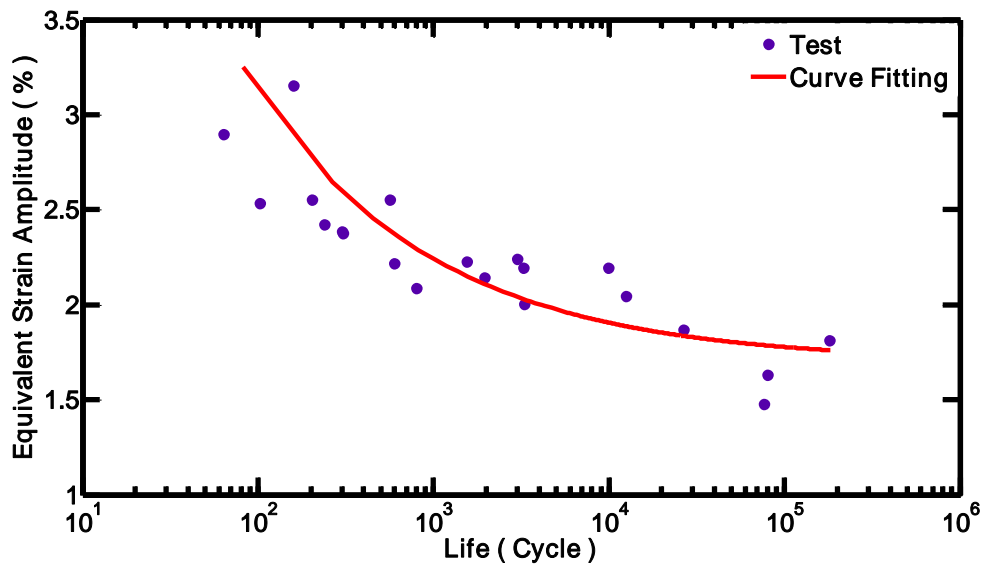
$$f\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) = 1 + \eta \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} \quad (16-5)$$

با محاسبه ε_{eq} و ترسیم $\frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_a}$ بر حسب $\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}$ مطابق شکل (۶-۵) و برازش یک خط به صورت رابطه‌ی (۱۶-۵) مقدار η برابر 0.143 به دست می‌آید.



شکل ۵-۶- تابع کرنش میانگین برای دیدگاه کرنش

با به دست آوردن مقدار η و با استفاده از رابطه‌ی (۵-۱۳) بار دیگر اقدام به محاسبه ε_{eq} نموده و نتایج را بر حسب عمر خستگی هر آزمایش مطابق شکل (۵-۷) ترسیم می‌نماییم.



شکل ۵-۷- دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی

بنابراین رابطه‌ی بین عمر خستگی آزمایش‌های تنش-کنترل از دیدگاه کرنش به صورت رابطه‌ی (۵-۱۷) به دست می‌آید.

$$\left(1 + 0.143 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) \varepsilon_a = 9.921 N_f^{-0.421} + 1.7 \quad (17-5)$$

۵-۳- خستگی از دیدگاه انرژی

بررسی خستگی از دیدگاه انرژی کرنشی تا حدودی متفاوت از دو دیدگاه قبلی می‌باشد. چرا که در هر یک از دیدگاه‌های تنش و یا کرنش محاسبات انجام شده فقط بر مبنای یک کمیت است. به طور مثال چنانچه از دیدگاه تنش به مسئله‌ی خستگی بپردازیم، محاسبات ما فقط بر مبنای مقادیر تنش در طول انجام آزمایش می‌باشد و مقادیر کرنش عملاً تاثیری بر نتایج نخواهند داشت.

این مسئله برای موادی که رابطه‌ی تنش-کرنش آنها خطی است (همانند فلزات)، شاید چندان حائز اهمیت نباشد؛ اما وقتی که رابطه تنش-کرنش ماده غیر خطی باشد، همانند مواد پلیمری این امر بیشتر نمایان خواهد شد.

بنابراین برتری دیدگاه انرژی بر دو دیدگاه دیگر دخالت هر دو کمیت تنش و کرنش در محاسبات می‌باشد. این به معنای دخالت دادن رابطه‌ی تنش-کرنش در بررسی خستگی می‌باشد.

حال به بررسی چگونگی محاسبات خستگی از دیدگاه انرژی خواهیم پرداخت.

رابطه‌ای که برای تابع تنش میانگین از دیدگاه انرژی تعریف می‌شود به صورت زیر است.

$$\Delta W_{eq} - \Delta W_{avg}^d = \left(1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) \Delta W_{avg}^e \quad (18-5)$$

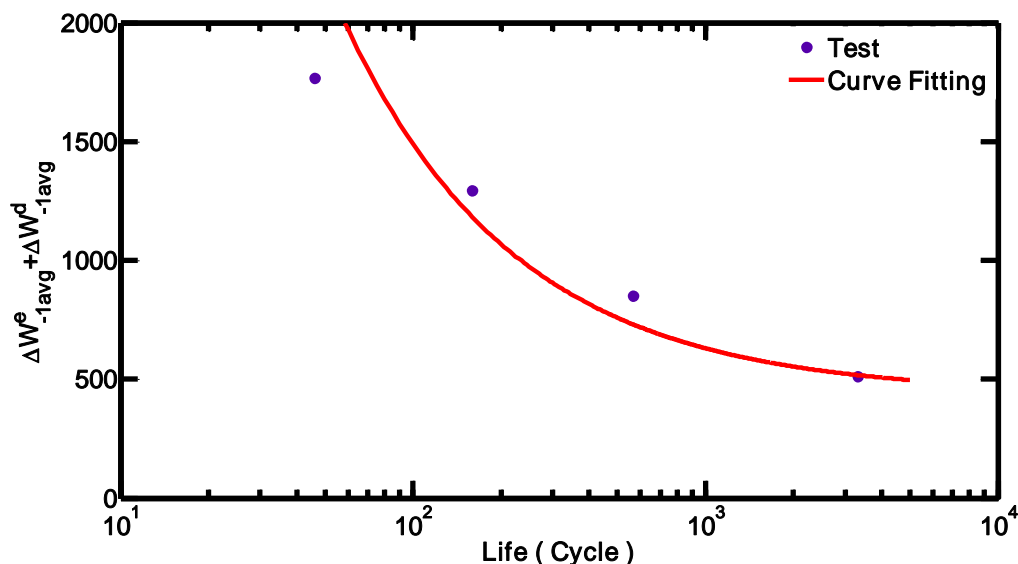
همانند دو دیدگاه تنش و کرنش در اینجا نیز رابطه‌ای توانی به صورت زیر برای ارتباط انرژی کل با عمر خستگی در نظر گرفته می‌شود.

$$\Delta W_{eq} = \Delta W_{-1avg}^d + \Delta W_{-1avg}^e = \kappa \cdot N_f^\gamma + \Delta W_0 \quad (19-5)$$

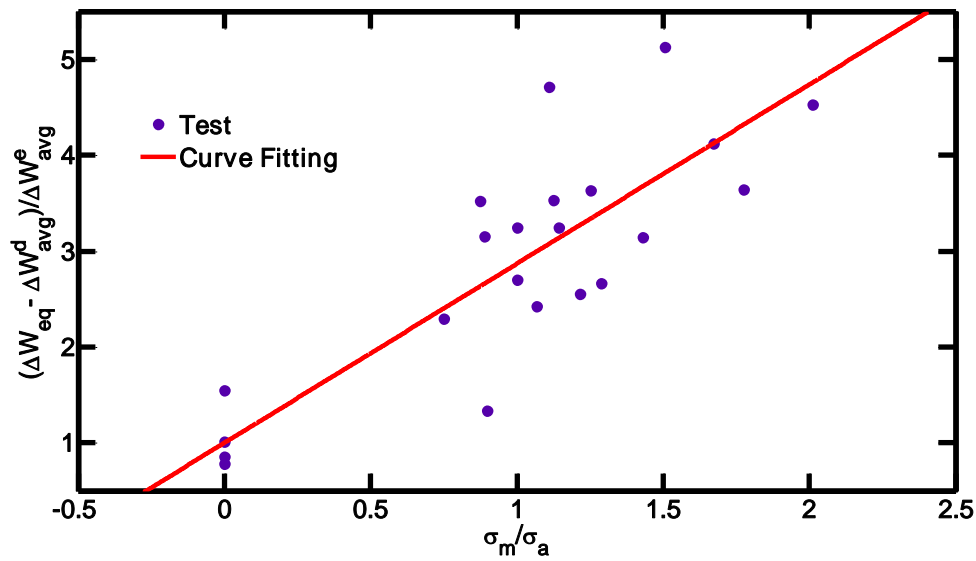
با استفاده از نتایج آزمایش‌های کاملاً متقارن و رابطه‌ی (۱۹-۵) مطابق شکل (۸-۵) منحنی را بر نقاط آزمایش‌های تجربی برازش می‌دهیم که نتیجه به دست آمدن ضرایب مجهول رابطه‌ی (۱۹-۵) می‌باشد. بنابراین رابطه‌ی مذکور به صورت زیر تکمیل می‌گردد.

$$\Delta W_{eq} = 31350 N_f^{-0.747} + 438 \quad (20-5)$$

حال با استفاده از رابطه‌ی (۲۰-۵) مقادیر ΔW_{eq} را برای هر آزمایش محاسبه و مطابق شکل (۹-۵) اقدام به ترسیم نقاط $(\Delta W_{eq} - \Delta W_{avg}^d) / \Delta W_{avg}^d$ بر حسب $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$ می‌نماییم و با برازش یک خط از نقاط مذکور مقدار η در رابطه‌ی (۱۸-۵) برابر 1.868 به دست می‌آید.



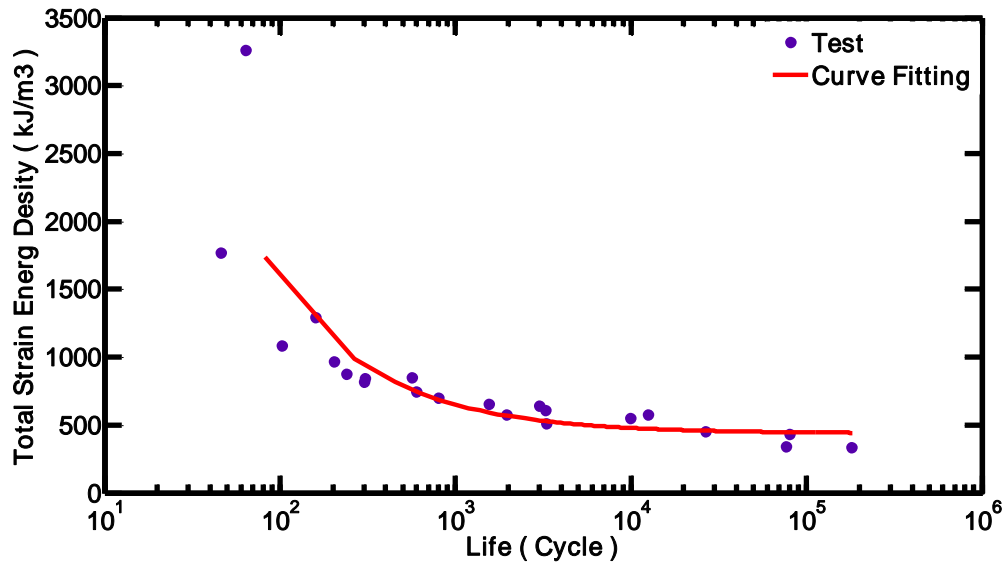
شکل ۸-۵- برازش منحنی توانی از انرژی کرنشی معادل بر حسب عمر خستگی برای گروه آزمایش GT1



شکل ۵-۹- تابع تنش میانگین برای دیدگاه انرژی

با به دست آمدن مقدار η و با استفاده از رابطه‌ی (۵-۱۸) مقادیر ΔW_{eq} را محاسبه و بر حسب

عمر خستگی در شکل (۵-۱۰) ترسیم می‌نماییم.



شکل ۵-۱۰- چگالی انرژی کرنشی کل بر حسب عمر خستگی

بنابراین رابطه‌ی بین عمر خستگی آزمایش‌های تنش-کنترل از دیدگاه انرژی به صورت رابطه‌ی (۲۱-۵) به دست می‌آید.

$$\Delta W_{avg}^d + \left(1 + 1.868 \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) \Delta W_{avg}^e = 31350 N_f^{-0.747} + 438 \quad (21-5)$$

برای مقایسه نتایج پیش‌بینی‌های خستگی هر یک سه دیدگاه مطرح شده از رابطه‌ی (۲۲-۵) که بیان‌کننده ضریب همبستگی می‌باشد استفاده می‌شود.

$$R = \frac{\sum_i (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_i (A_i - \bar{A})^2\right)\left(\sum_i (B_i - \bar{B})^2\right)}} \quad (22-5)$$

که در آن A, B دو بردار هم‌اندازه می‌باشند و \bar{A}, \bar{B} به ترتیب مقادیر میانگین بردارهای A, B می‌باشند. در اینجا A مقادیر تجربی پارامتر آسیب و B مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی مربوطه می‌باشد. با مقایسه نتایج پیش‌بینی‌های خستگی از دیدگاه‌های تنش، کرنش و انرژی پر واضح است که دیدگاه‌های انرژی و تنش عملکرد بهتری نسبت به دیدگاه کرنش دارند. در جدول (۱-۵) ضرایب هر یک از روابط پیش‌بینی عمر خستگی پلی‌استال از سه دیدگاه تنش، کرنش و انرژی آورده شده.

جدول ۱-۵- ضرایب روابط پیش‌بینی‌کننده عمر خستگی از دیدگاه‌های تنش، کرنش و انرژی

	η	K	γ	σ_0	ε_0	ΔW_0	R
دیدگاه تنش	0.655	103.7	-0.461	40.9	-	-	0.9554
دیدگاه کرنش	0.143	9.921	-0.421	-	1.7	-	0.8976
دیدگاه انرژی	1.868	31350	-0.747	-	-	438	0.9583

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام آزمایش‌های کشش ساده، فشار، تنش-کنترل و کرنش-کنترل بر روی ماده پلیمری پلی استال نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱) پلی استال ماده ایست که رفتار آن در کشش و فشار با یکدیگر متفاوت است.
- ۲) در سطوح تنش کمتر از تنش تسلیم، می‌توان گفت که رفتار تحت بارگذاری پلی استال مستقل از سرعت بارگذاری است.
- ۳) در آزمایش‌های تنش-کنترل، با کاهش دامنه تنش اعمالی، حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش لاغرتر می‌شوند.
- ۴) در آزمایش‌های تنش-کنترل، با کاهش تنش میانگین اعمالی، حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش لاغرتر می‌شوند.
- ۵) با کاهش دامنه تنش اعمالی و تنش میانگین ثابت، بزرگی نرخ کرنش رجتینگ کاهش می‌یابد.
- ۶) با کاهش تنش میانگین اعمالی و دامنه تنش ثابت، بزرگی نرخ کرنش رجتینگ کاهش می‌یابد.
- ۷) به طور کلی با کاهش دامنه تنش و ثابت ماندن تنش میانگین، مقدار کرنش رجتینگ افزایش می‌یابد.
- ۸) به طور کلی با کاهش تنش میانگین و ثابت ماندن دامنه تنش، مقدار کرنش رجتینگ کاهش می‌یابد.
- ۹) در آزمایش‌های تنش-کنترل با افزایش تنش میانگین یا دامنه تنش و ثابت ماندن دیگری حدود تغییرات کرنش افزایش می‌یابد.

۱۰) در آزمایش‌های تنش-کنترل با افزایش تنش میانگین یا دامنه تنش و ثابت ماندن

دیگری چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده افزایش می‌یابد

۱۱) در آزمایش‌های تنش-کنترلی که تنش میانگین بزرگتر از صفر دارند، چگالی انرژی

کرنشی اتلاف شده ابتدا روند کاهشی دارد و در اواخر عمر نمونه به شدت روند افزایشی

در پیش می‌گیرد.

۱۲) تغییرات دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک برای آزمایش‌های تنش-کنترل نامنظم

است؛ ولی به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش شماره سیکل روند افزایش از خود

نشان می‌دهد.

۱۳) در آزمایش‌های تنش-کنترل با کاهش دامنه تنش یا تنش میانگین و ثابت ماندن

دیگری شیب حلقه‌های هیستریزیس افزایش می‌یابد و همواره نرخ تغییراتش منفی

است.

۱۴) با توجه به شکل حلقه‌های هیستریزیس آزمایش‌های کرنش-کنترل، رفتار نرم

شوندگی سیکلی پلی استال به روشنی اثبات می‌شود.

۱۵) در همه‌ی آزمایش‌های کرنش-کنترل جز برای آزمایش‌های کاملاً متقارن، رهایش

تنش میانگین رخ می‌دهد.

۱۶) برای آزمایش‌های تنش-کنترلی که در آنها $R = -1$, $R = -0.5$ می‌باشد پس از

حدود یکصد سیکل، مقادیر حداکثر و حداقل تنش به یک مقدار پایدار می‌رسند؛ اما

این حالت پایدار برای آزمایش‌هایی با $R = 0$, $R = 0.25$ قابل مشاهده نیست.

۱۷) چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده برای همه‌ی آزمایش‌های کرنش-کنترل از خود روند

کاهشی به نمایش می‌گذارد.

۱۸) دامنه چگالی انرژی کرنشی الاستیک نیز برای همه‌ی آزمایش‌های کرنش-کنترل جز

$R = 0.25$ که به طور کلی ثابت است، دارای روند نزولی است.

۱۹) شیب حلقه‌های هیستریزیس در آزمایش‌های کرنش-کنترل جز برای دو آزمایش S15 و S16 روند نزولی دارد.

۲۰) دیدگاه‌های تنش و انرژی در پیش‌بینی عمر خستگی توفیق بیشتری نسبت به دیدگاه کرنش دارند.

۷-۲- پیشنهادها

موارد زیر به منظور ادامه و تکمیل این پژوهش پیشنهاد می‌گردد:

- انجام آزمایش‌های مشابه بر روی سایر پلیمرها
- انجام آزمایش‌های مشابه بر روی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمر
- استفاده از مدل‌های پلاستیسیته پیشرفته به منظور بررسی تحلیلی رفتار پلی استال
- استفاده از داده‌های این پژوهش در یک مدل ویسکوپلاستیک، برای مدل سازی رفتار پلی استال تحت بارگذاری‌های سیکلی که از معیار تسلیم دارکر-پراگر به منظور تعریف سطح تسلیم استفاده می‌کند.
- بررسی رفتار رچتینگ پلی استال تحت بارگذاری سیکلی دو و چند محوره
- بررسی رفتار رچتینگ پلی استال در دماهای مختلف تحت بارگذاری سیکلی تک محوره
- تهیه یک کد کامپیوتری و استفاده از معیار دارکر پراگر به منظور تحلیل اجزاء محدود پلی استال تحت بارگذاری‌های سیکلی
- بررسی اثر رچتینگ محوری بر خستگی پیچشی پلی استال

مراجع

- [1] A.Kumar and R.K.Gupta, *Fundamental of polymer engineering*, Marcel Dekker Inc., New York, 2003
- [2] T.A.Osswald and G.Menges, *Material science of polymers for engineers*, Hanser, Munich, Germany, 2003
- [3] M.E.Tuttle, *Structural analysis of polymeric composite material*, Marcel Dekker Inc., New York, 2003
- [4] J. Mohanraj, et al., *Plastic deformation and damage of polyoxymethylene in the large strain range at elevated temperatures*, Polymer 47 (2006) 5852-5861
- [5] Y. Yamada (chief Ed.), *Materials for Springs*, Springer, New York
- [6] C.-B. Lim, K.S. Kim, J.B. Seong, *Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress*, International Journal of Fatigue 31 (2009) 501–507
- [7] X. Yang, *Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading*, International Journal of Fatigue 27 (2005) 1124–1132
- [8] K.H. Nip, L. Gardner, C.M. Davies, A.Y. Elghazouli, *Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel*, Journal of Constructional Steel Research 66 (2010) 96_110
- [9] H. Gao, X. Chen, *Effect of axial ratcheting deformation on torsional low cycle fatigue life of lead-free solder Sn–3.5Ag*, International Journal of Fatigue 31 (2009) 276–283
- [10] G.Chen et al, *Ratcheting and fatigue properties of the high-nitrogen steel X13CrMnMoN18-14-3 under cyclic loading*, Computational Materials Science xxx (2009) xxx–xxx
- [11] X. Chena et al, *Experimental study on ratcheting behavior of eutectic tin–lead solder under multiaxial loading*, Materials Science and Engineering A 406 (2005) 86–94
- [12] G. Kang et al, *Experimental study on ratchetting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing*, Materials Science and Engineering A 435–436 (2006) 396–404
- [13] G. Tao, Z. Xia, *Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin*, Int.J. Fatigue, 2007, doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.12.009.
- [14] G. Tao, Z. Xia, *Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life*, Polymer Testing 26 (2007) 451–460

- [15] X. Chen, S. Hui, *Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression*, Polymer Testing 24 (2005) 829–833
- [16] Z. Zhang, X. Chen, *Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature*, Polymer Testing 28 (2009) 288–295
- [17] W. Liu et al, *Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA*, Materials Science and Engineering A 492 (2008) 102–109
- [18] G.Bles et al, *Experimental study of a PA66 solid polymer in the case of cyclic shear loading*, Arch. Mech., 54, 2, pp. 155-174, Warszawa 2002
- [19] A. Avanzini, *Mechanical characterization and finite element modeling Molecular weight polyethylene*, Materials and Design 29 (2008) 330–343
- [20] A. Ramkumar a, R. Gnanamoorthy, *Axial fatigue behaviour of polyamide-6 and polyamide-6 nanocomposites at room temperature*, Composites Science and Technology 68 (2008) 3401–3405
- [21] P.K. Mallick, Yuanxin Zhou, *Effect of mean stress on the stress-controlled fatigue of a short E-glass fiber reinforced polyamide-6,6*, International Journal of Fatigue 26 (2004) 941–946
- [22] G. Tao, Z. a Xia, *Biaxial fatigue behavior of an epoxy polymer with mean stress effect*, International Journal of Fatigue 31 (2009) 678–685
- [23] R.W. Meyer, LA. Pruitt, *The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene*. Polymer 2001 ;42:5293–306.
- [24] M. Niinomi et al, *Fatigue characteristics of ultra high molecular weight polyethylene with different molecular weight for implant material*. J Mater Sci: Mater Med 2001;12:267–72.
- [25] I. Urries et al, *Comparative cyclic stress–strain and fatigue resistance behavior of electron-beam- and gamma-irradiated ultrahigh molecular weight polyethylene*. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater 2004;70B:152–60.
- [26] ASM Metals Handbook, *Fatigue and fracture mechanics*, Vol. 19, 10th Ed., (1979)
- [27] Y.L. Lee, et al., *Fatigue testing and analysis (Theory and Practice)*, Burlington, Elsevier, (2005)
- [28] Guozheng Kang, *Ratchetting: Recent progresses in phenomenon observation constitutive modeling and application*, International Journal of Fatigue 30 (2008) 1448–1472

-
- [29] F. Ellyin, *Fatigue Damage, Crack Growth, and Life Prediction*, Chapman & Hall, London, UK, 1997 (Chapter 5)
- [30] D. Kujawski, F. Ellyin, *A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions*. Int J Fatigue 1995;17(2):101–6.
- [31] C.R. Soderberg, V. Sweden, *Factor of safety and working stress*. ASME Trans, AER-IS 1930;52(2):13–28.
- [32] J. Goodman, *Mechanics applied to engineering*. London: Longmans, Green and Company; 1899.
- [33] H. Gerber, *Bestimmung der zulässigen Spannungen in eisen Constructionen*. Z Bayer Arch Ing Ver 1874;6:101–10.
- [34] J. Morrow, *Internal friction, damping, and cyclic plasticity*. ASTM STP, vol. 378. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1965. p. 45–87.
- [35] J.A. Sauer et al, *Fatigue behavior of polystyrene and effect of mean stress*. J Macromol Sci Phys 1976;B12(4):535–62.

Abstract

Due to importance of fatigue phenomenon in the engineering design and unknowing the low cycle fatigue and on the other hand the increasing application of polymeric materials and the limited polymeric material fatigue data, this thesis is investigated the experimental behavior of polymeric material fatigue and ratcheting polyacetal (POM).

At first, in order to obtain mechanical properties of polyacetal, simple tension and pressure tests were performed. Then polyacetal was placed under the stress-controlled uniaxial cyclic loadings. Force and displacement information of all cycles data recorded and then by using them, stress and strain were calculated. Finally, specified that the magnitude of ratcheting strain and rate of ratcheting strain is sensitive to applied mean stress and stress amplitude. In fact, reducing the stress amplitude, reduces the rate of ratcheting strain and increases its value. The mentioned material were placed under cyclic loadings strain-controlled uniaxial. Also it's determined that polyacetal is indicated the softening behavior under the cyclic loading.

Using the results of stress-control tests and utilization of the three fatigue approach of stress, strain and energy, fatigue life of this material is analysed. The stress and energy approach have more success in prediction of fatigue life of polyacetal.

Keywords: Polyacetal, Uniaxial Fatigue, Ratcheting Strain, Stress-Control Test, Strain-Control Test



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

Fatigue and Ratcheting Behavior of Polymeric Specimen of POM under Uniaxial Cyclic Loading

Hossein Yarahmadi

Supervisors:

Dr. Mahmood Shariati
Dr. Hamidreza Epakchi

January 2011