



بررسی تجربی تأثیر اندازه شعاع گشودگی بر رفتار رچتینگ ورق‌های مستطیلی حاوی گشودگی تحت بارگذاری محوری سیکلی

محمود شریعتی^۱، روح‌الله درزی نفت‌چالی^۲، جواد یزدان‌نژاد^۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

خستگی ورق‌های موجود در سیستم‌های راکتور سریع، بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. همچنین دیت (Date) و همکاران [۴] به منظور طراحی راکتور زاینده سریع (fast breeder reactor) تحت بار حرارتی و تغییر شکل پیش‌روندۀ با سیکل‌های بارگذاری و خرابی خستگی خوشی، اثر رچتینگ بر عمر خستگی و خستگی خوشی (creep-fatigue) ورق‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶FR را مورد آزمایش قرار دادند. در سال چاری، چن (Chen) و همکاران [۵] قطر و مکان گشودگی بهینه را برای کاهش محدوده کرنش پلاستیک نوک ترک، بصورت تجربی تعیین کردند. یور (Ure) و همکاران [۶] یک روش مستقیم جهت یافتن حد مرزی رچتینگ بالا و پایین ارائه دادند و بعنوان نمونه حدود مزبور را برای ورق حاوی گشودگی مرکزی تعیین کردند. شریعتی و همکاران [۷] نیز رفتار رچتینگ و خستگی نمونه‌های پلی‌استال را تحت بارگذاری سیکلی محوری بصورت تجربی بررسی کردند. ایشان در کار خود ترکیب‌های مختلفی از تنش میانگین و دامنه تنش را در نظر گرفتند و در نهایت دریافتند که کرنش رچتینگ و تغییرات آن به مقادیر تنش میانگین و دامنه تنش مرتبط می‌باشدند. همچنین ایشان [۸] به بررسی تجربی و عددی رفتار نرم-شدگی مواد POM تحت بارگذاری سیکلی کرنش-کنترل تکمحوره متقارن پرداختند. ایشان در این مقاله، رفتار تنش-کرنش سیکلی (خستگی) مواد مذکور را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها را با نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) مقایسه کردند.

با توجه به مقالات مرور شده، تاکنون مطالعات خاصی در زمینه‌ی بررسی تأثیر اندازه گشودگی‌ها بر رفتار رچتینگ ورق‌های مستطیلی تحت بارهای متناوب انجام نشده است.

در این مقاله به کمک ورق‌هایی با شعاع گشودگی مختلف، اثر اندازه شعاع گشودگی بر رفتار رچتینگ ورق‌های مستطیلی حاوی گشودگی، تحت بارگذاری سیکلی بررسی شده است. جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه سرو-هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ (Servo-Hydraulic INSTRON) استفاده شده است. بارگذاری بصورت تنش-کنترل، با نرخ تنش ثابت آمده نشان می‌باشد که با افزایش شعاع گشودگی عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کرنش رچتینگ و تغییرات آن و همچنین مقادیر کرنش در نمودارهای تنش-کرنش، شدیداً تحت تأثیر اندازه قطر گشودگی قرار دارند.

خواص مکانیکی ورق‌های مورد آزمایش

جهت تعیین خواص مکانیکی ورق‌های مورد آزمایش، تست کشش محوری انجام شده است. تست کشش بر روی نمونه استاندارد ASTM E8، توسط دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ انجام گرفت که شکل (۱) نحوه بستن نمونه و

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر اندازه شعاع گشودگی بر رفتار رچتینگ ورق‌های مستطیلی حاوی گشودگی دایروی تحت بارگذاری سیکلی پرداخته شده است. بار محوری سیکلی با نرخ ثابت ۲۳۰ MPa/sec بصورت تنش-کنترل، روی تمام نمونه‌ها به طور یکسان اعمال شده است. کلیه آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سرو-هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و در دمای محیط صورت گرفته است. شرایط مرزی ورق‌های آزمایش شده بصورت دو لبه گیردار و دو لبه دیگر آزاد می‌باشند. جهت انجام بررسی، از ورق‌های مستطیلی با طول، عرض و ضخامت یکسان که دارای گشودگی‌هایی به قطر مختلف می‌باشند، استفاده شده است. نمودارهای کرنش رچتینگ و تغییرات آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری و همچنین نمودارهای تنش-کرنش حقیقی برای همه نمونه‌ها ترسیم شده‌اند. نمودارهای بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش شعاع گشودگی عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کرنش رچتینگ و تغییرات آن و همچنین مقادیر کرنش در نمودارهای تنش-کرنش، شدیداً تحت تأثیر اندازه قطر گشودگی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: تست تجربی- رچتینگ- بارگذاری سیکلی- ورق مستطیلی حاوی گشودگی دایروی- شعاع گشودگی

مقدمه

ورق‌های حاوی گشودگی در کاربردهای متنوع صنعتی قابل مشاهده می‌باشند. این گشودگی‌ها ممکن است برای اتصالات، نگهداری و یا کاهش تمرکز تنش ایجاد شوند که در بسیاری از این موارد، ورق تحت بارهای نوسانی می‌باشد. از این رو بررسی خستگی در چنین ورق‌هایی حائز اهمیت می‌باشد.

خواص پدیده خستگی، به کمک آزمون‌های خستگی پرتکرار (High- cycle fatigue) (در تغییر شکل‌های الاستیک) و یا کم تکرار (Low- cycle fatigue) (در تغییر شکل‌های پلاستیک) تعیین می‌گردد. رچتینگ (Ratcheting) که بصورت انباشگی (Accumulation) سیکل به سیکل کرنش پلاستیک در سازه‌های تحت بارگذاری سیکلی با دامنه تنش ثابت و تنش میانگین غیرصرف تعریف می‌شود، در خستگی‌های کم- تکرار قابل مشاهده است [۱]. برای ایجاد این پدیده، تنش اعمالی باید فراتر از تنش تسليم سازه باشد. رچتینگ می‌تواند عمر خستگی (Fatigue) سازه را کاهش دهد، و یا منجر به خرابی سیستم تحت ارتعاش یا بارگذاری سیکلی شود. بنابراین پدیده مذکور، پارامتر مهمی در پیش‌بینی عمر خستگی سازه‌های مهندسی می‌باشد [۲].

در سالهای اخیر پدیده مذکور مورد توجه خاصی قرار گرفت. در سال ۲۰۰۸ ایسوپی (Isobe) و همکاران [۳] اثر رچتینگ را بر مقاومت

۱- استاد دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، rohollahdarzi@gmail.com (نویسنده مخاطب)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد

$$\delta \varepsilon_r^n = \frac{\varepsilon_r^n - \varepsilon_r^{n-i}}{i} \quad (3)$$

نتایج و بحث

پس از اعمال بار سیکلی بر ورق های مورد آزمایش، ترک هایی در دو ناحیه چپ و راست گشودگی مربوطه ایجاد می شوند. این ترک ها در راستای افقی تا زوال کامل قطعه رشد می کنند. شکل های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) به ترتیب، نحوه ایجاد و رشد ترک را برای نمونه های PL1، PL2 و PL3 نشان می دهند.

از مقایسه شکل های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) - با توجه به این که ابعاد اولیه ورق ها و بارگذاری ها کاملاً مشابه می باشند - می توان دریافت افزایش شعاع گشودگی منجر به تغییر شکل نهایی کمتری (کرنش رچتینگ نهایی کمتر) در ورق تحت بار سیکلی می شود.

با اعمال بار مشابه روی ورق ها، نمونه های PL2، PL3 به ترتیب پس از ۲۴۹، ۸۴۹ و ۱۰۱ سیکل زوال یافته اند. بنابراین، با افزایش شعاع گشودگی عمر سازه ای تحت بارگذاری سیکلی، بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. به همین دلیل، گشودگی های ایجاد شده در ورق ها، با اختلاف قطر کمی انتخاب شده اند تا بتوان در شرایط یکسان بارگذاری و گشودگی دایروی بررسی کرد.

با توجه به روابط ۲ و ۳ و داده های تنش، کرنش و موقعیت ثبت شده در هر سیکل از آزمایش ها، نمودارهای کرنش رچتینگ و تغییرات آن بر حسب تعداد سیکل به همراه نمودارهای تنش بر حسب کرنش حقیقی برای همه نمونه ها، در شکل های ۶ تا ۱۴ آمده است.

نمودارهای کرنش رچتینگ برای ورق های با شعاع گشودگی ۳۶/۵ و ۳۹/۲ به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ ترسیم شده اند. شکل های ۹ و ۱۱ نیز تغییرات کرنش رچتینگ را بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای ورق های مذکور نشان می دهند.

نمودارهای تنش بر حسب کرنش حقیقی در سیکل های مختلف بارگذاری، برای نمونه های PL1 و PL2 و PL3 به ترتیب در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده اند.

با توجه به نمودارهای بدست آمده، نتایج زیر دریافت می شود:

- ۱ با افزایش شعاع گشودگی عمر خستگی نمونه ها کاهش می یابد.
- ۲ مقدار کرنش رچتینگ در ۵ سیکل اول، برای PL1، ۱/۶۱ برابر PL2 و برای PL3، ۱/۱۲ برابر PL2 می باشد.

-۳ در سیکل شکست، مقدار کرنش رچتینگ برای PL2 بیشتر از PL1 است. اما این پارامتر برای PL3، از 2 کمتر می باشد.

-۴ با افزایش قطر گشودگی، مقدار تغییرات کرنش رچتینگ در ابتدای نزول کرده، سپس این تغییرات تقریباً ثابت شده و در سیکل شکست، صعود چشمگیری از خود نشان می دهد.

-۵ با توجه به نمودارهای تنش - کرنش، تغییر شکل نمونه ها در ابتدای زیاد است. سپس از شدت این تغییرات کاسته می شود، تا اینکه در سیکل های انتهایی این تغییرات دوباره افزایش می یابد. این تغییرات با افزایش شعاع گشودگی بیشتر می شود.

انجام آزمایش را نشان داده است. شکل (۲) نیز شمای کلی دستگاه اینسترون را نشان می دهد.

با توجه به داده های آزمایشگاهی، خواص مکانیکی ورق بصورت

جدول (۱) تعیین می گردد:

جدول ۱- خواص مکانیکی ماده

| V | E(GPa) | σ_y (MPa) | σ_{ult} (MPa) |
|------|--------|------------------|----------------------|
| ۰/۳۳ | ۲۱۷ | ۴۵ | ۵۴ |

هندسه و شرایط مرزی ورق های مورد آزمایش

جهت انجام بررسی، از ورق هایی با طول اسمی ۱۲۰، عرض اسمی ۱۰۰ و ضخامت اسمی ۲.۱ میلی متر، که دارای گشودگی هایی به قطر ۳۶/۵، ۳۴ و ۳۹/۲ در مرکز ورق می باشند، استفاده شده است.

جهت اعمال بار متناظر یکنواخت کششی، به کمک فک های مخروطی (مطابق شکل (۳)) دو لبه ورق درگیر شده است و دو سوی دیگر آزاد (CFCF) می باشند. به این ترتیب نیروهای گسترده به لبه های بالایی و پایینی ورق وارد می شود.

نحوه انجام آزمایش

جهت بررسی تأثیر اندازه گشودگی از ورق هایی با گشودگی هایی به قطر ۳۶/۵، ۳۴ و ۳۹/۲ (PL2) و (PL3) مورد آزمایش قرار گرفته اند. مقادیر مربوط به بارگذاری نمونه ها، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقادیر مربوط به پارامترهای بارگذاری اعمالی

| فرکانس | دامنه نیروی متوسط (kN) | نیروی متوسط (kN) | نمونه |
|--------|------------------------|------------------|-------|
| ۰/۵۲۲۸ | ۲۳/۵۶ | ۲۹/۲۵ | PL1 |
| ۰/۵۲۲۸ | ۲۳/۵۶ | ۲۹/۲۵ | PL2 |
| ۰/۵۲۲۸ | ۲۳/۵۶ | ۲۹/۲۵ | PL3 |

جهت انجام کلیه آزمایش ها از دستگاه سرو- هیدرولیک اینسترون

استفاده شده است.

قابل ذکر است کلیه آزمایش ها بصورت تنش- کنترل و در دمای

محیط انجام شده اند.

شکل ۴ بارگذاری سیکلی اعمالی در PL3 نشان می دهد. بارگذاری

مربوط به سایر ورق ها نیز مشابه شکل ۴ می باشد.

فرکانس بارگذاری با توجه به رابطه زیر تعیین می شود:

$$\Omega = \frac{\dot{\sigma}}{4F_{amp}} \quad (1)$$

در رابطه فوق $\dot{\sigma}$ نرخ بارگذاری می باشد که در این مقاله، برابر مقدار ثابت ۲۳۰MPa/sec در نظر گرفته شده است. F_{amp} نیز دامنه نیرو می باشد.

کرنش رچتینگ (ϵ_r) در هر سیکل، مقدار میانگین کرنش در آن سیکل می باشد. به زبان ریاضی داریم [۷]:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{max} + \epsilon_{min}}{2} \quad (2)$$

ϵ_{min} ، ϵ_{max} بیشترین و کمترین کرنش در هر سیکل می باشند.

نرخ کرنش رچتینگ بین سیکل n و سیکل n-1 برابر است با:



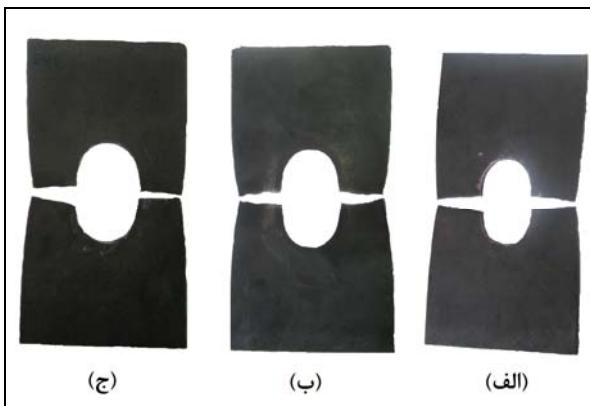
نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله اثر اندازه گشودگی بر رفتار رچتینگ ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری سیکلی بررسی شده است. جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه سرو-هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شعاع گشودگی عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کرنش رچتینگ و تغییرات آن و همچنین مقادیر کرنش در نمودارهای تنش-کرنش، شدیداً تحت تأثیر اندازه قطر گشودگی قرار دارند.

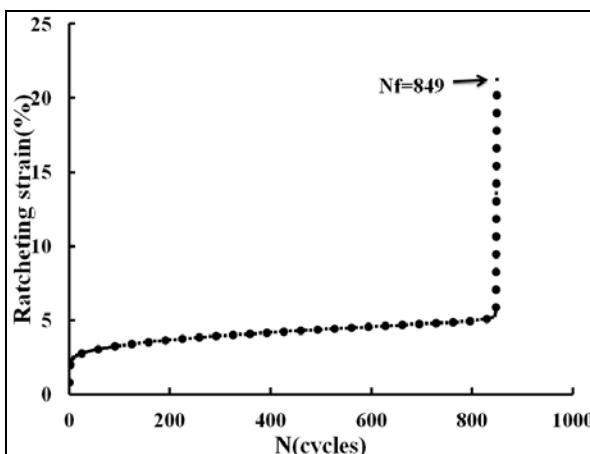
شکل‌ها و نمودارها



شکل ۱: نمونه تست کشش استاندارد در دستگاه اینسترون ۸۸۰۲



شکل ۵- نحوه ایجاد و رشد ترک در ورق بدون گشودگی (الف) و با گشودگی دایروی مرکزی به قطر ۱۰ میلی‌متر (ب)



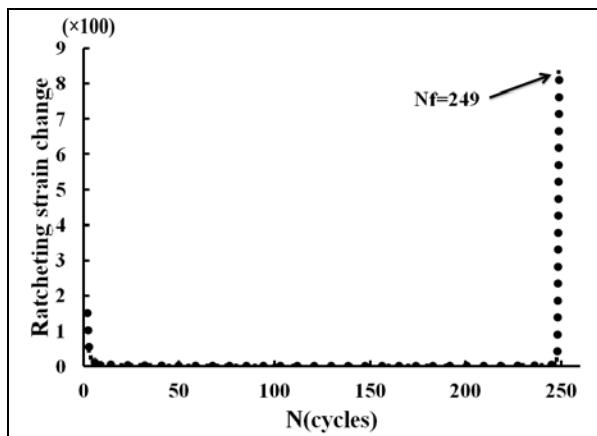
شکل ۶- نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL1



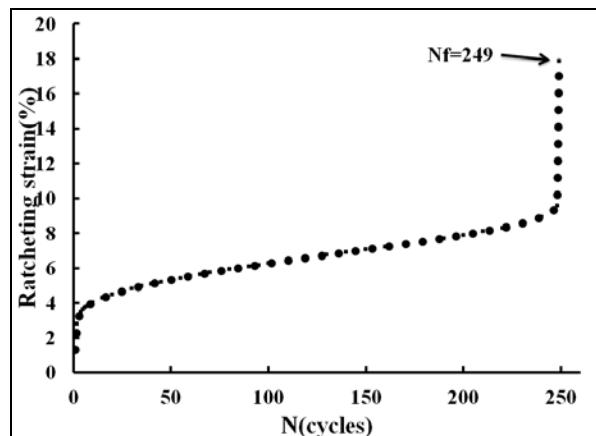
شکل ۲: شمای کلی دستگاه سرو-هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲



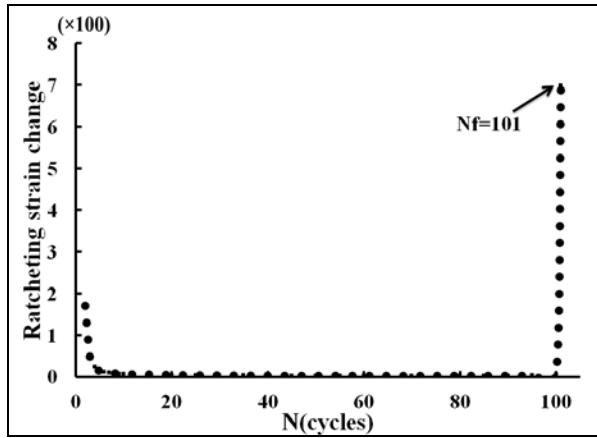
شکل ۳: نمونه بسته شده به فک مخروطی هیدرولیکی در دستگاه اینسترون ۸۸۰۲



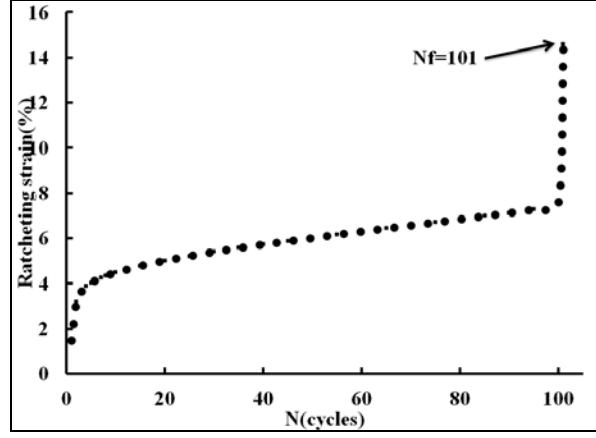
شکل ۶- نمودار تغییرات کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL2



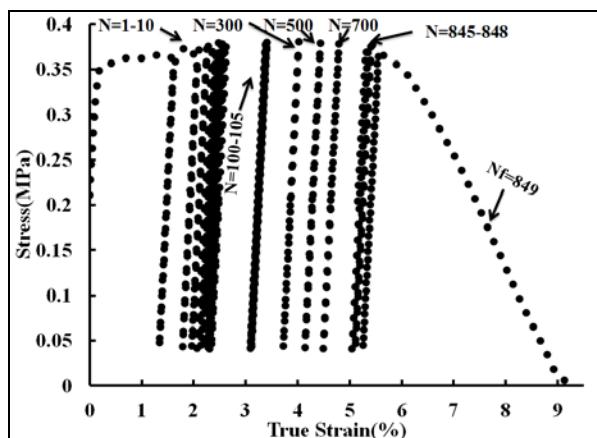
شکل ۷- نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL2



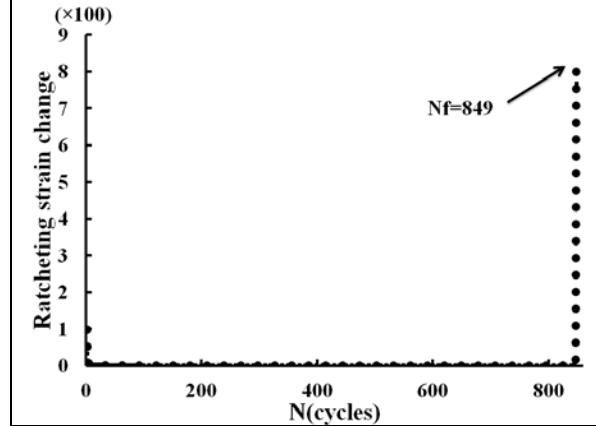
شکل ۱۱- نمودار تغییرات کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL3



شکل ۸- نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL3



شکل ۱۲- نمودار تنش بر حسب کرنش حقيقی در سیکلهای مختلف بارگذاری برای PL1

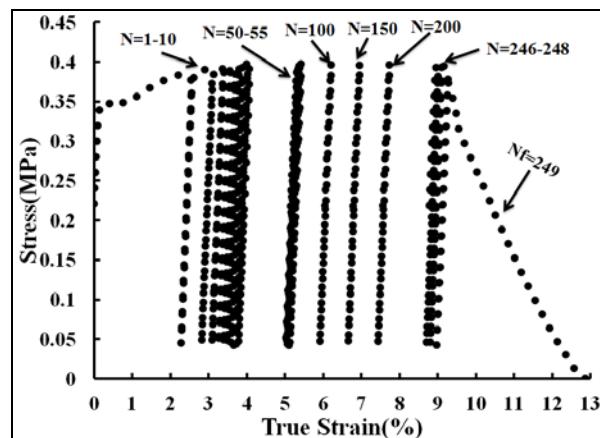


شکل ۹- نمودار تغییرات کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای PL1

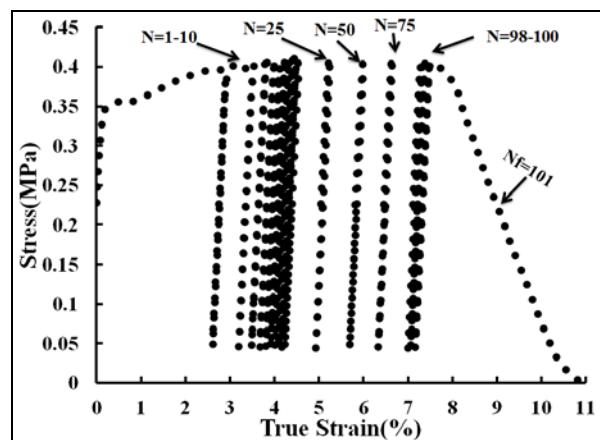


مراجع

- Coffin LF., The deformation and fracture of ductile metal under superimposed cyclic and monotonic strain. *ASTM STP 467. American Society for Testing and Materials*, 1970, pp. 53–76.
- Vishnuvardhan S., Raghava G., Gandhi P., Saravanan M., Pukazhendhi DM., Goyal S., Arora P., and Suneel K. G., Fatigue ratcheting studies on TP304 LN stainless steel straight pipes. *Procedia Engineering*, n. 2, 2010, pp. 2209–2218.
- Isobe N., Sukekawa M., Nakayama Y., Date S., Ohtani T., Takahashi Y., Kasahara N., Shibamoto H., Nagashima H., and Inoue K., Clarification of strain limits considering the ratcheting fatigue strength of 316FR steel. *Nuclear Engineering and Design*, 238, 2008, pp. 347–352.
- Date S., Ishikawa H., Otani T., and Takahashi Y., Effect of ratcheting deformation on fatigue and creep-fatigue life of 316FR stainless steel. *Nuclear Engineering and Design*, 238, 2008, pp. 336–346.
- Chen H., Chen W., Li T., and Ure J., Effect of circular holes on the ratchet limit and crack tip plastic strain range in a centre cracked plate. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 2011, pp. 2310–2324.
- Ure J., Chen H., Li T., Chen W., Tipping D., and Mackenzie D., A direct method for the evaluation of lower and upper bound ratchet limits. In *11th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials*, 2011, June, Lake Como.
- Shariati M., Hatami H., Yarahmadi H., and Eipakchi H.R., An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading. *Materials and Design* 34, 2011, pp. 302–312.
- Shariati M., Hatami H., Eipakchi H.R., Yarahmadi H., and Torabi H., Experimental and Numerical Investigations on Softening Behavior of POM Under Cyclic Strain-Controlled Loading. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, v. 50, Issue 15, 2011, pp. 1576–1582.



شکل ۱۳- نمودار تنش بر حسب کرنش حقیقی در سیکلهای مختلف بارگذاری برای PL2



شکل ۱۴- نمودار تنش بر حسب کرنش حقیقی در سیکلهای مختلف بارگذاری برای PL3