

رفتار غیرخطی سازه‌های مرکب تقویت‌شده با الیاف تحت بارگذاری سیکلی

قسمت اول: مطالعات آزمایشگاهی

سید محسن محسنی شکیب^۱

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲)

چکیده

در این مقاله، رفتار برشی صفحات مرکب تقویت‌شده یک‌جهته از جنس شیشه/اپوکسی مورد مطالعه قرار گرفته است. اطلاعات تجربی مواد در بارگذاری‌های سیکلی شامل بارگذاری، باربرداری، بارگذاری در جهت عکس، باربرداری از حالت بارگذاری عکس و در نهایت بارگذاری مجدد دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در این مطالعه، از فیکسچر برشی ریلی سیکلی که مدل اصلاح شده فیکسچر سه‌ریلی استاندارد ASTM D 4255/D 4255 M می‌باشد، استفاده شده است. بعضی از آزمایشات تحت بار خستگی با سیکل کم مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج برش غیرخطی و سطح خرابی در این آزمایشات قابل توجه می‌باشد. در قسمت دوم مقاله، یک مدل جهت پیشگویی رفتار برشی مواد مرکب در هر قسمت از بارگذاری سیکلی از ابتدا تا مرحله شکست، ارائه شده است. مدل ارائه‌شده با نتایج تست مورد مقایسه قرار گرفته است. تطابق بسیار نزدیک بین تست و مدل در تمامی بخش‌ها مشاهده می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مواد مرکب، برش غیرخطی، فیکسچر سه‌ریلی، بارگذاری سیکلی

Shear Nonlinearity Behaviour of Fibrous Composites under Cyclic Loading

Part I: Experimental Investigation

S.M. MohseniShakib

Imam Hossein University

(Received: 9/May/2013; Accepted: 24/September/2013)

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation of the shear behaviour of UD fibre glass epoxy under cyclic loading. Experimental data of such materials under loading cycles, involving loading, unloading, reversed loading, unloading from reversed loading and reloading, are essential. Cyclic rail shear fixture (CRSF) as a modified version of ASTM D 4255/D 4255 M fixture has been used in this study. Some specimens tested under low cycle fatigue loading. The results of nonlinearity and level of damage in these specimens are considerable. In part II, a model applies to any phase of the cyclic loading up to failure. The model has been compared with test results. Excellent agreements between the prediction and experimental results have been observed in all respects.

Keywords: Fibrous Composites, Shear Non-Linearity, Three Rail Shear Fixture, Cyclic Loading

۱- مقدمه

مواد مرکب تقویت شده با الیاف به صورت وسیع در سازه های مختلف مخصوصاً در سازه های هوافضا و سازه هایی که لازم است از کمترین وزن برخوردار باشند، مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از ظرفیت نهایی مواد مخصوصاً در سازه هایی که تحت بارگذاری نهایی مورد طراحی قرار می گیرند ایجاب می نماید که بررسی ها در محدوده های الاستیک غیرخطی یا پلاستیک انجام گیرد. در طراحی سازه های مرکب که رزین تأثیرگذار باشد، لازم است که رفتار غیرخطی آن مورد توجه قرار گیرد. همچنین دستیابی به رفتار و مشخصات طراحی این مواد در سازه هایی که تحت اعمال بار سیکلی قرار می گیرند از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. در بعضی از مطالعات، فرض الاستیک بودن بدون توجه به رفتار واقعی مواد مورد استفاده قرار می گیرد [۱].

با بررسی مقالات منتشر شده در خصوص مطالعه و تحقیق روی تنش ها و کرنش های برشی مواد مرکب پلیمری، مشاهده می شود که بسیاری از نتایج ارائه شده در این مقالات صرفاً در محدوده بارگذاری عادی حاصل شده [۶-۲] و تعداد کمی نیز به فاز باربرداری پرداخته اند [۷-۱۱]. نتایج تست ارائه شده در برخی مطالعات، کرنش پسماند قابل توجهی را نشان می دهد [۱۲]. کرنش پسماند حاصل به طور کلی شامل دو بخش برگشت پذیر و دائمی می باشد. قسمت برگشت پذیر عمدتاً نشان دهنده رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی بوده در صورتی که بخش ماندگار یا دائمی کرنش پسماند متأثر از مواردی مثل پلاستیسیته و خرابی می باشد.

ارائه مدل های تئوری جهت پیش بینی رفتار واقعی مواد مرکب تحت برش صفحه ای و نیز فرموله کردن مدل، مستلزم دانستن رفتار واقعی این مواد در تمام محدوده های تنش-کرنش از جمله بارگذاری، باربرداری، بارگذاری در جهت عکس، باربرداری از حالت بارگذاری در جهت عکس و در نهایت بارگذاری مجدد از کرنش اولیه تا کرنش شکست می باشد. برای رسیدن به این اطلاعات نیاز به تکنیک های مناسب آزمایش در این زمینه می باشد. برخی از این روش ها عبارتست از: پیچش خالص استوانه، کشش خارج از محور و روش دوریلی که یا هزینه بالایی را دربر می گیرند و یا دقت کمی دارند. از روش های قابل قبول و مطلوب، روش استاندارد سه ریلی [۱۵] می باشد که تقریباً اعمال برش خالص روی نمونه می نماید. در این روش با اعمال فشار روی فیکسچر

سه ریلی، می توان دیاگرام تنش برشی-کرنش برشی مواد مرکب یک جهته را در بارگذاری به دست آورد. در مطالعات حاضر برای دستیابی به مشخصات برشی این مواد در سیکل کامل بارگذاری و در تمام محدوده تنش-کرنش تا رسیدن به مرحله شکست، از فیکسچر برشیریلی سیکلی^۱ استفاده شده که توسط مؤلف این مقاله طراحی شده است [۱۶].

در برخی از مقالات، رفتار مواد مرکب با بستر پلیمری تحت بار خستگی با سیکل کم^۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. بسیاری از این مطالعات روی جهت الیاف متمرکز شده که برای مثال رفتار خستگی برای ماده مرکب شیشه/اپوکسی یک جهته تحت نیروی کششی در راستای الیاف مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷]. همچنین خزش^۳، رهایش^۴ و رفتار ویسکوالاستیک-پلاستیک مواد مرکب پلیمری با الیاف کوتاه شیشه تحت بار خستگی با سیکل کم مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۸]. با بررسی نتایج تحقیقات و مطالعات منتشر شده، اطلاعات قابل توجهی در محدوده برشی مواد مرکب یک جهته مشاهده نمی شود.

در این مقاله، رفتار برشی مواد مرکب یک جهته از جنس شیشه/اپوکسی شامل منحنی تنش برشی-کرنش برشی، رفتار ویسکوالاستیک-پلاستیک، پاسخ به بارگذاری های سیکلی و در نهایت رفتار خستگی با سیکل کم و با استفاده از فیکسچر اصلاح شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- آماده سازی انجام تست

تست برشی نیاز به انتخاب روش استاندارد مبتنی بر رفتار سازه مورد نظر دارد. استانداردها چندین روش را برای مواد مرکب ارائه می نمایند. تحقیقات دیگری مبتنی بر استاندارد و توسعه آن در بارگذاری های سیکلی ارائه شده است.

۲-۱- مشخصات فیکسچر

فیکسچر برشیریلی سیکلی (CRSF) [۱۶] می تواند رفتار برشی داخل صفحه مواد مرکب را در محدوده بارهای سیکلی شامل بارگذاری، باربرداری، بارگذاری در جهت عکس، باربرداری از بارگذاری در جهت عکس و در نهایت بارگذاری مجدد را مورد تست قرار داده و مشخصات اطلاعات برشی

1- Cyclic Rail Shear Fixture (CRSF)

2- Low-cycle Fatigue (LCF)

3- Creep

4- Relaxation

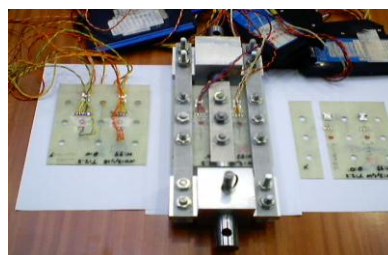
درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند. درصد الیاف نمونه‌ها حدود ۵۰ درصد می‌باشد. نحوه محاسبه مشخصه‌های مکانیکی این ماده شامل مدول الاستیسیته در جهات اصلی ۱ و ۲، ضرائب پواسون ν_{12} و ν_{21} ، مقاومت‌های کششی و فشاری Y_C, Y_T, X_C, X_T در مرجع [۲۱] ارائه شده است.

برنامه‌ریزی تست جهت محاسبات مشخصه‌های برشی انجام و نحوه محاسبه دیاگرام‌های تنش برشی- کرنش برشی و تأثیر سرعت بارگذاری با استفاده از ۵ نمونه در [۲۱] ارائه شده است. در مقاله حاضر به آزمایشات سیکلی با استفاده از ۱۱ نمونه شیشه/اپوکسی با شاخصه‌های C1 تا C11 به شرح مشخصات ارائه شده در جدول ۱ پرداخته شده است. در این جدول CL بیانگر بارگذاری سیکلی، CL+Cr بارگذاری سیکلی به همراه خزش و CL+Re بارگذاری سیکلی به همراه رهایش می‌باشند. نمونه‌های C1 تا C6 صرفاً تحت بارگذاری سیکلی با سرعت‌های مختلف بارگذاری قرار گرفته‌اند. در نمونه‌های C7 و C8 علاوه بر اعمال بارگذاری سیکلی، در چند بخش از آزمایش با ثابت نگه‌داشتن بار، خزش در نمونه‌ها حاصل شده است. در نمونه‌های C9 و C10 نیز علاوه بر اعمال بارگذاری سیکلی، با ثابت نگه‌داشتن جابه‌جایی فک‌های دستگاه تست یونیورسال، رهایی از تنش در نمونه ایجاد شد. رفتار این ماده مرکب تحت اعمال خستگی با سیکل کم در نمونه C11 نمایش داده شده است. نتایج این تست در ارائه مدل مناسب که در بخش دوم این مقاله ارائه شده است، راه‌گشا بوده است. نحوه بارگذاری سیکلی برای نمونه‌های C1 تا C11 در جدول ۲ ارائه شده است.

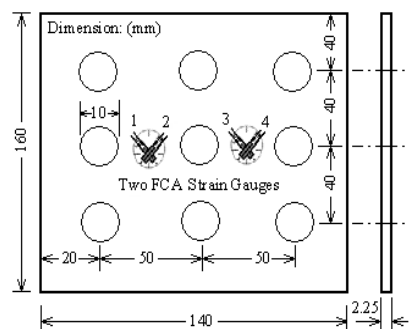
جدول (۱). مشخصات نمونه‌ها.

شاخص نمونه	ضخامت نمونه میلی‌متر	سرعت بارگذاری میلی‌متر/دقیقه	زمان تقریبی دقیقه	نوع بارگذاری
C1	۲/۲۰	۱/۵	۱۰	CL
C2	۲/۲۰	۱/۵	۶۵	CL
C3	۲/۱۵	۰/۵	۴۵	CL
C4	۲/۱۵	۰/۵	۹۰	CL
C5	۲/۲۵	۰/۵	۲۰	CL
C6	۲/۳۰	۰/۱	۴۲۵	CL
C7	۲/۳۰	۰/۵	۱۰۰	CL+Cr
C8	۲/۳۵	۰/۵	۱۴۵	CL+Cr
C9	۲/۲۰	۰/۵	۷۰	CL+Re
C10	۲/۲۵	۰/۵	۱۰۰	CL+Re
C11	۲/۴۰	۲	۱۵۰۰	LCF

غیرخطی متأثر از رفتار ویسکوالاستیک- پلاستیک و خرابی را ارائه نماید. اطلاعات مرتبط با این فیکسچر که نمونه اصلاح شده فیکسچر استاندارد مرجع [۱۵] می‌باشد شامل نقشه‌های اجرایی ساخت، نمونه‌سازی، سوراخ‌کاری نمونه‌ها و اطلاعات دیگر را می‌توان در مقالات [۱۶-۱۵] مورد مطالعه قرار داد. شکل ۱، فیکسچر (CRSF) را به همراه نمونه‌های قبل و بعد از آزمایش، ابعاد نمونه و محل نصب کرنش‌سنج‌ها روی نمونه را نشان می‌دهد. نیاز به ثبت اطلاعات تا مرحله شکست ایجاد نمود تا از کرنش‌سنج‌های غیرخطی FCA که قابلیت ثبت کرنش‌های بالا را دارند، استفاده گردد.



(الف)



(ب)

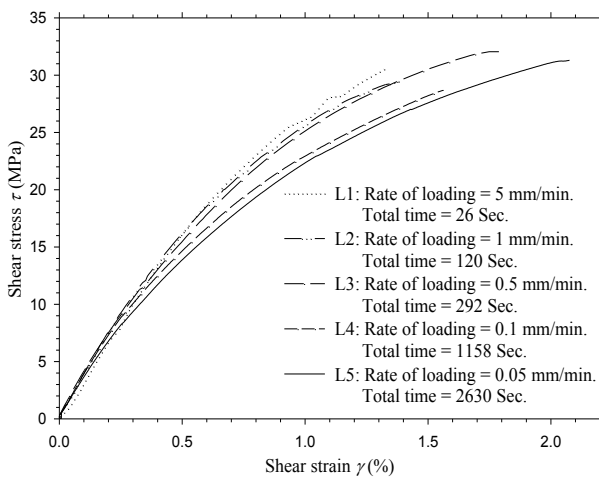
شکل (۱): (الف) فیکسچر برشی ریلی سیکلی، (ب) ابعاد

نمونه و محل نصب کرنش‌سنج‌ها روی نمونه.

۲-۲- مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌هایی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است از الیاف شیشه یک‌جهته UE250 از شرکت SP-System [۱۹] و آغشته‌سازی با رزین آرالدیت LY5052 با سخت‌کننده HY5052 از شرکت پلیمری Ciba [۲۰] مورد استفاده قرار گرفته است. روش دستی^۱ به همراه استفاده از کیسه خلاء^۲ در ساخت نمونه‌ها انتخاب شده است. در ساخت نمونه‌ها از ۱۲ لایه یک‌جهته شیشه/اپوکسی با زاویه صفر درجه استفاده و نمونه‌ها به مدت ۱۵ ساعت با درجه حرارت ۶۰

1- Hand Lay-up
2- Vacuum Bag



شکل (۲): منحنی‌های تنش برشی- کرنش برشی شیشه‌ای اپوکسی با نرخ‌های متفاوت کرنشی [۲۱].

۳-۱- تست‌های سیکلی

نمونه‌های مختلف جهت بررسی رفتار مواد مرکب تحت بارهای سیکلی نرمال و نیز اعمال شرایط خزش و رهایی در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۱- تست‌های نرمال سیکلی

۶ نمونه C1 تا C6 جهت مطالعه منحنی‌های نرمال سیکلی ۷- انتخاب شده‌اند. اطلاعات مرتبط با این نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شد.

نمونه‌های C1 و C2 در سرعت بارگذاری 1.5mm/min. بارگذاری شده‌اند. با در نظر گرفتن ضخامت نمونه‌ها و فرض توزیع یکنواخت روی سطح مقطع برشی نمونه‌ها، اطلاعات برداشت شده با استفاده از نیروسنج و کرنش‌سنج‌های مربوطه به صورت منحنی‌های C1 و C2 در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

نمونه C1 در تنش ۲۰/۶Mpa گسیخته شد. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، تنش شکست این ماده حدود ۳۰Mpa می‌باشد و از این رو شکست زود هنگام نمونه C1 می‌تواند به علت محکم‌نشدن نمونه در فیکسچر و در نتیجه تمرکز تنش روی بدنه حفره‌های نمونه باشد.

جدول (۲): نحوه بارگذاری سیکلی.

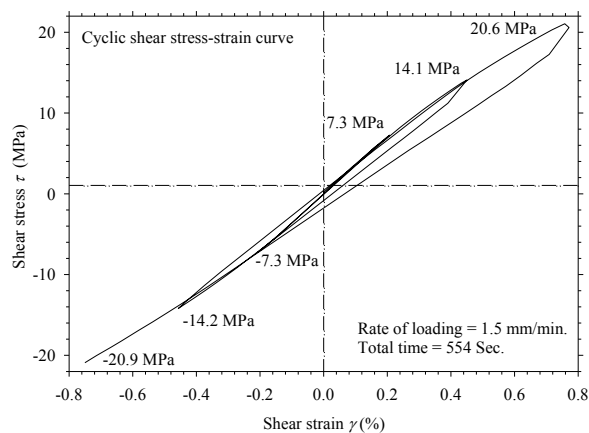
مقادیر بار (کیلو نیوتن)	شاخص نمونه
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 → -15	C1
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 18 → -18 → 20 → -20 → 21 → -21 → 22 → -22	C2
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 → -15 → 18 → -18 → 20	C3
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 → -15 → 17 → -17 → 18 → -17/5 → 19 → -18 → 20	C4
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15	C5
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 → -15 → 17 → -17 → 18 → -18 → 19 → -18 → 19/5 → -18/5 → 20.5 → -19 → 21/5 → 15/5 → 22 → 15/5 → 23/5	C6
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 (22 min.) → -15 → 17 (1 min.) → -17 → 18 → -18 → 19 → -18.5 → 20	C7
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 (25 min.) → -15 (22 min.) → 17 → -17 → 18 → -18 → 19 → -19 → 20 → -20 → 23	C8
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 (22 min.) → -15 → 18 → -18	C9
0 → 5 → -5 → 10 → -10 → 15 (22 min.) - 15 (15 min.) 17 → -17 → 18 → -18 → 18/5	C10
[10 → -10] (100 Cycles) → [12 → -12] (20 Cycles) → [14 → -14] (10 Cycles) → [16 → -16] (10 Cycles) → [18 → -18] (3 Cycles)	C11

۳- نتایج آزمایشات

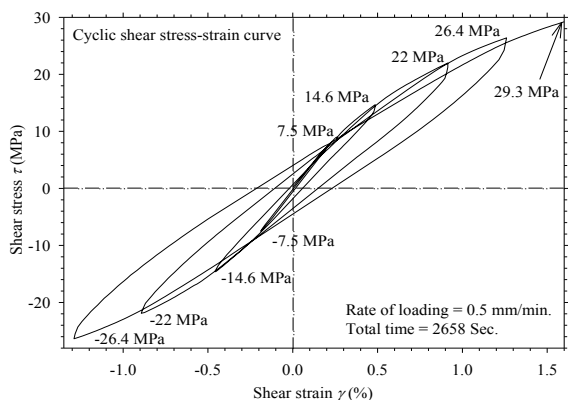
شکل ۲، منحنی‌های بارگذاری معمول ۷-τ از ماده حاضر با سرعت‌های متفاوت که بیانگر ویسکوسیته قابل توجهی می‌باشد را نشان می‌دهد [۲۱]. سرعت بارگذاری در نمونه‌های L1، L2، L3 و L4 به ترتیب ۱۰۰، ۲۰، ۱۰ و ۲ برابر نمونه L5 بوده و سرعت بارگذاری این نمونه برابر ۰/۰۵mm/min. می‌باشد.

منحنی‌ها نشان می‌دهند که بعد از ۲ تا ۳ درصد کرنش برشی، منحنی‌ها از یکدیگر فاصله می‌گیرند. برای مثال در تنش برشی 02Mpa روی نمونه L5 کرنش‌های مرتبط با منحنی‌های L1، L2، L3 و L4 به ترتیب ۶، ۱۶، ۲۰ و ۲۱ درصد کرنش بیشتری را نشان می‌دهد که بیانگر حالت ویسکوسیته این ماده در برش می‌باشد.

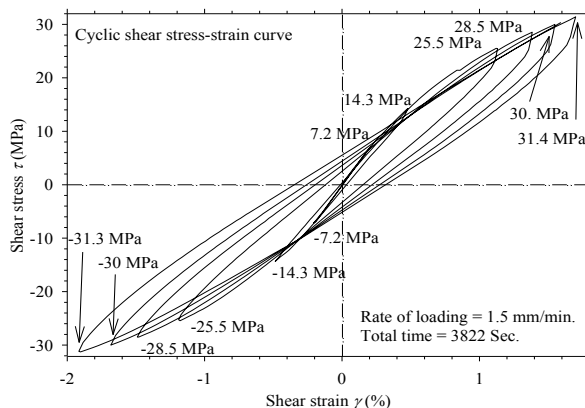
جهت نمایش قابلیت داده‌برداری در تست‌های سیکلی تعریف شده، با استفاده از فیکسچر برشی ریلی سیکلی، دو سیکل کوچک در انتهای تست نمونه C6 و قبل از شکست نمونه اعمال شد که در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



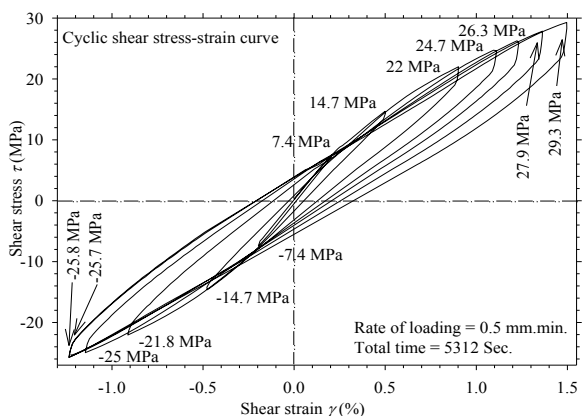
شکل (۳): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C1



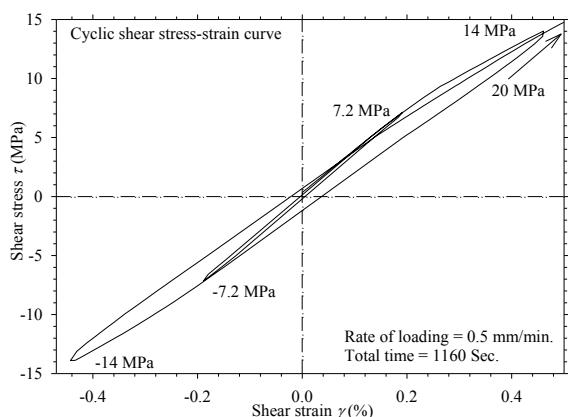
شکل (۵): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C3



شکل (۴): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C2



شکل (۶): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C4



شکل (۷): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C5

تغییر جهت بارگذاری از حالت باربرداری به بارگذاری در جهت عکس و یا از باربرداری در جهت عکس به بارگذاری مجدد، ایجاد پرش در منحنی‌های τ - γ می‌نماید که متأثر از جابه‌جایی آزاد فیکسچر به علت تolerانس‌های نصب به دستگاه تست یونیورسال می‌باشد. منحنی‌های τ - γ ارائه‌شده در این مقاله، با حذف اثرات فوق در این محدوده ($\pm 0\text{Mpa}$) حاصل شده است.

نتایج حاصل از بارگذاری سیکلی روی سه نمونه C3, C4 و C5 با سرعت بارگذاری 0.5 mm/min در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. نمونه C5 نیز همانند نمونه C1 قبل از رسیدن به مقاومت ماده گسیخته شد.

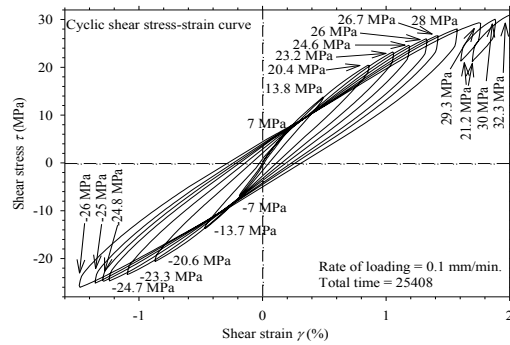
نمونه C6 در سرعت بارگذاری بسیار کم 0.1 mm/min به مدت تقریبی ۷ ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۸ ارائه شده است.

۲-۱-۳- تأثیرات ویسکوالاستیک-پلاستیک روی

تست‌های سیکلی

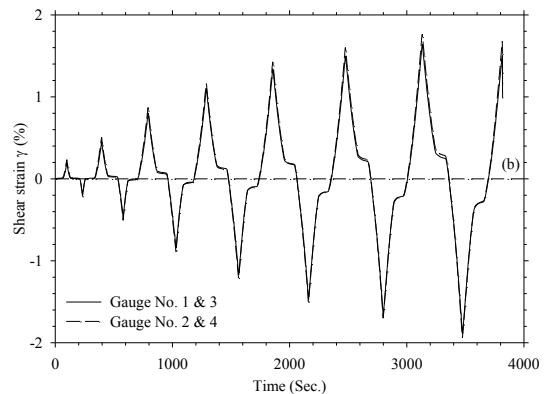
دو نمونه C7 و C8 برای نمایش تأثیرات خزش روی منحنی‌های τ - γ انتخاب شدند. نتایج آزمایش این دو نمونه با سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌است. در هر دو آزمایش دستگاه تست جهت ثابت نگه‌داشتن بار در مقدار ۱۵ kN برنامه‌ریزی شد. این بار به مدت ۲۲ دقیقه روی نمونه C7 و به مدت ۲۵ دقیقه روی نمونه C8 ثابت نگه داشته شد.

بعد از این مرحله و جهت نشان‌دادن تأثیرات خزش در دقایق اولیه تست، در سیکل بعدی بارگذاری نمونه C7، به مدت تقریبی یک دقیقه بار ۱۷ kN+ روی نمونه ثابت نگه داشته شد. سپس این نمونه تحت چند سیکل بارگذاری دیگر تا نقطه شکست قرار گرفت. سرعت بارگذاری در تمامی سیکل‌های بارگذاری همان ۰/۵ mm/min ثابت اعمال گردید. نمونه C8 بعد از باربرداری از ۱۵ kN بارگذاری در جهت عکس و رسیدن به مقدار ۱۵ kN-، این بار به مدت تقریبی ۲۲ دقیقه روی نمونه ثابت نگه داشته شد و سپس تحت ۴ سیکل بارگذاری دیگر تا نقطه شکست قرار گرفت.

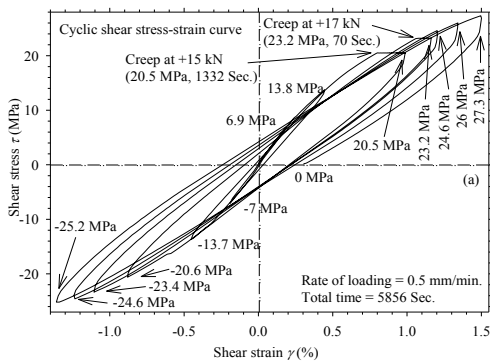


شکل (۸): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C6.

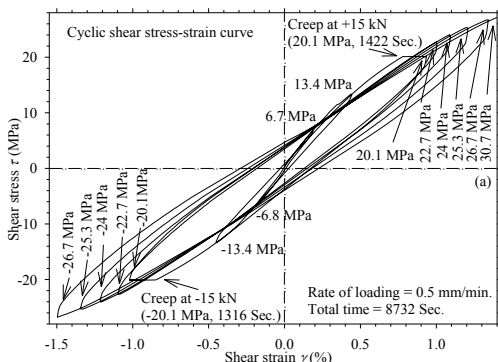
جهت نمایش تغییرات کرنش برشی با زمان، دو نمونه C2 و C6 انتخاب و گراف‌های مربوطه در شکل‌های ۹-۱۰ ارائه شده است. کرنش‌های حاصل از کرنش‌سنج‌های ۳، ۲، ۱ و ۴ (طبق شکل ۱)، بیانگر اعمال خروج از محوریت نیرو روی نمونه‌ها در این تست می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از کرنش‌سنج‌های مختلف، تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.



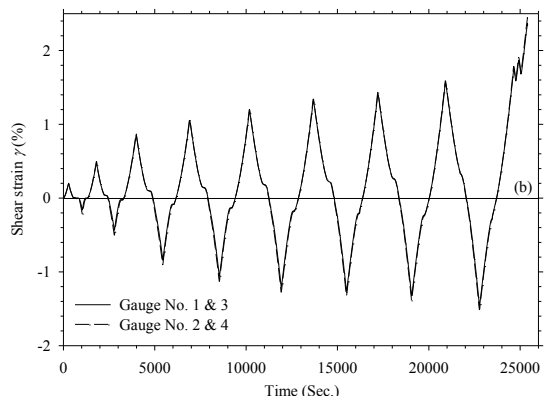
شکل (۹): تغییرات کرنش برشی با زمان در نمونه C2.



شکل (۱۱): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C7.



شکل (۱۲): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C8.

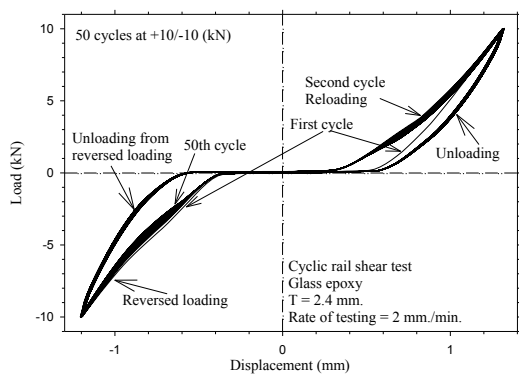


شکل (۱۰): تغییرات کرنش برشی با زمان در نمونه C6.

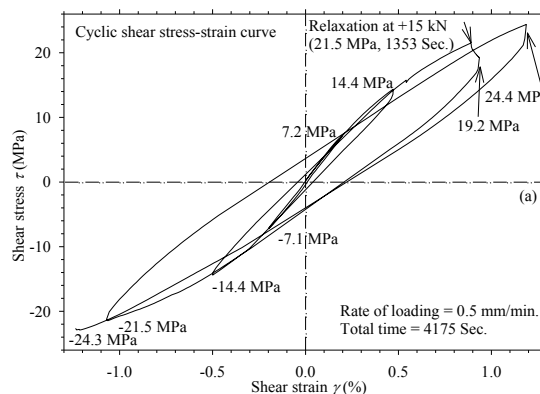
۳-۲- تست خستگی با سیکل کم (LCF)

نمونه C11 جهت مشاهده رفتار برشی مواد مرکب شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری خستگی با سیکل کم انتخاب گردید. اطلاعات مرتبط با این نمونه در جدول ۱ ارائه شد. با استفاده از نتایج قبلی شامل نتایج بارگذاری یکنواخت (شکل ۲) و نیز نتایج مرتبط با آزمایشات سیکلی روی نمونه‌های C1 تا C10، نیروی نهایی وارد بر نمونه‌ها بین ۱۸ kN تا ۲۲ kN می‌باشد. بدین‌منظور در مرحله اول آزمایش خستگی با سیکل کم روی نمونه C11، نیروی سیکلی ± 10 kN (حدود ۵۰٪ بار نهایی) انتخاب شد. سرعت بارگذاری در کل طول آزمایش برابر ۲ mm/min. و ۵۰ سیکل بارگذاری ± 10 kN در روز اول به نمونه وارد شد. گراف‌های نیرو-جابجایی مرتبط با این حالت در شکل ۱۵ ارائه شده است. در روز دوم ۵۰ سیکل مجدد در محدوده ± 10 kN اعمال گردید (شکل ۱۶).

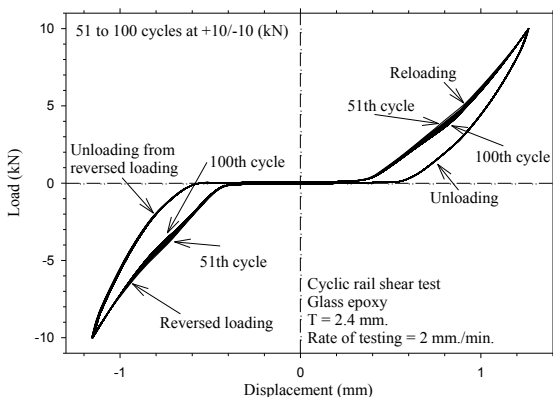
نمونه‌های C9 و C10 جهت تأثیرات تنش‌رهایی روی منحنی‌های سیکلی τ - γ انتخاب شدند. نتایج آزمایش این دو نمونه با سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/min. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. در این آزمایش دستگاه یونیورسال اعمال نیرو به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شد که پس از اعمال نیروی ۱۵ kN از جابه‌جایی فک‌های نگهدارنده فیکسچر جلوگیری گردد. بنابراین حدود ۲۰ دقیقه برای نمونه C9 و ۱۵ دقیقه برای نمونه C10 بعد از اعمال نیروی ۱۵ kN از جابه‌جایی فک‌ها جلوگیری و تنش‌رهایی به نمونه‌ها اعمال گردید. بعد از این مرحله، نمونه C9 تحت یک سیل بارگذاری دیگر در نقطه شکست قرار گرفت، در صورتی‌که در نمونه C10 بعد از این مرحله و تا رسیدن به نیروی ۱۵ kN، تنش‌رهایی به‌مدت ۱۵ دقیقه با ثابت نگه‌داشتن جابه‌جایی فک‌ها مجدداً اعمال گردید. در نهایت نمونه C10 پس از اعمال دو سیکل بارگذاری دیگر به نقطه شکست رسید.



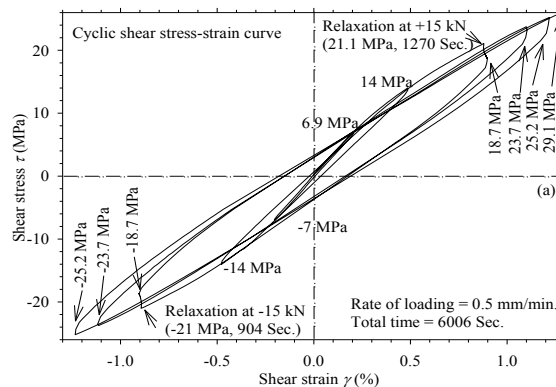
شکل (۱۵): سیکل‌های ۱ تا ۵۰ نمونه C11 در محدوده ± 10 kN



شکل (۱۳): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C9

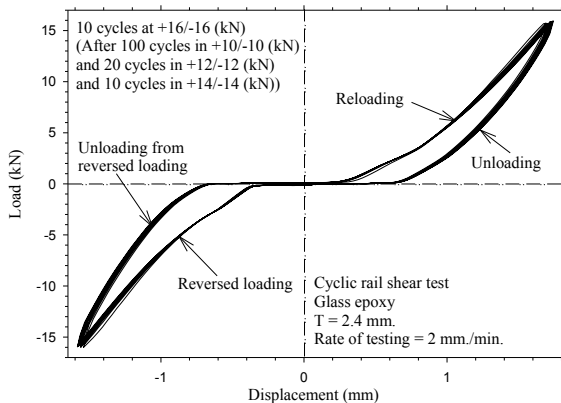


شکل (۱۶): سیکل‌های ۵۱ تا ۱۰۰ نمونه C11 در محدوده ± 10 kN

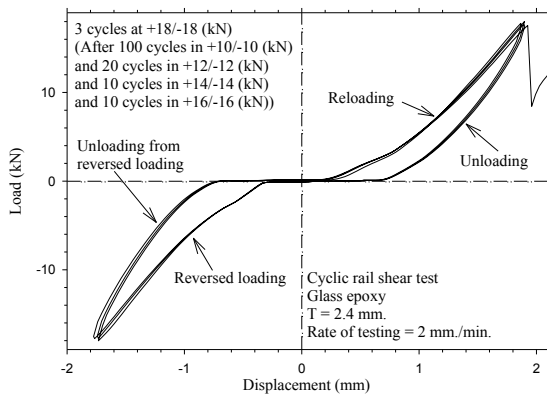


شکل (۱۴): منحنی سیکلی τ - γ نمونه C10

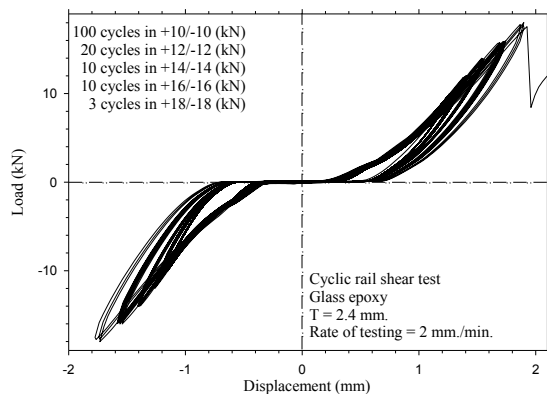
شکل (۱۸): ۱۰ سیکل در محدوده $\pm 14 \text{ kN}$ روی نمونه C11.



شکل (۱۹): ده سیکل در محدوده $\pm 16 \text{ kN}$ روی نمونه C11



شکل (۲۰): سه سیکل در محدوده $\pm 18 \text{ kN}$ روی نمونه C11



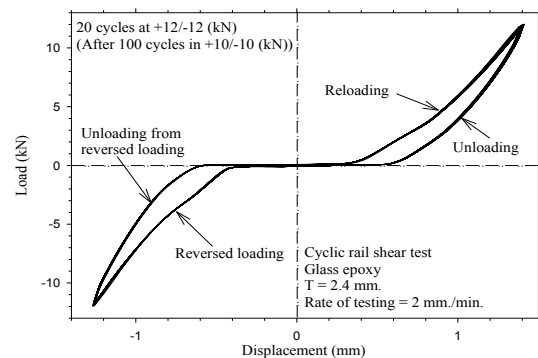
شکل (۲۱): سیکل‌های اعمالی روی نمونه C11 از ابتدا تا شکست.

۴-مقایسه نتایج تست

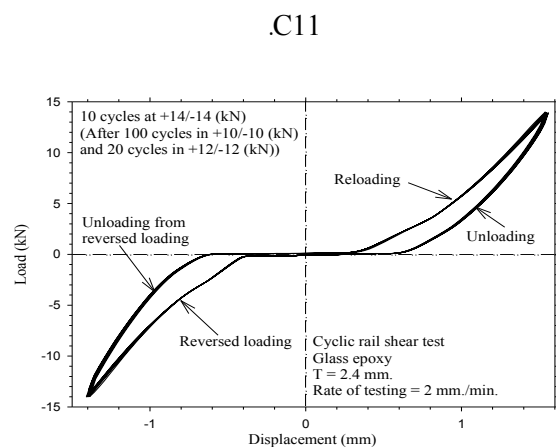
مقایسه نتایج تست در دو دسته انجام گرفته است. دسته اول نتایجی که دارای سرعت بارگذاری یکسان هستند و دسته دوم نمونه‌های با سرعت متفاوت بررسی شده‌اند.

بعد از اعمال ۱۰۰ سیکل بارگذاری، دامنه بار به $\pm 12 \text{ kN}$ در ۲۰ سیکل بارگذاری تغییر و نتایج در شکل ۱۷ نشان داده شده است. سپس دامنه بار به $\pm 14 \text{ kN}$ در ۱۰ سیکل، $\pm 16 \text{ kN}$ در ۱۰ سیکل و $\pm 18 \text{ kN}$ در ۳ سیکل انجام و در این مرحله شکست در نمونه اتفاق افتاد. نتایج مربوط در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ ارائه شده است. همچنین شکل ۲۱، تمامی منحنی‌های نیرو-جابجایی مرتبط با نمونه C11 را در یک نمودار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سخت شوندگی تنش^۱ و یا سخت شوندگی کرنش^۲ در این مواد به چشم نمی‌خورد. از این رفتار در ارائه مدل که در بخش دوم این مقاله ارائه شده، استفاده شده است.

این نکته حائز اهمیت است که به علت جابه‌جایی آزاد نمونه از حالت باربرداری به بارگذاری معکوس و از حالت باربرداری از بارگذاری معکوس به بارگذاری مجدد (محدوده‌ای که بار از روی نمونه برداشته می‌شود)، این جابه‌جایی باعث جدایی منحنی‌ها به علت تولرانس‌های نصب فیکسچر به دستگاه یونیورسال در این محدوده شده است.



شکل (۱۷): بیست سیکل در محدوده $\pm 12 \text{ kN}$ روی نمونه C11



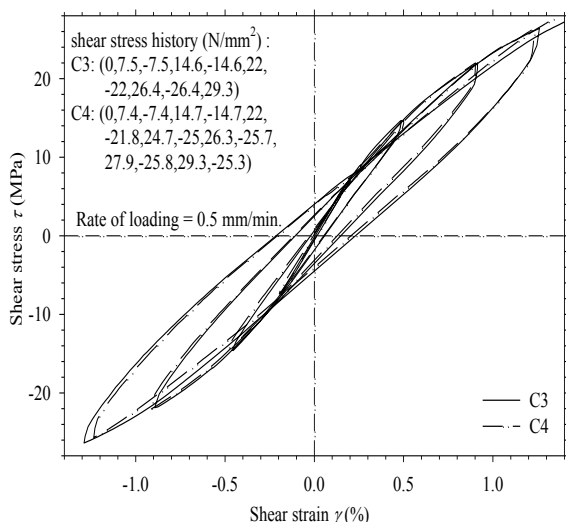
- 1-Stress Hardening
- 2 -Strain Hardening

جهت مقایسه دقیق‌تر نتایج این دو نمونه، مقادیری از سیکل‌های مدل C4 استفاده شده است که با مدل C3 مطابقت دارد و از رسم گراف‌هایی که فقط در یک نمونه اعمال شده است خودداری شده است. لذا مقادیر نظیر عبارتند از: $0 \rightarrow 5 \rightarrow -5 \rightarrow 10 \rightarrow -10 \rightarrow 15 \rightarrow -15 \rightarrow 18 \rightarrow 20 \text{ kN}$. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود منحنی‌های τ - γ تطابق بسیار خوبی در تمامی محدوده‌ها تا نقطه شکست را در نمونه‌های C3 و C4 نشان می‌دهند.

۲-۴- مقایسه نتایج تست‌های با سرعت بارگذاری متفاوت

مواد ویسکوالاستیک-پلاستیک تحت سرعت بارگذاری بالا، سختی بیشتری نسبت به سرعت بارگذاری کم از خود نشان می‌دهند. سه نمونه C2، C4 و C6 برای نشان دادن این تفاوت انتخاب شدند.

شکل ۲۴ منحنی‌های τ - γ مرتبط با نمونه‌های C2 و C6 را نشان می‌دهند، سرعت بارگذاری نمونه C2 برابر $1/5 \text{ mm/min}$ می‌باشد که ۱۵ برابر نمونه C6 می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در کرنش‌های برابر، نمونه C2 مقاومت بیشتری نسبت به نمونه C6 از خود نشان می‌دهد. به همین ترتیب در شکل ۲۵، نمونه C4 با سرعت $0/5 \text{ mm/min}$ و نمونه C6 با سرعت $0/1 \text{ mm/min}$ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.



شکل (۲۴): مقایسه منحنی‌های τ - γ نمونه‌های C3 و C4.

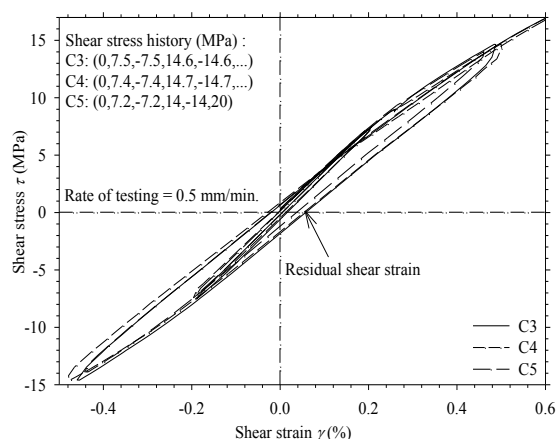
۱-۴- مقایسه نتایج تست‌های با سرعت بارگذاری یکسان

سرعت بارگذاری در مواد ویسکوالاستیک، یکی از مهم‌ترین پارامترها در مقایسه نتایج تست می‌باشد و بدین منظور از نتایج تست نمونه‌های C3، C4 و C5 که دارای سرعت بارگذاری 0.5 mm/min می‌باشد در این قسمت استفاده شده است.

دو سیکل اول بارگذاری این نمونه‌ها عبارتند از:

$$0 \rightarrow 5 \rightarrow -5 \rightarrow 10 \rightarrow -10 \rightarrow 15 \text{ kN}$$

این بخش از منحنی‌های τ - γ این نمونه‌ها در شکل ۲۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سازگاری بسیار خوبی در این محدوده بین نمونه‌ها به چشم می‌خورد. همچنین در بخش اولیه منحنی‌ها می‌توان حالت الاستیک معمول را در نمونه‌ها مشاهده نمود. البته کرنش پسماند کم اولیه نشان داده شده در شکل ۲۲، متأثر از رفتار ویسکوالاستیک می‌باشد که بخش برگشت‌پذیر کرنش پسماند می‌باشد.



شکل (۲۲): مقایسه منحنی‌های τ - γ نمونه‌های C3، C4 و C5.

با افزایش مقدار کرنش نمونه، ضمن اینکه مقدار کرنش برگشت‌پذیر متأثر از رفتار ویسکوالاستیک افزایش می‌یابد، کرنش برگشت‌ناپذیر متأثر از رفتار ویسکوالاستیک ماده نیز مقدار گرفته و براساس سطح خرابی در نمونه افزایش می‌یابد.

نمونه‌های C3 و C4 جهت مقایسه نتایج تا نقطه شکست در این قسمت انتخاب شدند. سیکل‌های اعمالی روی نمونه C3 عبارتست از: $0 \rightarrow 5 \rightarrow -5 \rightarrow 10 \rightarrow -10 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow -18 \rightarrow 20 \text{ kN}$ و سیکل‌های اعمالی روی نمونه C4 عبارتست از: $0 \rightarrow 5 \rightarrow -5 \rightarrow 10 \rightarrow -10 \rightarrow 15 \rightarrow -15 \rightarrow 17 \rightarrow -17 \rightarrow 18 \rightarrow -17/5 \rightarrow 20 \rightarrow -17/5 \text{ kN}$.

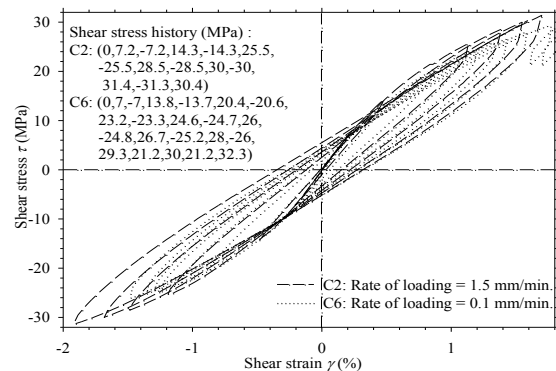
شکست نشان داد. هم‌چنین مقایسه نمونه‌هایی که دارای سرعت بارگذاری متفاوت در بارگذاری داشتند نشان داد که در کرنش‌های برابر، نمونه‌هایی که با سرعت بالاتر بارگذاری می‌شوند، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که با سرعت کمتر بارگذاری می‌شوند از خود نشان می‌دهند.

نتایج حاصل در نمونه‌ها به‌ویژه نمونه C11 در بارگذاری خستگی با سیکل کم اثبات نمود که منحنی‌های τ - γ نسبت به مقدار تنش یا کرنش اعمالی از سیکل‌های ثابتی نسبت به این مقادیر تبعیت می‌کنند. به‌عبارت دیگر در بارگذاری مجدد منحنی تنش-کرنش از نقطه قبلی عبور نموده و سخت‌شوندگی کرنش و یا تنش در این مواد مشاهده نمی‌شود. با استفاده از این نتایج می‌توان مدل مناسبی ارائه نمود که در بخش دوم این مقاله به آن پرداخته شده است.

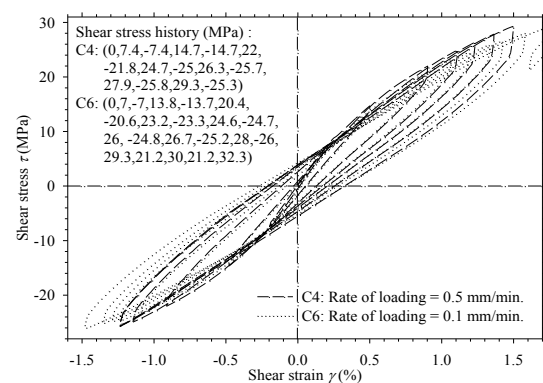
مقایسه نتایج نشان داد که پراکندگی نتایج بسیار کم و سازگاری نمونه‌ها بسیار نزدیک و لذا استفاده از روش تست با فیکسچر برشی ریلی سیکلی که مدل اصلاح‌شده فیکسچر سه ریلی استاندارد ASTM D 4255/D 4255 M می‌باشد بسیار مناسب می‌باشد.

۶- مراجع

- Hahn H.T. and Tsai S.W. "Nonlinear Elastic Behaviour of Unidirectional Composite Laminae", J Compos Mater; Vol. 7, No. 1, pp. 102-108, 1973.
- Jones R.M. "Mechanics of Composite Materials", 2nd ed. London: Taylor & Francis, 1999.
- Hinton M.J., Kaddour A.S. and Soden P.D., "Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites", the World Wide Failure Exercise. A Composites Science and Technology Compendium. London, Elsevier, 2004.
- Lockwood P.A. "Results of the ASTM Round-Robin on the Rail Shear Test for Composites", J Compos Technology and Research, Vol. 3, No.2 pp.83-86, 1981.
- Basu S., Waas A.M. and Ambur D.R. "Prediction of Progressive Failure in Multidirectional Composite Laminated Panels", International Journal of Solids and Structures Vol. 44, No. 9, pp. 2648-2676, 2007.
- Liang Y., Wang H. and Gu X. "In-plane Shear Response of Unidirectional Fibre Reinforced and Fabric Reinforced Carbon/Epoxy Composites", Polymer Testing, Vol. 32, No. 3, pp. 594-601, 2013.
- Ladeveze P. "Inelastic Strain and Damage", In: Talreja R, Editor. Chapter 4 in Damage Mechanics of Composite Materials. London, Elsevier, 1994.
- Masters, J.E. "Damage Characterization for a Solid Propellant by an Energetic Approach" ASTM STP 1128, pp. 121-133, 1992.



شکل (۲۴): مقایسه منحنی‌های τ - γ نمونه‌های C2 و C6.



شکل (۲۵): مقایسه منحنی‌های τ - γ نمونه‌های C4 و C6.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار برشی داخل صفحه ماده مواد مرکب یک‌جهته از جنس شیشه/اپوکسی شامل منحنی تنش برشی - کرنش برشی، رفتار ویسکوالاستیک - پلاستیک، پاسخ به بارگذاری‌های سیکلی و درنهایت رفتار خستگی با سیکل کم و با استفاده از فیکسچر اصلاح‌شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

با تعریف یک سری تست‌های مناسب، رفتار غیرخطی و پارامترهای آنالیز و طراحی در منحنی‌های تنش-کرنش، مقاومت برشی، مدول برشی و رفتار ویسکو الاستیک-پلاستیک که در این مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند، ارائه شد. در بارگذاری‌های سیکلی و نیز مطالعه رفتار خستگی با سیکل کم، این پارامترها اهمیت بیشتری داشته که نتایج تست‌های ارائه‌شده به‌وضوح اطلاعات موردنیاز را در تمام محدوده بارگذاری نشان می‌دهند.

مقایسه منحنی‌های τ - γ از نمونه‌های با سرعت بارگذاری برابر، تطابق بسیار خوبی در تمامی محدوده‌ها را تا نقطه

9. Grediac M., Auslender F. and Pierron F. "Applying the Virtual Fields to Determine the Through-Thickness Moduli of Thick Composite with a Non-Linear Shear Response", *Composites Part A*, Vol. 32, No. 12, pp. 1713–1725, 2001.
10. Paepegem W.V., De Baere I. and Degrieck J. "Modeling the Nonlinear Shear Stress-Strain Response of Glass Fibre-Reinforced Composites. Part I: Experimental Results", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 10, pp. 1455-1464, 2006.
11. Cai S., Daymond M.R., Holt R.A. and Oliver E.C. "Evolution of Internal Strains in a Two Phase Zirconium Alloy During Cyclic Loading", *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 13, pp. 5305–5319, 2011.
12. Li, S., S.R. Reid, P.D. Soden and M.J. Hinton "The Nonlinear Structural Response of Laminated Composites", 6th IntConf Deformation and Fracture of Composite, Manchester UK, 4-5 April 2001.
13. Peters ST. "Handbook of Composites", 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1998.
14. "Composite Material Handbook: Polymer Matrixcomposite Guidelines for Characterization of Structural Materials", MIL-HDBK-17-1F, Vol. 1, 2002.
15. "American Society for Testing Materials (ASTM). Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials By the Rail Shear Method. Designation: D 4255/D 4255M-01", 2002.
16. MohseniShakib S.M., and Li S. "Modified Three Rail Shear Fixture (ASTM D 4255/D 4255M) and an Experimental Study of Nonlinear In-Plane Shear Behaviour of FRC", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1854–1866, 2009.
17. Harik V.M., Klinger J.R. and Bogetti T.A. "Low-Cycle Fatigue of Unidirectional Composites: Bi-linear S–N Curves", *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 2, pp. 455–462, 2002.
18. Drozdov A.D. "Cyclic Viscoelastoplasticity and low-Cycle Fatigue of Polymer Composites", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No.13, pp. 2026–2040, 2011.
19. Structural Polymer Systems (SP) "Advanced Composite Materials", Technical Manual, UT-E250/500 Unidirectional Unitex E Glass
20. Ciba Polymers, "Cold and Warm Curing Laminating System", Araldite LY5052 and HY 5052 Hardener, Ciba 1994.
21. MohseniShakib S.M., "An Investigation of the In-Plane Shear Nonlinearity in Fibrous Composites", PhD Thesis, The University of Manchester Institute of Science and Technology, 2004.