مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دوره 16، شماره 1، ص‌ص 121-128

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر فاصله ماکرو الیاف‌های تقویت‌کننده بر رفتار مکانیکی اتصالات چسبی تک‌لبه در دو جهت‌گیری متفاوت

مجیدرضا آیت‌اللهی[1*]، علی نعمتی‌گیو[2]، سیدمحمدجواد رضوی[3]

1- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت، تهران
3 کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
* تهران، صندوق‌پستی 16765-163، m.ayat@iust.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 03 تیر 1394
پذیرش: 14 آبان 1394
ارائه در سایت: 02 دی 1394

کلید واژگان:
ماکرو الیاف‌های فلزی
جهت‌گیری طولی و عرضی
اتصالات تک لبه
اتصالات چسبی

چکیده

افزودن ذرات و الیاف در لایه چسب یکی از روش‌های پیشنهادی برای بهبود توزیع تنش، افزایش استحکام و چقرمگی در اتصالات چسبی است. در مقاله حاضر تأثیر افزودن الیاف‌های فلزی و به همراه آن کاهش فاصله افقی در لایه چسب بر توزیع تنش‌های پوست‌کنی و برشی در دو جهت‌گیری طولی و عرضی به کمک تحلیل اجزا محدود بررسی شده است. نتایج نشان داد در جهت‌گیری طولی الیاف، با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی توزیع تنش‌های پوست‌کنی و برشی بهبود یافته و بیشینه مقادیر تنش در آن‌ها نسبت به چسب تقویت‌نشده در طول اتصال کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند. این در حالی است که در جهت‌گیری عرضی، با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی توزیع تنش پوست‌کنی در ابتدا نایکنواخت‌تر شده و در نهایت بهبود می‌یابد. برخلاف روند به‌وجود آمده در تنش پوست‌کنی با جهت‌گیری عرضی، به دلیل باربری قابل توجه الیاف‌های فلزی در اثر تنش‌های برشی ایجادشده در لایه چسب، توزیع تنش برشی با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی یکنواخت‌تر شده و بیشینه مقادیر تنش برشی در طول اتصال به‌طور منظم کاهش پیدا می‌کند. علاوه‌بر تحلیل‌های صورت گرفته از توزیع تنش در طول اتصال، توزیع تنش پوست‌کنی و برشی در عرض اتصال بررسی شد که حاکی از تأثیر قابل توجه الیاف‌های فلزی با چیدمان عرضی است.

The Effect of Macro Fiber Reinforcements on Mechanical Behavior of Single Lap Adhesively Bonded joints in two Different Orientations

Majid Reza Ayatollahi[*], Ali Nemati Giv, Seyed Mohamad Javad Razavi

Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B.16765-163 Tehran, Iran, m.ayat@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 June 2015
Accepted 05 November 2015
Available Online 23 December 2015

Keywords:
metal macrofibers
longitudinal and transverse direction
single lap joints
adhesively bonded joints

ABSTRACT

Adding particles and fibers to the adhesive layer is a method suggested to improve the stress distribution and to increase the strength and toughness of adhesive joints. In this paper, the effects of adding the metal fibers and also the reduction of fiber horizontal distance on distribution of peel stress and shear stress toward longitudinal and transverse directions were studied using finite element analysis. The obtained results showed that the reduction of the horizontal distance between the metal fibers in the longitudinal direction improves the distribution of the peel stress and shear stress and leads to a significant reduction in their maximum values in the joint length with respect to the non-reinforced adhesive. Meanwhile, reduction of the horizontal distance between the metal fibers in the transverse direction first degrades the peel stress and then improves it. Despite the trend observed for the peel stress with the transverse direction, the distribution of the shear stress with reduction of the horizontal distance between the metal fibers becomes more uniform and the maximum values of shear stress regularly decreases in the joint length due to considerable load sharing of the metal fibers in the adhesive layer. In addition to the analyses carried out on the distribution of stress in the joints length, the distribution of peel stress and shear stress were also investigated in joint width, which was indicative of the significant effect of the metal fibers in the transverse configuration.

1- مقدمه

اتصالات چسبی یکی از پرکاربردترین اتصالات به‌شمار می‌آید که به‌صورت گسترده در صنایع مختلف به‌ویژه در صنعت هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اتصالات نسبت به سایر اتصالات مکانیکی دارای مزیت‌هایی بوده که می‌توان به مقاومت خوب در برابر بارهای خستگی و ارتعاشات مکانیکی، وزن کم، قابلیت آب‌بندی و بهبود توزیع تنش در لایه چسب اشاره کرد. در کنار مزایای یادشده، مقاومت پایین حرارتی و رطوبتی، زمان پخت طولانی و آماده‌سازی سطوح چسبنده‌ها در حلال‌های معین با محدوده دمایی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. R. Ayatollahi, A. Nemati Giv, S. M. J. Razavi, The Effect of Macro Fiber Reinforcements on Mechanical Behavior of Single Lap Adhesively Bonded joints in two Different Orientations, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 16, No. 1, pp. 121-128, 2016 (in Persian)

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.9.2]

مشخص از مواردی است که سبب شده این اتصالات در کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرند. جهت بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی در مواد کامپوزیتی و اتصالات چسبی، محققین روش‌های متعددی را پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان به افزودن ماکرو و میکرو الیاف‌ها، الیاف‌های کوتاه، میکرو و نانو ذرات در رزین کامپوزیت‌های پایه پلیمری و لایه چسب اشاره کرد.

در این راستا خرمی‌شاد و رضوی [1] به مطالعه تجربی و عددی تأثیر الیاف‌های فلزی در یک اتصال چسبی سربه‌سر مضاعف[1] پرداختند. درنتایج تجربی با افزودن الیاف و کاهش فاصله افقی، افزایش استحکام در اتصال چسبی مشاهده شد، همچنین در نتایج عددی با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی، افزایش قطر و سفتی آن‌ها در جهت‌گیری طولی (جهت‌گیری در زاویه صفر درجه) سبب بهبود توزیع تنش‌های پوست‌کنی[2] و برشی و کاهش بیشینه مقادیر تنش در لایه چسب شد. سعید و شنگ زاهان [2] تأثیر اضافه کردن نانوذرات چند دیواره کربن بر رفتار مکانیکی چسب‌های ترموپلاست پلی‌آمیدی را بررسی کردند. در این گزارش تعدادی از خواص مکانیکی مانند مدول یانگ و استحکام شکست با افزایش درصد وزنی نانو ذرات کربن در لایه چسب افزایش یافت، ولی سایر خواص مکانیکی مانند انرژی شکست، کرنش شکست و استحکام برشی اتصال چسبی تا درصد وزنی معینی از نانو ذرات کربن افزایش و پس از آن کاهش پیدا کرد. خلیلی و همکارانش [3] تأثیر تقویت‌کننده‌های شیشه را به‌صورت الیاف کوتاه، میکروپودرها (در سه درصد حجمی متفاوت) و میکرو الیاف‌ها (در سه جهت گیری صفر، 45 و 90 درجه) تحت بارگذاری کشش، خمش، ضربه و خستگی بررسی کردند. بهترین عملکرد و استحکام در تمامی حالت‌های بارگذاری در میکروپودرها و میکروالیاف‌های شیشه در جهت‌گیری صفر درجه در درصد حجمی 30% گزارش شد.

مگویید و سون [4] جهت بهبود خواص برشی و کششی در اتصالات چسبی از نانو ذرات کربن و نانو پودرهای آلومینا استفاده کردند. نتایج نشان داد با افزودن این دو نوع نانو ذره تا درصد وزنی معینی در لایه چسب خواص یادشده افزایش و پس از آن رو به کاهش است. یو و همکارانش [5] تأثیر استفاده از الیاف فلزی در گرده اتصال چسبی بر استحکام اتصال را بررسی کردند. ایشان با استفاده کردن از الیاف‌های تقویت‌کننده با مقاطع دایروی (در دو قطر متفاوت) و مثلثی، بهترین شکل الیاف برای استحکام بخشی اتصال که الیاف با مقطع دایروی است را مشخص کردند. سادوسکی و همکارانش [6] با استفاده از پرچ در اتصال چسبی یک اتصال مرکب (شامل چسب و پرچ) را ایجاد کردند. نتایج نشان داد که اتصال مرکب تحت بارگذاری استاتیکی استحکام بیشتری را از خود نشان می‌دهد. توتونچی و همکارانش [7] جهت بهبود استحکام برشی و کششی اتصال بین دو چسبنده شیشه- اپوکسی و فولادی از یک چسب دو جزئی که توسط نانو ذرات تیتانیوم اکسید تقویت شده، استفاده کردند. نتایج نشان داد که استحکام کششی و برشی در این اتصالات با افزودن این نانو ذرات تا درصد وزنی 3% افزایش و سپس کاهش می‌یابد. خلیلی و همکارانش [8] تأثیر اض افزودن نانو ذرات رس را در اتصالات چسبی تک لبه را تحت بارگذاری ضربه و کشش مورد مطالعه قرار دادند. بیشینه مقادیر استحکام کششی و انرژی ضربه در درصد وزنی‌های 1% و 3% گزارش شد. کیلیک و دیویس [10,9] بر خواص مکانیکی و حرارتی با پودر فلز مس و آلومینیوم مطالعه و پژوهش هایی را انجام دادند. با استفاده از آزمایشات تجربی تغییرات تنش ناشی از تغییر اندازه و کسر حجمی ذرات فلز در چسب بهبودیافته و همچنین مقایسه حالات بهبود یافته چسب با حالت عادی را مورد بررسی قرار دادند. زاهی و همکارانش [11] برای بهبود استحکام چسبندگی در چسب اپوکسی از سه نوع نانو ذره تقویت‌کننده (نانو ذرات آلومینا، سیلیکا و کلسیم کربنات) استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشینه استحکام چسبندگی در تست کشش در نانو ذرات آلومینا در درصد وزنی 2% به وقوع می‌پیوندد. کیم و همکارانش [12] تأثیر افزودن الیاف کوتاه آرامید را در بهبود چقرمگی شکست چسب اپوکسی در دمای تبرید ($-150\,^{0}C$) بررسی کردند. با استفاده از آزمایشات تجربی صورت‌گرفته مقدار چقرمگی شکست با افزایش درصد حجمی الیاف کوتاه آرامید در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. کینلوچ و همکارانش [13] تأثیر افزودن نانو ذرات سیلیکا را در یک نوع چسب لاستیکی بررسی کردند که در درصد وزنی‌های پایین افزایش استحکام برشی و بهبود چقرمگی چسب را به همراه داشت. خان و همکارانش [14] تأثیر اضافه نمودن نانو ذرات گرافن را در چسب‌ها با پایه پلی وینل استات بر روی خواص مکانیکی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد استحکام چسب و چقرمگی آن به میزان 7,4 برابر در مقایسه با چسب تقویت‌نشده افزایش می‌یابد. آملی و همکارانش [15] رفتار رشد ترک را در دو اتصال با چسب اپوکسی بهبود یافته با دو لاستیک تقویت کننده مطالعه نمودند. نتایج آزمایشات وی مستقل از نوع چسب، رابطه قوی را میان سه پارامتر میانگین عمق مسیر ترک، زبری سطح شکست و زاویه سطح شکست با انرژی کرنشی آزاد شده بحرانی $\left(G_{cs}\right)$ را نشان می‌دهد.

به منظور شناسایی پارامترهای اثرگذار در ساخت اتصالات چسبی تقویت شده با الیاف‌های فلزی تحلیل‌های اجزا محدود روشی مناسب برای پشتیبانی و تایید طراحی سازه‌های اتصال چسبی و شناسایی مکانیزم‌های درگیر بر آن‌ها می‌باشد. در این مقاله به بررسی پارامترهای اثرگذار در طراحی اتصالات چسبی تقویت شده با الیاف‌های فلزی در یک اتصال تک‌لبه در دو جهت‌گیری طولی (0 درجه) و عرضی (90 درجه) پرداخته می‌شود و تأثیر کاهش فاصله افقی بین الیاف‌های فلزی در دو جهت‌گیری یادشده در توزیع مولفه‌های مختلف تنش در لایه چسب (تنش‌های پوست‌کنی و برشی) به‌صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- مدل اجزاء محدود اتصال تک لبه تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی

به‌منظور بررسی پارامترهای اثرگذار (تأثیر فاصله الیاف‌های فلزی و قرارگیری الیاف‌های فلزی در دو جهت‌گیری متفاوت) مدلسازی بایستی بصورت سه بعدی صورت پذیرد. در تحلیل صورت گرفته، از اتصالات تک لبه شکل 1 که یکی از پرکاربردترین اتصالات چسبی به‌شمار می‌آید، استفاده شده است. بارگذاری در انتهای اتصال تک لبه به‌صورت گسترده وارد شده و مقدار آن برابر $\left(5.55\frac{N}{mm^2}\right)$ است (شکل 2). همان‌طور که در شکل 2 نمایان است در مدل‌سازی صورت گرفته از المان‌های توپر[3] برای اتصال تک لبه مورد مطالعه استفاده شده است. تعداد المان‌ها برای بررسی توزیع تنش در لایه چسب و الیاف‌های فلزی در مقایسه با نواحی غیر تماس چسب با چسبنده بیشتر بوده و به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا نمونه مش‌بندی زده شده به نوعی تضمین کننده دقت جواب (و نه صحت آن) در اتصال مدلسازی شده باشد. با توجه به شکل 2 شرایط مرزی در یک طرف اتصال بصورت کامل گیردار بوده و در

1- Double Butt Lap joint
2- Peel stress

3- Solid element

طرف دیگر اتصال فقط در جهت اعمال نیرو آزاد است [1]. در جدول 1 مشخصات چسب و چسبنده تعیین شده است.

3- نتایج اجزا محدود

فاصله افقی بین الیاف‌های فلزی تقویت‌کننده یکی از پارامترهای مهم برای استحکام بخشی لایه چسب در اتصالات چسبی بشمار می‌آید که در دو جهت‌گیری طولی و عرضی (0 و 90 درجه) مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه تأثیر کاهش پارامتر فاصله افقی بین الیاف‌های تقویت‌کننده بر توزیع تنش و بیشینه مقادیر آن در طول لایه چسب در وسط عرض و ضخامت لایه چسب در جهت‌گیری‌های یادشده بررسی می‌شود.

3-1- توزیع تنش پوست‌کنی و برشی در لایه چسب تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری طولی

در شکل 3 نمودار توزیع تنش پوست‌کنی در طول لایه چسب ارائه شده است. جهت بررسی تأثیر فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی از یک پارامتر بی‌بعد $\left(a'=a/t\right)$ استفاده شد که با کاهش فاصله افقی بین الیاف‌های فلزی تقویت‌کننده و افزایش تعداد آن‌ها مقادیر بیشینه تنش پوست‌کنی کاهش پیدا کرده و توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌گردد. باید این نکته را یادآور شد که کاهش فاصله افقی بین الیاف‌های فلزی نیز محدودیت‌هایی را در ساخت این‌گونه اتصالات به همراه خواهد داشت و نمی‌توان کاهش فاصله افقی را تحت هر شرایطی ادامه داد [1]. همان‌طور که در شکل 3 پیداست در کمترین فاصله افقی تحلیل‌شده $\left(a'=0.3\right)$ توزیع تنش پوست‌کنی یکنواخت‌تر شده و بیشینه مقدار تنش در این حالت نسبت به چسب تقویت نشده به میزان 43/004 کاهش پیدا کرده است.

همان‌گونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی تقویت‌کننده و افزایش تعداد آن‌ها باربری توسط الیاف‌های فلزی در مقایسه با لایه چسب سهم بیشتری را به خود اختصاص داده و دربهبود توزیع تنش و کاهش بیشینه تنش برشی نقش قابل توجهی را ایفا می‌کنند، به‌گونه‌ای که در کمترین فاصله افقی تحلیل شده میزان بیشینه تنش برشی نسبت به چسب تقویت‌نشده به میزان 67/009 کاهش پیدا می‌کند. از مقایسه نتایج به‌دست آمده از تأثیر الیاف‌های فلزی در بهبود توزیع

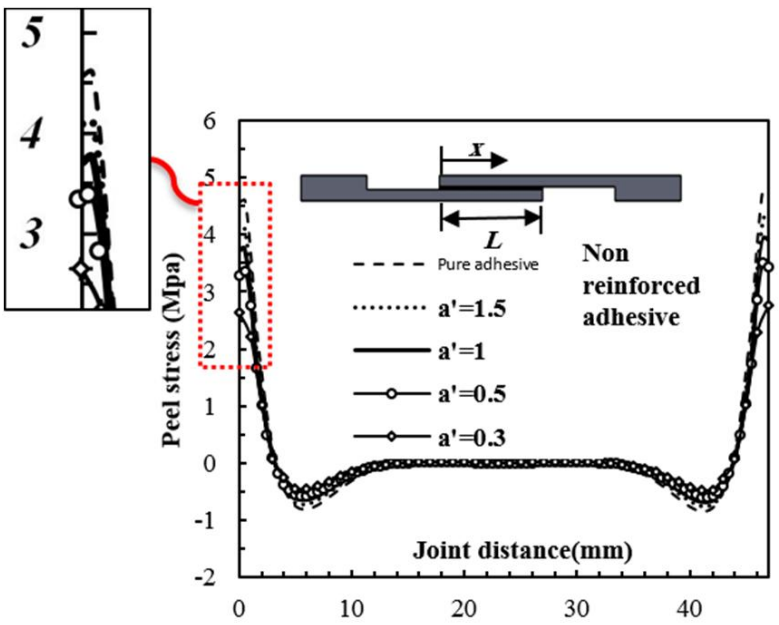

Fig.3 Peel stress distribution along the joint length in the various horizontal distance at the longitudinal direction

شکل 3 توزیع تنش پوست کنی در طول اتصال در فواصل افقی متفاوت در جهت‌گیری طولی

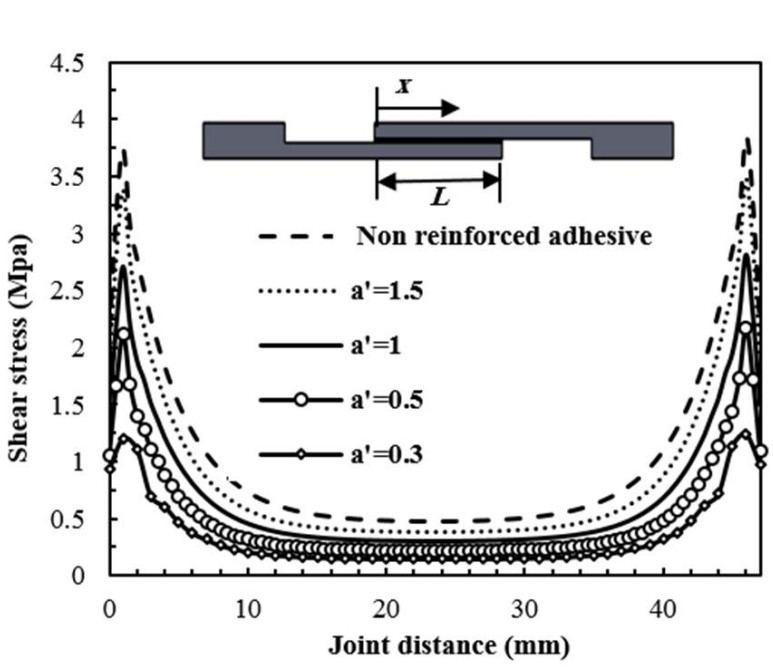

Fig.4 Peel stress distribution along the joint length in the various horizontal distance at the longitudinal direction

شکل 4 توزیع تنش برشی در طول اتصال در فواصل افقی متفاوت در جهت‌گیری طولی

جدول 1 مشخصات چسب و چسبنده در اتصال تک‌لبه

Table 1 Specification of the adhesive and adherend in the single lap joint

خواص مکانیکی	چسبنده (آلومینیوم[1])	چسب دو جزیی[2]	الیاف فلزی (آلومینیوم[1])
مدول یانگ (GPa)	71.7	5.54	71.7
ضریب پواسون	0.33	0.35	0.33

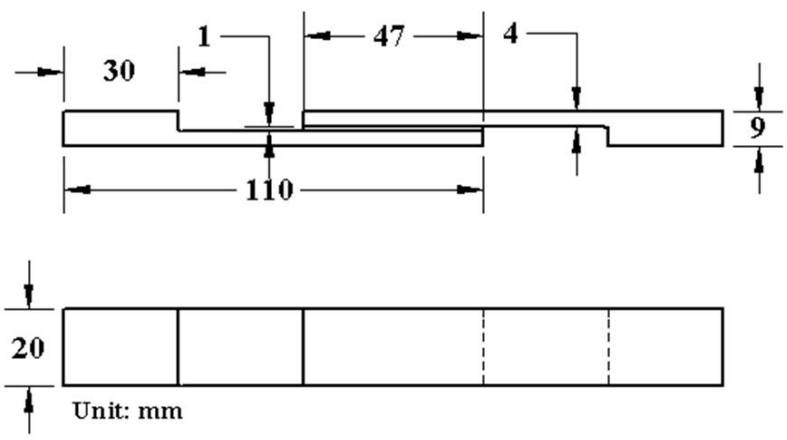

Fig.1 Single lap joint geometry and embedded metallic fibers in the adhesive layer

شکل 1 هندسه اتصال تک لبه و قرارگیری الیاف فلزی در لایه چسب

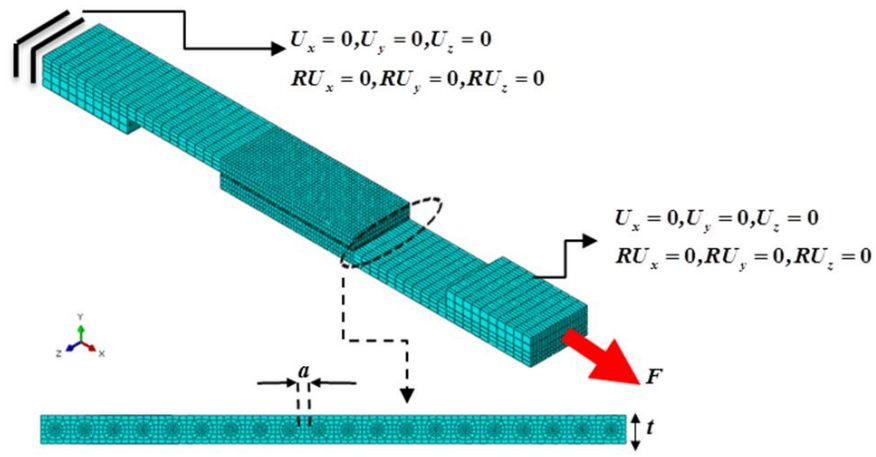

Fig.2 Finite element model and boundary condition of single lap joint reinforced by metal fibers with the longitudinal direction

شکل 2 مدل المان محدود و شرایط مرزی در اتصال تک لبه تقویت‌شده توسط الیاف فلزی در جهت‌گیری طولی

تنش برشی و تنش پوست‌کنی در جهت‌گیری طولی می‌توان این نکته را یادآور شد که الیاف‌های فلزی در کاهش بیشینه مقدار تنش برشی و بهبود توزیع تنش در آن عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

2-3- توزیع تنش پوست‌کنی و برشی در لایه چسب تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری عرضی

در شکل 5 نمودار توزیع تنش پوست‌کنی در طول لایه چسب در جهت‌گیری عرضی ارائه شده است. با مشخص کردن فاصله الیاف‌های فلزی در لایه چسب در راستای طول اتصال، این امکان می‌تواند فراهم شود تا مقادیر بیشینه تنش در لایه چسب را شناسایی کرد. در ابتدا با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی، توزیع تنش پوست‌کنی به دلیل تمرکز تنش‌های محلی مکرر در طول لایه چسب، نایکنواخت‌تر شده و بیشینه مقادیر تنش پوست‌کنی در لایه چسب افزایش می‌یابد و سبب تضعیف اتصال می‌گردد. در نهایت با کاهش بیشتر فاصله افقی و افزایش تعداد الیاف‌های فلزی، باربری توسط این تقویت‌کننده‌ها افزایش یافته و تأثیر منفی ناشی از تمرکز تنش‌های مکرر ایجاد شده در اتصال خنثی می‌گردد و سبب بهبود توزیع تنش پوست‌کنی و کاهش بیشینه مقادیر آن می‌گردد، به طوری که در کمترین فاصله افقی تحلیل‌شده مقدار بیشینه تنش پوست‌کنی به میزان 13% نسبت به چسب تقویت نشده کاهش پیدا می‌کند. همانطور که در شکل 5 مشاهده می‌شود الیاف‌های تقویت‌کننده میانی در لایه چسب از سطح تنش پایین‌تری برخوردار بوده و الیاف‌های ابتدایی و انتهایی اتصال به دلیل مقادیر بیشتر تنش در لایه چسب، تنش بیشتری را تحمل می‌نمایند که این نشان از نقش موثر آن‌ها در لایه چسب است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از کاهش تنش پوست‌کنی در لایه چسب توسط الیاف‌های فلزی در کمترین فاصله افقی تحلیل شده در دو جهت‌گیری طولی و عرضی، بهبود توزیع تنش پوست‌کنی و کاهش بیشینه مقادیر تنش در طول اتصال در جهت‌گیری طولی شایان توجه است. در شکل 6 توزیع تنش برشی در طول لایه چسب درجهت‌گیری عرضی ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است با کاهش فاصله افقی الیاف‌های فلزی و افزایش تعداد آن‌ها توزیع تنش برشی یکنواخت‌تر و مقادیر بیشینه تنش برشی کاهش پیدا می‌کند، به‌گونه‌ای که در کمترین فاصله‌ی افقی تحلیل‌شده بیشینه تنش برشی نسبت به چسب تقویت‌نشده به میزان 30% کاسته می‌شود. با توجه به شکل‌های 6,5 روند تغییرات بیشینه مقادیر تنش پوست‌کنی و تنش برشی با کاهش فاصله افقی الیاف‌های فلزی با یکدیگر متفاوت است (با کاهش فاصله افقی الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری

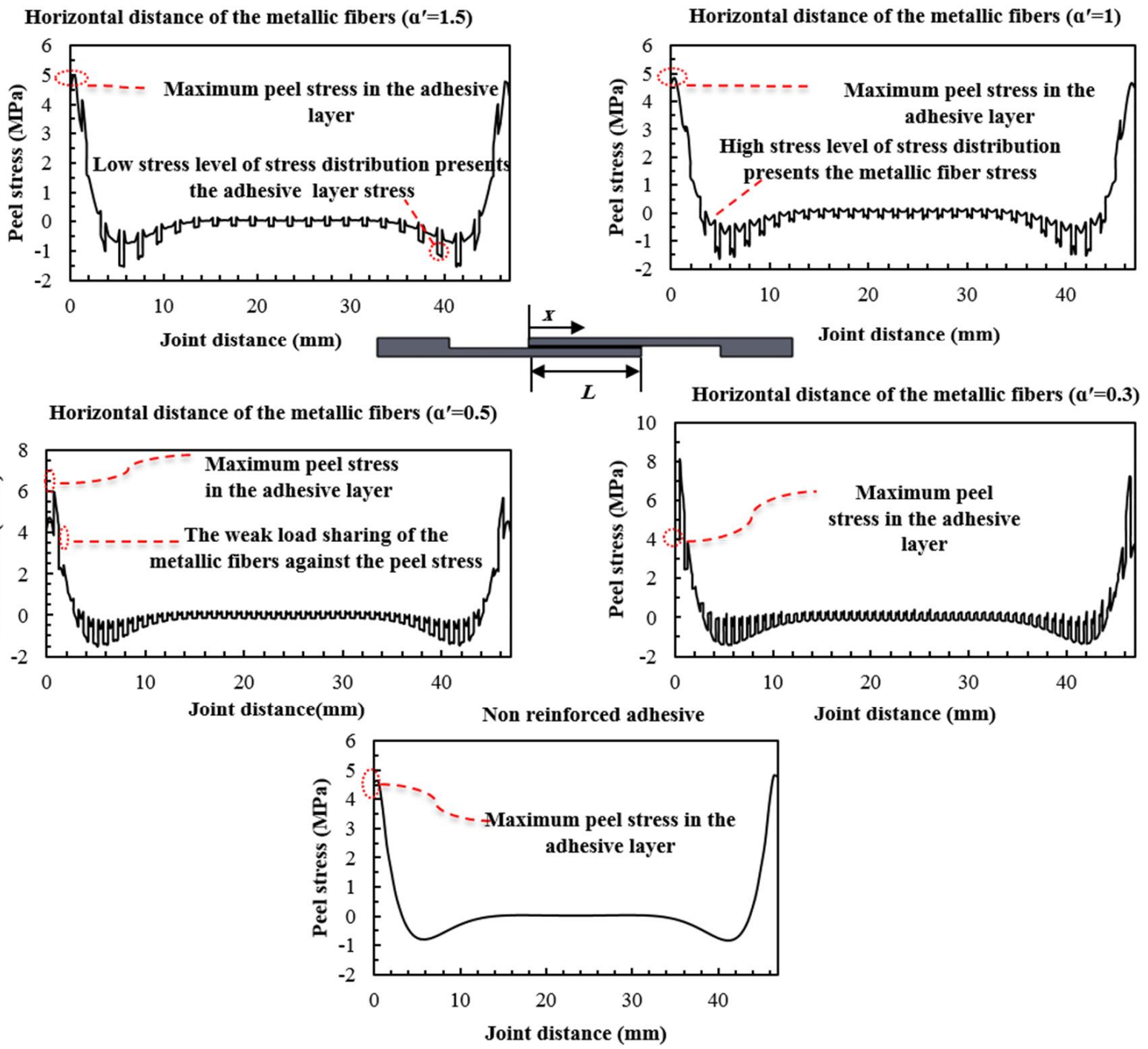

Fig.5 Peel stress distribution in the adhesive layer with the lateral direction

شکل 5 توزیع تنش پوست‌کنی در لایه چسب در جهت‌گیری عرضی

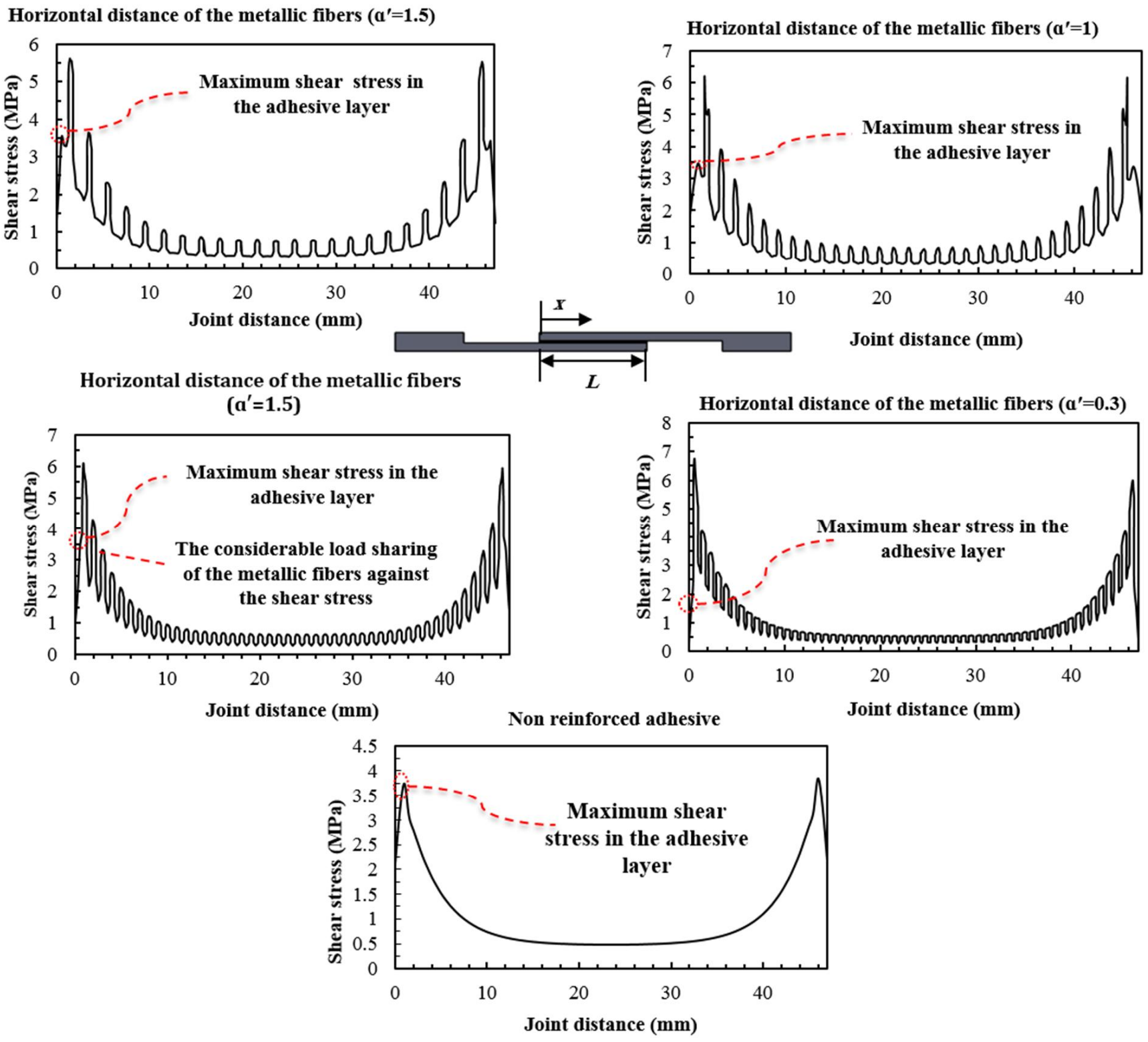

Fig.6 Shear stress distribution in the adhesive layer with the lateral direction

شکل 6 توزیع تنش برشی در لایه چسب در جهت‌گیری عرضی

عرضی بیشینه تنش پوست‌کنی در لایه چسب در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، ولی مقادیر بیشینه تنش برشی پیوسته روبه کاهش است). دلیل این رفتار متفاوت در دو تنش پوست‌کنی و برشی در جهت‌گیری عرضی را می‌توان به میزان باربری الیاف‌های فلزی در لایه چسب مرتبط ساخت (شکل‌های 6,5) به‌طوری‌که الیاف‌های فلزی در برابر تنش‌های برشی باربری بیشتری نسبت تنش‌های پوست‌کنی از خود نشان می‌دهند و اثر تضیف‌کننده تمرکز تنش‌های محلی در لایه چسب را در تمام فواصل افقی تحلیل شده خنثی می نمایند. با توجه به نتایج بدست آمده از کاهش تنش برشی در لایه چسب توسط الیاف‌های فلزی در کمترین فاصله افقی تحلیل شده در دو جهت‌گیری طولی و عرضی، بهبود توزیع تنش برشی و کاهش بیشینه مقادیر تنش در طول اتصال در جهت‌گیری طولی قابل توجه است.

در شکل 7 توزیع تنش پوست‌کنی بصورت سه‌بعدی در دو جهت‌گیری طولی و عرضی ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های 7-b و 7-c پیداست در هنگامی که الیاف‌های فلزی در راستای طولی چیده شوند باربری و تحمل تنش پوست‌کنی بیشتری را نسبت به چیدمان عرضی از خود نشان می‌دهند و سبب کاهش بیشتر و توزیع یکنواخت‌تر تنش پوست‌کنی در طول لایه چسب می‌شود.

با توجه به شکل 7-a مقادیر تنش پوست‌کنی در راستای عرض اتصال تک‌لبه به‌صورت غیریکنواخت است. در ابتدا و انتهای عرض اتصال مقادیر تنش پوست‌کنی کمینه مقدار بوده و در وسط عرض اتصال به بیشینه مقدار خود خواهد رسید. در چیدمان الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری طولی شکل 7-b بر خلاف تأثیر قابل توجهی که در بهبود توزیع تنش و کاهش بیشینه مقادیر آن در طول لایه چسب نسبت به جهت‌گیری عرضی از خود نشان داد، در راستای عرضی سبب به‌وجود آمدن تمرکز تنش‌های محلی پی‌درپی در عرض اتصال شده و این امر باعث توزیع غیر یکنواخت‌تر تنش پوست‌کنی و به همراه آن تضعیف لایه چسب در راستای عرض اتصال را به همراه خواهد داشت. در چیدمان عرضی، الیاف‌های تقویت‌کننده باعث می‌شوند که توزیع تنش پوست‌کنی در راستای عرض اتصال بهبود و یکنواخت‌تر شود و در افزایش استحکام لایه چسب نقش مفیدی را ایفا کنند.

در شکل 8 توزیع تنش برشی بر لایه چسب به صورت سه‌بعدی در دو جهت‌گیری طولی و عرضی ترسیم شده است. همان‌طور که پیداست تأثیر الیاف‌های فلزی در دو جهت‌گیری بررسی شده در بهبود توزیع تنش برشی و

کاهش مقادیر بیشینه آن نسبت به تنش پوست‌کنی مشهودتر است. الیاف‌های فلزی نقش قابل توجهی در باربری و تحمل تنش‌های برشی از خود ایفا می‌کنند. در رابطه با توزیع تنش در راستای عرض اتصال، چیدمان الیاف در جهت‌گیری عرضی مانند توزیع تنش پوست‌کنی سبب بهبود توزیع تنش برشی در راستای عرض اتصال می‌شود، این در حالی است که در جهت‌گیری طولی، مانند توزیع تنش پوست‌کنی مقادیر تنش برشی در راستای عرض اتصال غیر یکنواخت‌تر می‌شود.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی تأثیر فاصله افقی میان ماکرو الیاف‌های فلزی به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم طراحی در لایه چسب برای بهبود توزیع تنش پوست‌کنی و برشی در دو جهت‌گیری طولی و عرضی پرداخته شده است. در جهت‌گیری طولی، توزیع تنش‌های پوست‌کنی و برشی با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی بهبود یافت و مقادیر بیشینه تنش‌های

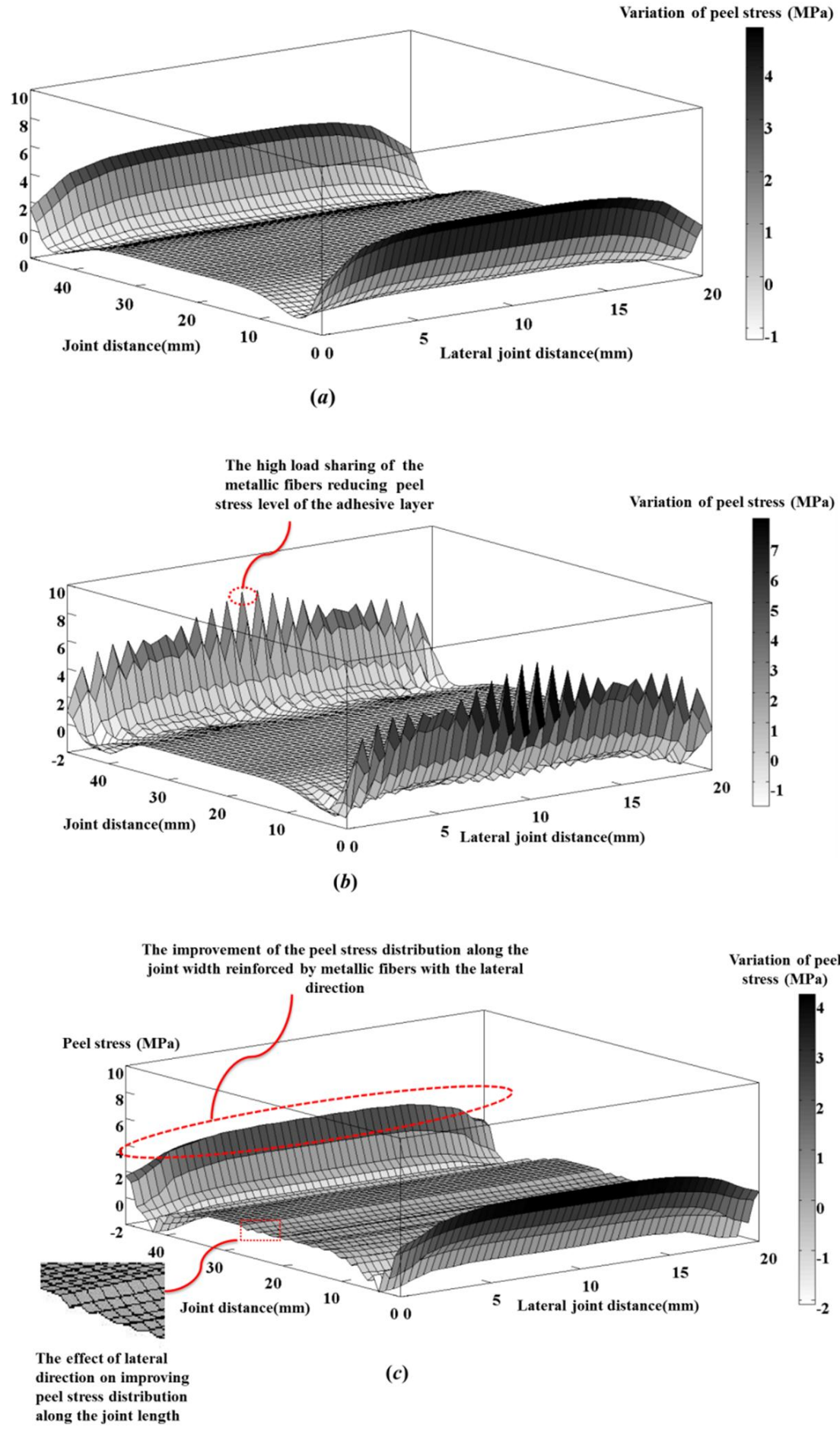

Fig.7 The comparison of 3D peel stress distribution in the adhesive layer at the minimum horizontal distance between the metal fibers $(a' = 0.3)$ with unreinforced adhesive a unreinforced adhesive b) adhesive reinforced by metal fibers with longitudinal direction c) adhesive reinforced by metal fibers with lateral direction

شکل 7 مقایسه توزیع سه بعدی تنش‌های پوست‌کنی در لایه چسب در کمترین فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی $(a' = 0.3)$ با چسب تقویت‌نشده. الف) تنش پوست‌کنی در چسب تقویت نشده ب) تنش پوست‌کنی در چسب تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری طولی ج) تنش پوست‌کنی در چسب تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری عرضی

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.9.2]

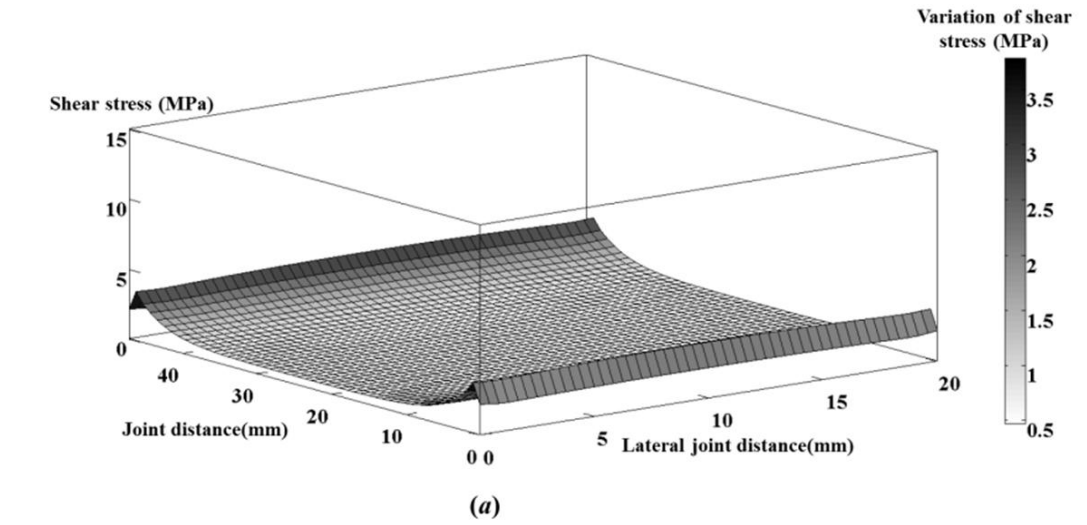

Fig.8 The comparison of 3D shear stress distribution in the adhesive layer at the minimum horizontal distance between the metal fibers $(a' = 0.3)$ with unreinforced adhesive a) unreinforced adhesive b) reinforced by metal fibers with longitudinal direction c) adhesive reinforced by metal fibers with lateral direction

شکل 8 مقایسه توزیع سه‌بعدی تنش‌های برشی در لایه چسب در کمترین فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی $(a' = 0.3)$ با چسب تقویت‌نشده. الف) تنش برشی در چسب تقویت‌نشده ب) تنش برشی در چسب تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری طولی ج) تنش برشی در چسب‌تقویت شده توسط الیاف‌های فلزی در جهت‌گیری عرضی

پوست‌کنی و برشی کاهش چشمگیری داشت، همچنین در جهت‌گیری عرضی با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی توزیع تنش پوست‌کنی در ابتدا به دلیل افزایش تمرکز تنش‌های مکرر در طول اتصال و میزان باربری کم الیاف‌های فلزی نایکنواخت‌تر شده و بیشینه تنش پوست‌کنی نسبت به چسب تقویت‌نشده افزایش یافت. با کاهش بیشتر فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی و افزایش تعداد آن‌ها توزیع تنش پوست‌کنی نسبت به چسب تقویت‌نشده یکنواخت‌تر و بیشینه مقدار آن کاهش یافت. برخلاف روند به‌وجودآمده در تنش پوست‌کنی با جهت‌گیری عرضی، به دلیل باربری قابل توجه الیاف‌های فلزی در اثر تنش‌های برشی ایجادشده در لایه چسب، توزیع تنش برشی با کاهش فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی یکنواخت‌تر شده و بیشینه مقادیر تنش برشی به‌صورت منظم کاهش یافت. از نمودارهای حاصل‌شده از توزیع تنش‌های پوست‌کنی و برشی در دو جهت‌گیری طولی و عرضی می‌توان به این نکته دست یافت که الیاف‌های فلزی با جهت‌گیری طولی در طول اتصال در تمامی فواصل افقی تحلیل شده، توزیع تنش

پوست‌کنی و برشی بهتری از خود نشان می‌دهند و کاهش مقادیر بیشینه تنش پوست‌کنی و برشی در این جهت‌گیری قابل توجه است. چیدمان عرضی الیاف‌های فلزی باوجود این‌که عملکرد ضعیف‌تری در توزیع تنش پوست‌کنی و برشی در راستای طول اتصال از خود نشان دادند، ولی در بهبود توزیع تنش‌های پوست کنی و برشی در عرض اتصال نقش مفیدی را ایفا کردند. این در حالی است که در چیدمان طولی بر خلاف رفتار مؤثر در بهبود توزیع تنش‌های بررسی شده در طول اتصال، در عرض اتصال توزیع تنش‌های نایکنواخت‌تری ایجاد نمودند. نکته دیگری که در ساخت اتصالات چسبی تقویت‌شده توسط الیاف‌های فلزی باید در نظر گرفت محدودیت فاصله افقی میان الیاف‌های فلزی است، با افزایش بیش از حد الیاف‌های فلزی در یک اتصال با عرض ثابت خطاهای ساخت این اتصالات افزایش پیدا کرده و توزیع تنش نامطلوبی در لایه چسب ایجاد می‌شود.

5- فهرست علایم

a	فاصله میان دو الیاف فلزی متوالی (mm)
t	ضخامت لایه چسب
a'	نسبت فاصله میان دو الیاف فلزی متوالی به ضخامت لایه چسب $\left(\frac{a}{t}\right)$

6- مراجع

[1] H. Khoramishad, S.M.J Razavi, Metallic fiber-reinforced adhesively bonded joints, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 55, pp. 114-122, 2014.
[2] M. Saeed, M.-S. Zhan, Adhesive strength of nano-size particles filled thermoplastic polyimides. Part-I: Multi-walled carbon nano-tubes (MWNT)–polyimide composite films, *adhesion and adhesives*, Vol. 27, No. 4, pp. 306-318, 2007.
[3] S. Khalili, A. Shokuhfar, S. Hoseini, M. Bidkhori, S. Khalili, R. Mittal, Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 28, No. 8, pp. 436-444, 2008.
[4] S. Meguid, Y. Sun, On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces, *Materials & design*, Vol. 25, No. 4, pp. 289-296, 2004.
[5] M. You, Y. Zheng, X.-L. Zheng, W.-J. Liu, Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints, *adhesion and adhesives*, Vol. 23, No. 5, pp. 365-369, 2003.
[6] T. Sadowski, M. Kneć, P. Golewski, Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, No. 5, pp. 338-346, 2010.
[7] A. Tutunchi, R. Kamali, A. Kianvash, Steel-epoxy composite joints bonded with nano-TiO2 reinforced structural acrylic adhesive, *Adhesion*, in press, 2014.
[8] S. Khalili, M. Tavakolian, A. Sarabi, Mechanical properties of nanoclay reinforced epoxy adhesive bonded joints made with composite materials, *Adhesion Science and Technology*, Vol. 24, No. 11-12, pp. 1917-1928, 2010.
[9] R. Kilik, R. Davies, S. Darwish, Thermal conductivity of adhesive filled with metal powders, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, No. 4, pp. 219-223, 1989 .
[10] R. Kilik, R. Davies, Mechanical properties of adhesive filled with metal powders, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, No. 4, pp. 224-228, 1989.
[11] L. Zhai, G. Ling, J. Li, Y. Wang, The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive, *Materials Letters*, Vol. 60, No. 25, pp. 3031-3033, 2006.
[12] J. G. Kim, Y. J. Hwang, S. H. Yoon, Improvement of the fracture toughness of adhesively bonded stainless steel joints with aramid fibers at cryogenic temperatures, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 9, pp. 2982-2989, 2012.
[13] A. Kinloch, J. Lee, A. Taylor, S. Sprenger, C. Eger, D. Egan, Toughening structural adhesives via nano- and micro-phase inclusions, *Adhesion*, Vol. 79, No. 8-9, pp. 867-873, 2003.
[14] U. Khan, P. May, H. Porwal, K. Nawaz, J. N. Coleman, Improved adhesive strength and toughness of polyvinyl acetate glue on addition of small quantities of graphene, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 5, No. 4, pp. 1423-1428, 2013.
[15] A. Ameli, M. Papini, J. Spelt, Evolution of crack path and fracture surface with degradation in rubber-toughened epoxy adhesive joints: Application to open-faced specimens, *Adhesion and Adhesives*, Vol. 31, No. 6, pp. 530-540, 2011.

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.9.2]