



## اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز

حامد آقامحمدی<sup>1</sup>، سیدنوید حسینی آبدندانک<sup>1</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>2\*</sup>، سید محمد حسین سیادتی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 19991-43344، eslami@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/02/08

پذیرش: 97/04/01

### کلیدواژگان:

کامپوزیت الیاف/فلز

الیاف بازالت

عملیات سطحی

خوردگ خواص خمشی

### چکیده

کامپوزیت‌های الیاف/فلز گروه جدیدی از مواد کامپوزیتی هیبریدی هستند که از ورق‌های فلزی و لایه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. استفاده از کامپوزیت‌های الیاف/فلز موجب بهره‌وری از ترکیب مزایای فلزات و کامپوزیت‌های پلیمری می‌شود. به منظور بهبود چسبندگی بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی، از روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی سطح فلز استفاده می‌شود. در این تحقیق، کامپوزیت‌های آلومینیوم/اپوکسی-الیاف بازالت با روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد و اثر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی (شامل فرآیند قلیایی و حکاکی با محلول سولفوکرومیک) بر خواص خمشی آن‌ها با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی مورفولوژی سطحی آلومینیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش آماده‌سازی حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب بهبود قابل توجهی در مقادیر استحکام خمشی، کرنش شکست و انرژی جذب شده در مقایسه با روش‌های مکانیکی و قلیایی می‌شود. تفاوت در رفتار خمشی نمونه‌ها مرتبط با مورفولوژی سطحی لایه آلومینیوم آن‌ها می‌باشد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده این است که روش آماده‌سازی حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب ایجاد یک ساختار متخلخل بر روی سطح آلومینیوم می‌شود. این لایه متخلخل با ایجاد مکان‌هایی برای پر شدن توسط رزین اپوکسی، چسبندگی بهتر و قفل مکانیکی قوی‌تر بین لایه‌ها را به همراه دارد.

## Effect of various surface treatment methods on the flexural properties of fiber metal laminates

Hamed Aghamohammadi, S. Navid Hosseini Abbandanak, Reza Eslami-Farsani\*, S. M. Hossein Siadati

Faculty of materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O. B. 19991-43344, Tehran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Fiber metal laminates  
Basalt fibers  
Surface treatment  
Flexural properties

### Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are a new group of composite materials that consist of alternating thin laminates of metals and fiber reinforced polymeric composites. FMLs combine the advantages of metals and polymeric composites. In order to enhance the interfacial bonding between the alternating laminates, various surface treatment methods can be used on the metal surfaces. In this research, FMLs of alternating laminates of aluminum/epoxy-basalt fibers were fabricated using hand lay-up method. The effect of various surface treatment methods of mechanical and chemical (consist of alkaline and sulfochromic etching) on the flexural properties of the fabricated FMLs were investigated with three-point bend tests. SEM were utilized to investigate surface morphology of aluminum. Results showed that the sulfochromic etch method brought about a significant improvement in the flexural strength, strain to failure and absorbed energy in comparison to the mechanical and alkaline methods. Difference in flexural behavior of samples is attributed to their aluminum surface morphology. SEM observations showed that sulfochromic etch method created a porous layer on the aluminum surfaces. This porous layer provided channels for the epoxy resin to fill in, creating better adhesion and a much stronger mechanical interlocking between the laminates.

### 1- مقدمه

اهمیت دارد، می‌باشند. به علاوه این مواد مقاومت به خستگی و خوردگی فوق‌العاده‌ای را در کاربردها ارائه می‌دهند. به دلیل این مزایا، کامپوزیت‌ها در دهه‌های گذشته کاربرد وسیعی در صنایع هوایی پیدا کرده‌اند [1].

با این وجود، اغلب، عملکرد مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه ضعیفتر از فلزات می‌باشد. نیاز به بهبود رفتار ضربه کامپوزیت‌های پلیمری موجب توسعه و ایجاد گروه جدیدی از کامپوزیت‌ها به نام کامپوزیت‌های

مواد کامپوزیتی در دهه‌های گذشته مورد توجه متخصصان زیادی بوده است. برای اولین بار بعد از جنگ جهانی دوم استفاده از مواد کامپوزیتی در کاربردهای نظامی، تجاری شد. نوآوری در بحث کامپوزیت‌ها موجب کاهش وزن در طراحی‌های ساختاری شده است. کامپوزیت‌ها دارای مزایای زیادی نسبت به آلیاژهای فلزی (مخصوصاً در مواردی که استحکام ویژه و سفتی ویژه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

### Please cite this article using:

Aghamohammadi, H. Hosseini-Abbandanak, S. N. Eslami-Farsani, R. and Siadati, S. M. H., "Effect of various surface treatment methods on the flexural properties of fiber metal laminates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 495-502, 2020.

کارال<sup>5</sup> پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش زبری سطح آلومینیوم به دلیل افزایش قفل‌های مکانیکی بین لایه پلیمری و لایه آلومینیومی، موجب افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود.

اردکانی<sup>6</sup> و همکاران [9] به بررسی رفتار ضربه کامپوزیت‌های الیاف/فلز نوع گلار با دو روش آماده‌سازی سطحی محلول حکاکی سولفوکرومیک و تلفیق روش سولفوکرومیک و یک عامل جفت‌کننده<sup>7</sup> پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از عامل جفت‌کننده موجب بهبود رفتار ضربه در پارامترهایی مانند اندازه خسارت و بیشینه تغییرشکل مرکزی می‌شود. در یک مطالعه مشابه دیگر، لاوکاک<sup>8</sup> [10] و همکاران به بررسی تاثیر محلول‌های سولفوکرومیک همراه با عامل جفت‌کننده و سولفوفریک بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز نوع کارال پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود که محلول حکاکی سولفوکرومیک اصلاح شده موجب چسبندگی بهتری در مقایسه با محلول حکاکی سولفوفریک می‌شود.

روش آندایزینگ<sup>9</sup> به عنوان یک روش الکتروشیمیایی، به دلیل ایجاد لایه اکسیدی متخلخل میکرومتری بر روی سطح فلز، نقش بسزایی در اتصال بین لایه پلیمری و لایه فلزی دارد. استاپیوک<sup>10</sup> [11] و همکاران گزارش دادند که استفاده از روش آندایزینگ در الکترولیت اسیدسولفوریک موجب ایجاد ساختار متخلخل تری در مقایسه با آندایزینگ در الکترولیت اسیدسولفوریک می‌شود. تاثیر روش آندایزینگ با سه الکترولیت مختلف اسیدسولفوریک، اسیدسولفوریک و اسیدنیتریک بر خواص مکانیکی کارال توسط محمد و همکاران [12] انجام شد. نتایج نشان‌دهنده آن بود که فرایند آندایزینگ در محلول اسیدسولفوریک موجب ایجاد سطح متخلخل تر و زبرتری در مقایسه با فرایند آندایزینگ در محلول‌های اسیدسولفوریک و اسیدنیتریک می‌شود. استحکام بالاتر گزارش شده در کامپوزیت الیاف/فلز آندایز شده در محلول اسیدسولفوریک به دلیل پر شدن<sup>11</sup> بیشتر رزین در داخل کانال‌های متخلخل ایجاد شده با اسیدسولفوریک می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعاتی مبنی بر جایگزینی الیاف بازالت با الیاف شیشه، به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص مکانیکی قابل مقایسه و خسارات محیطی کمتر انجام شده است. الیاف بازالت دارای مقاومت خوب در برابر واکنش‌های شیمیایی و بارگذاری ضربه، ایجاد بخارات سمی کمتر و همچنین کرنش شکست فوق‌العاده در مقایسه با الیاف کربن می‌باشد. از جمله مزایای الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه می‌توان به مقاومت حرارتی بالا، اشتعال‌پذیری پایین، سازگاری با بدن انسان، مقرون به صرفه بودن، دسترسی بالا و سهولت تولید اشاره کرد. همچنین در شرایطی که رطوبت زیاد باشد، الیاف بازالت چسبندگی خوبی به رزین‌های پلیمری دارند [13,14].

علی‌رغم مطالعات صورت گرفته، تقریباً در هیچ‌کدام از این مطالعات به مقایسه تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز به وضوح و با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پرداخته نشده است. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام شده قبلی و در ادامه این تحقیقات، هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر روش‌های آماده‌سازی سطحی متفاوت بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز

الیاف/فلز<sup>1</sup> گردید. کامپوزیت‌های الیاف/فلز گروهی از مواد کامپوزیتی ترکیبی هستند که از اتصال بین لایه‌های فلزی و لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف تشکیل شده‌اند. معمولاً در این نوع کامپوزیت‌ها، از فلزاتی مانند آلومینیوم، منیزیم یا تیتانیوم و الیافی مانند الیاف شیشه، کربن و کولار به عنوان الیاف تقویت‌کننده در لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. به طور کلی استفاده از کامپوزیت‌های الیاف/فلز موجب بهره‌مندی از ترکیب خواص هر دو جز می‌شود، به طوری که خواص ضعیف خستگی و خوردگی فلزات و خواص سایشی پایین و مقاومت به ضربه و تعمیرپذیری پایین کامپوزیت‌ها را می‌توان به وسیله ترکیب این دو ماده برطرف کرد [3-1].

امروزه با توجه به مزایای کامپوزیت‌های الیاف/فلز، این مواد کاربرد ویژه‌ای در صنعت هواپیماسازی پیدا کرده‌اند، به طوری که تعدادی از شرکت‌ها تمایل به تعویض قطعات آلومینیومی با این مواد را داشته‌اند. هر دو نوع کامپوزیت الیاف/فلز آرال<sup>2</sup> و گلار<sup>3</sup> در حال حاضر جزو پرکاربردترین مواد در بدنه هواپیما به شمار می‌روند. کامپوزیت‌های الیاف/فلز به طور موفقیت‌آمیزی در ایرباس A380 استفاده شده‌اند. همچنین استفاده از آرال در پنل پوسته پایینی هواپیمای فوکر 27 و درب محموله در بوئینگ C17 گسترش یافته است [1].

با این وجود، با توجه به گزارشات شکست 71 هواپیمای بوئینگ 747، حدود 90 مورد از 688 تعمیرات به دلیل ضربه اجسام خارجی بوده است. بنابراین، بدنه هواپیما باید بر حسب مکان و احتمال ضربه، بتواند مقادیر معینی از انرژی ضربه را تحمل کند. بنابراین در سال‌های اخیر، توجه زیادی برای مشخصه‌یابی پاسخ کامپوزیت‌های الیاف/فلز پیدا شده است. در این مطالعات، تاثیر متغیرهایی مانند نوع فلزات، نوع الیاف، نوع زمینه، نحوه لایه‌گذاری، کسر حجمی فلز/کامپوزیت و غیره بر روی رفتار ضربه کامپوزیت‌های الیاف/فلز مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل آن که جدایش سطحی، کشش و خمش لایه‌های آلومینیومی وابسته به چسبندگی لایه‌های مجاور می‌باشند، پیوند بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی نقش مهمی را در رفتار ضربه کامپوزیت‌های الیاف/فلز ایفا می‌کنند [2-4].

همچنین، کامپوزیت‌های الیاف/فلز مکرراً در معرض سیکل‌های حرارتی هستند و با توجه به این که ضربه انبساط حرارتی آلومینیوم پایین‌تر از پلیمرها می‌باشد، عدم تطابق حرارتی موجب جدایش بین لایه‌ها می‌شود [5]. بنابراین با توجه به این که جدایش بین لایه‌ها مهمترین دلیل شکست کامپوزیت‌های الیاف/فلز محسوب می‌شود، موضوع فصل مشترک در این مواد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [6,7].

پارامترهایی مانند مورفولوژی، زبری سطحی و ترشوندگی لایه فلزی بر روی چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیت‌های الیاف/فلز تاثیر می‌گذارند. مطالعات متعددی مبنی بر تاثیر مورفولوژی سطحی لایه فلزی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز صورت گرفته است، به طوری که به منظور بهبود خواص سطحی فلز از روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی استفاده می‌شود. معمولاً عملیات سطحی لایه فلزی در کامپوزیت‌های الیاف/فلز با روش‌های مکانیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی انجام می‌شود [1].

محمد<sup>4</sup> و همکاران [8] با استفاده از سناده‌های با شماره‌های مختلف به بررسی تاثیر زبری سطح بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف/فلز نوع

<sup>5</sup> CARALL (carbon fiber aluminum laminates)

<sup>6</sup> Ardakani

<sup>7</sup> Coupling agent

<sup>8</sup> Lawcock

<sup>9</sup> Anodizing

<sup>10</sup> Ostapiuk

<sup>11</sup> Infiltration

<sup>1</sup> Fiber metal laminates (FMLs)

<sup>2</sup> Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARALL)

<sup>3</sup> Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy

<sup>4</sup> Mohamad

جدول 1 روش‌های آماده‌سازی سطحی مختلف

Table 1 Methods of different surface treatment

روش فرایند	نوع آماده‌سازی سطحی
سنباده‌زنی با کاغذ سنباده شماره 80 و سپس تمیز کردن سطح آلومینیوم با استون به منظور پاک کردن مواد روغنی از روی سطح	مکانیکی
پاک کردن سطح با استون و سپس غوطه‌وری در محلول 2 درصد هیدروکسید سدیم به مدت 2 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد و شستشو با آب مقطر	قلیایی
پاک کردن سطح با استون، غوطه‌وری در محلول هیدروکسید سدیم و سپس عملیات حکاکی در محلول سولفورومیک به مدت 30 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد	حکاکی با محلول سولفورومیک

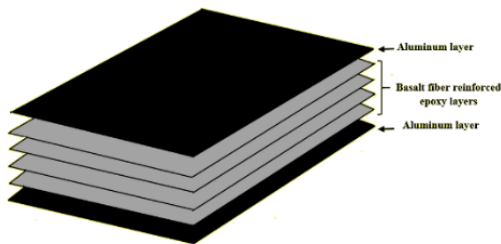


Fig. 1 Laminating configuration of fiber metal laminates

شکل 1 حالت لایه‌گذاری در کامپوزیت‌های الیاف/فلز



Fig. 2 Photograph of steel-mold

شکل 2 تصویر قالب فولادی

### 3- نتایج و بحث

منحنی‌های تنش-کرنش کامپوزیت‌های الیاف/فلز با روش‌های آماده‌سازی سطحی مکانیکی، قلیایی و حکاکی با محلول سولفورومیک در شکل 3 آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که منحنی‌های تنش-کرنش، حاصل از میانگین 3 آزمایش برای هر نمونه می‌باشند. همانطور که در بخش ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز گفته شد نمونه‌ها دارای ابعاد  $15 \times 2.5$  سانتی‌متر مربع و ضخامت  $1.8 \pm 0.05$  می‌باشند. جدول 2 نیز مقادیر میانگین استحکام خمشی و کرنش شکست کامپوزیت‌های مذکور ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، در کامپوزیت‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی، تنش خمشی به صورت خطی متناسب با کرنش افزایش پیدا می‌کند. استحکام خمشی و کرنش شکست این نمونه‌ها به ترتیب برابر با 396 مگاپاسکال و 0.0092 می‌باشد. در ناحیه خطی رفتار خمشی نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی به صورت الاستیک بوده و به دلیل پدیده تورق (جدایش) بین لایه آلومینیومی و لایه‌های کامپوزیتی، شکست در بالاترین حد تنش رخ می‌دهد. این نمونه‌ها دارای کمترین استحکام خمشی در مقایسه با نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با روش دیگر می‌باشند. کامپوزیت‌های آماده‌سازی‌شده با عملیات قلیایی دارای رفتار خمشی مشابهی با نمونه‌های آماده‌سازی‌شده با روش مکانیکی هستند،

متشکل از ورق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بافته‌شده بازالت می‌باشد.

### 2- بخش تجربی

#### 1-1- مواد

مواد مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها شامل ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0.5 میلی‌متر، الیاف بافته‌شده بازالت و رزین اپوکسی اپون<sup>1</sup> 828 با هاردنر تتا<sup>2</sup>، از شرکت مواد مهندسی مکرر می‌باشد. نسبت وزنی رزین به هاردنر برابر 100 به 13 است.

#### 2-2- آماده‌سازی سطحی آلومینیوم

قبل از لایه‌گذاری به منظور بهبود چسبندگی سطحی بین آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری، عملیات آماده‌سازی سطحی بر روی آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفت. به منظور بررسی تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی مکانیکی و شیمیایی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز، 3 روش مکانیکی، قلیایی و فرایند حکاکی با محلول سولفورومیک استفاده شد. جزئیات این فرایندها در جدول 1 آورده شده است. محلول سولفورومیک مطابق با استاندارد ASTM D2674، از مخلوط کردن دی‌کرومات سدیم و اسیدسولفوریک به دست آمد.

#### 3-2- ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، کامپوزیت‌های الیاف/فلز در حالت قرارگیری نوع 2.1 (دو لایه آلومینیوم و یک بین‌لایه<sup>3</sup> ساخته‌شده از 4 لایه رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت) در ابعاد  $15 \times 2.5$  سانتی‌متر مربع با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. بعد از لایه‌گذاری، نمونه‌ها درون قالب گذاشته شده و سپس در حین فرایند پخت<sup>4</sup> رزین اپوکسی، با استفاده از دستگاه پرس تحت فشار قرار گرفتند. فشار اعمالی موجب کاهش حباب‌های موجود در رزین و خارج شدن رزین اضافی می‌شود. شکل 2 نشان‌دهنده تصویری از قالب مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های الیاف/فلز در این مطالعه می‌باشد.

#### 4-2- بررسی میکروساختاری و مکانیکی

بعد از عملیات آماده‌سازی، بررسی مورفولوژی سطحی آلومینیوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN انجام پذیرفت. آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه کوپا<sup>5</sup> 10 تنی در دمای محیط، مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام شد. استحکام خمشی نمونه‌ها نیز مطابق با این استاندارد و با توجه به رابطه 1 محاسبه شد:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $\sigma_f$  استحکام خمشی (مگاپاسکال)، P بیشترین نیرو در منحنی‌های تنش-کرنش (نیوتن)، L طول نمونه طبق استاندارد خمش که بر روی فک‌های دستگاه قرار می‌گیرد (میلی‌متر)، b عرض نمونه (میلی‌متر) و d ضخامت نمونه (میلی‌متر) می‌باشد. همچنین مقادیر انرژی جذب‌شده با استفاده از اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی تنش-کرنش به دست آمد.

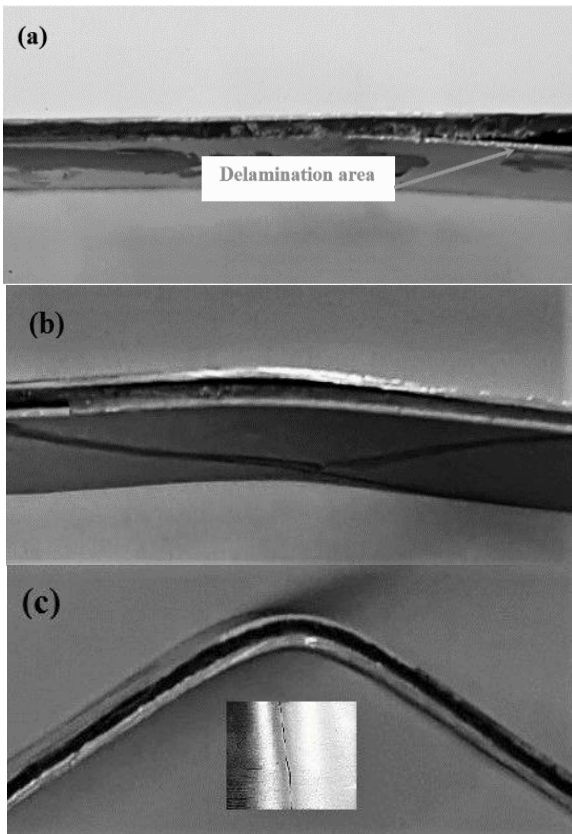
<sup>1</sup> Epon

<sup>2</sup> Tetra

<sup>3</sup> Interlayer

<sup>4</sup> Curing

<sup>5</sup> Koopa



**Fig. 4** Photograph of bending samples of basalt fiber metal laminates with a) mechanical treatment b) alkaline treatment and c) sulfochromic etch treatment

شکل 4 تصاویر نمونه‌های خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز با (الف) عملیات مکانیکی، (ب) عملیات قلیایی و (ج) عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک

مقادیر انرژی جذب‌شده نمونه‌ها بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از مساحت زیر منحنی میانگین تنش-کرنش در شکل 5 ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، انرژی جذب‌شده نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفو کرومیک بسیار بالاتر از نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌باشد. انرژی جذب‌شده نمونه‌ها با محلول سولفو کرومیک برابر با 25.42 ژول بر میلی‌متر مکعب می‌باشد که 12.5 برابر بیشتر از انرژی جذب‌شده نمونه‌های مکانیکی (2.02 ژول بر میلی‌متر مکعب) است.

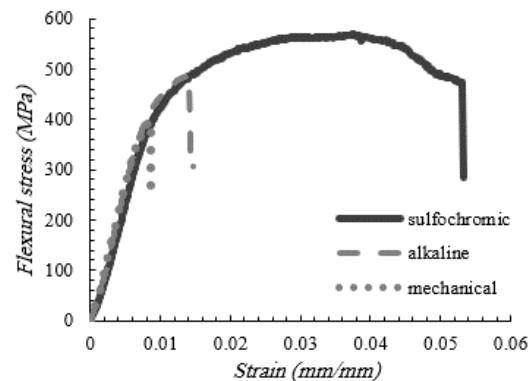
شکل 6 نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی سطحی الیاف‌های آلومینیوم با عملیات سطحی متفاوت می‌باشد. مطابق با شکل 6-الف، آماده‌سازی سطحی با روش مکانیکی فقط موجب ایجاد زبری ماکرومتری بر روی سطح آلومینیوم می‌شود و با توجه به نتایج آزمون خمش می‌توان نتیجه گرفت که روش مکانیکی برای اتصال لایه فلزی و لایه پلیمری در کامپوزیت‌های الیاف/ فلز مناسب نمی‌باشد.

با توجه به شکل 6-ب مشخص است که عملیات آماده‌سازی سطحی قلیایی به دلیل ایجاد لایه هیدروکسید آلومینیوم، موجب ایجاد یک ساختار پولکی شکل بر روی سطح می‌شود. رفتار بهتر نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش قلیایی در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی، مرتبط با مورفولوژی سطحی آن می‌باشد، به طوری که این سطح دارای زبری میکرومتری بوده و در نتیجه ناحیه سطحی بیشتری را برای اتصال فراهم می‌کند و موجب بهبود مکانیزم قفل مکانیکی می‌شود.

اما این نمونه‌ها دارای استحکام خمشی و کرنش شکست به ترتیب برابر با 489 مگاپاسکال و 0.0146 می‌باشند، که این مقادیر در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی بالاتر است.

مطابق با نمودار شکل 3 و نتایج جدول 2، رفتار خمشی کامپوزیت‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفو کرومیک کاملاً متفاوت از نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، این نمونه‌ها بعد از رسیدن به بیشینه تنش، قادر به تحمل این تنش تا حد بالایی از کرنش هستند. استحکام خمشی و کرنش شکست این نمونه‌ها به ترتیب برابر با 568 مگاپاسکال و 0.0532 می‌باشند. در مجموع، با مقایسه استحکام خمشی و کرنش شکست نمونه‌های با روش‌های آماده‌سازی سطحی مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حکاکی ورقه‌های آلومینیومی با محلول سولفو کرومیک موجب ایجاد چسبندگی عالی بین لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیت پلیمری می‌شود.

تصاویر نمونه‌های مختلف بعد از تست خمش سه نقطه‌ای در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4-الف دیده می‌شود، نمونه‌های با عملیات سطحی مکانیکی تغییر شکل محدودی دارند و جدایش بین لایه‌های آن به وضوح قابل تشخیص است، که این نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف بین لایه‌های آن می‌باشد. همچنین تغییر شکل خمشی نمونه‌های با عملیات سطحی قلیایی بالاتر از نمونه‌های مکانیکی می‌باشد (شکل 4-ب). می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش قلیایی موجب چسبندگی بهتری در مقایسه با روش مکانیکی می‌شود. مطابق با شکل 4-ج، در نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفو کرومیک هیچ‌گونه تورق و یا ترک بین لایه‌های مشاهده نمی‌شود و شکست در این نمونه‌ها به دلیل ایجاد ترک در لایه پایینی آلومینیوم (که تحت کشش می‌باشد)، رخ می‌دهد.



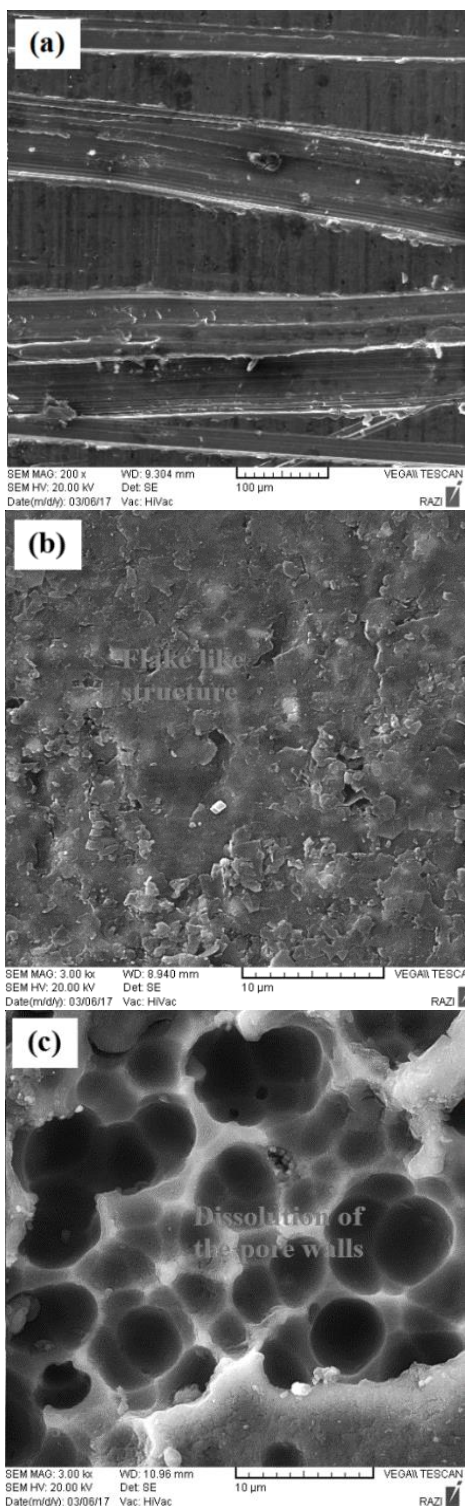
**Fig. 3** Flexural stress-strain curves of fiber metal laminates with different surface treatment methods

شکل 3 منحنی‌های تنش-کرنش خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز با روش‌های عملیات آماده‌سازی مختلف

جدول 2 مقادیر استحکام خمشی و کرنش شکست کامپوزیت‌های الیاف/ فلز

**Table 2** Flexural strength and failure strain values of fiber metal laminates

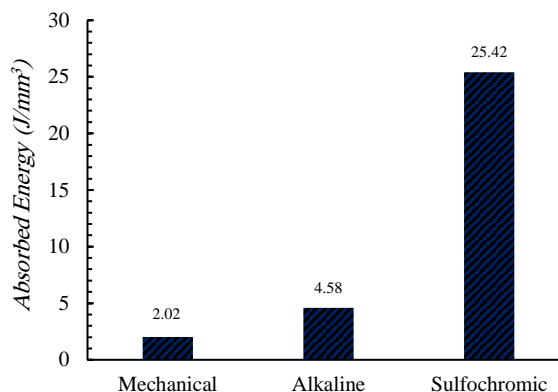
نوع کامپوزیت الیاف/ فلز	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	درصد کرنش شکست
مکانیکی	396±4.1	0.92±0.02
قلیایی	498±6.4	1.46±0.12
سولفو کرومیک	568±20.1	5.32±0.23



**Fig. 6** The surface morphology of aluminum alloy after various surface (a) mechanical treatment, (b) alkaline treatment, (c) and (d) sulfochromic-etch treatment

شکل 6 مورفولوژی سطحی آلیاژ آلومینیوم بعد از عملیات سطحی متفاوت (الف) عملیات مکانیکی، (ب) عملیات قلیایی و (ج) عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک

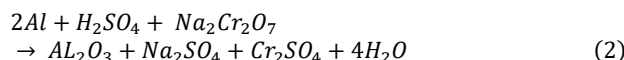
شکل 8 به صورت شماتیکی مورفولوژی سطحی آلومینیوم بعد از عملیات قلیایی و محلول سولفو کرومیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملیات قلیایی موجب ایجاد یک ساختار پولکی-شکل (تشکیل هیدروکسید آلومینیوم) بر روی سطح می‌شود، ولی عملیات حکاکی با محلول



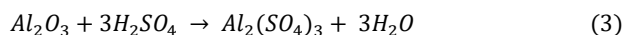
**Fig. 5** Absorbed energy values of basalt fiber metal laminates

شکل 5 مقادیر انرژی جذب‌شده در کامپوزیت‌های الیاف/فلز

شکل 6-ج و 7 نشان‌دهنده سطح آلومینیوم بعد از عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک با بزرگنمایی‌های مختلف می‌باشند. با توجه به معادله (2) مشخص است که در اثر واکنش محلول سولفو کرومیک با آلیاژ آلومینیوم، یک لایه اکسید آلومینیوم بر روی سطح تشکیل می‌شود:



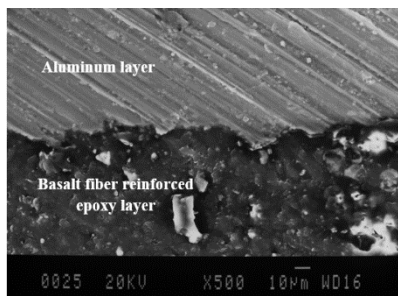
همان‌طور که در معادله (3) بیان شده است، اکسید آلومینیوم تشکیل شده بر روی سطح در اثر واکنش با اسیدسولفوریک دچار انحلال می‌شود، ولی با توجه به آن که سرعت تشکیل اکسید آلومینیوم بالاتر از سرعت انحلال آن می‌باشد، بنابراین بر روی سطح یک لایه متخلخل اکسیدی باقی می‌ماند. هرچه سرعت انحلال لایه اکسیدی کمتر باشد، سطح آلومینیوم دارای حفرات منظم‌تری می‌باشد.



با توجه به شکل‌های 6-ج و 7 مشخص است که حفرات تشکیل‌شده بر روی سطح آلومینیوم دارای قطر میانگین 5 میکرومتر می‌باشند. همچنین مشخص است که در برخی از نواحی، به دلیل بالا بودن نرخ انحلال، دیواره بین حفرات دچار خوردگی شده است.

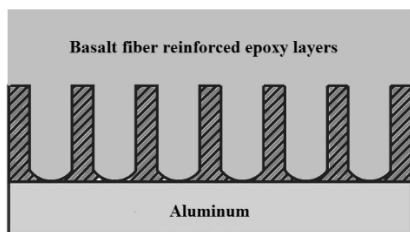
بهبود حاصل‌شده در خواص خمشی نمونه‌های آماده‌سازی شده با محلول سولفو کرومیک در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی و قلیایی، مرتبط با تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح آن می‌باشد. لایه اکسید آلومینیوم که در حین عملیات آماده‌سازی با محلول سولفو کرومیک تشکیل می‌شود، دارای حفرات میکرومتری می‌باشد و این حفرات مکان مناسبی برای نفوذ رزین می‌باشند. پرشدن رزین اپوکسی درون این حفرات موجب ایجاد قفل‌های مکانیکی قوی بین آلومینیوم و لایه کامپوزیتی می‌شود، به طوری که بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای، پدیده جدایش مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در شکل 6-ج نشان داده شده است، در اثر بالا بودن نرخ انحلال لایه اکسیدی، در برخی از نواحی، دیواره بین حفرات دچار خوردگی شده است، که این می‌تواند موجب تضعیف مکانیکی لایه آلومینیومی شود. بنابراین به نظر می‌رسد که، تغییر در پارامترهایی مانند زمان و دمای فرایند آماده‌سازی با محلول سولفو کرومیک، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف/فلز را به سبب ایجاد حفرات مجزا از یکدیگر بر روی سطح، بهبود بخشد.





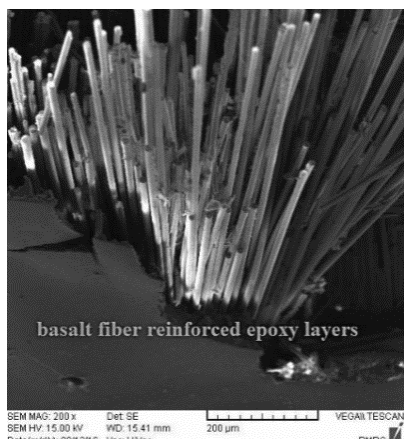
**Fig. 9** SEM of the interface between aluminum layer and basalt fiber reinforced epoxy layer

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک بین لایه آلومینیومی و لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت



**Fig. 10** Schematic illustration of penetration of the epoxy resin into the pores

شکل 10 نمایش شماتیکی از نفوذ رزین اپوکسی درون حفرات



**Fig. 11** SEM image of the fracture surface of basalt fibers/epoxy layers after flexural testing

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست لایه‌های کامپوزیتی الیاف بازالت/اپوکسی بعد از آزمون خمشی

#### 4- نتیجه‌گیری

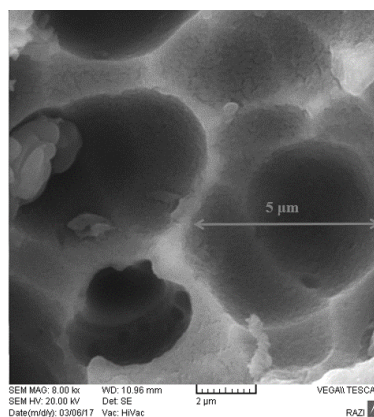
در این مطالعه، تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطحی بر روی خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/فلز متشکل از ورق الیاف آلومینیوم 2024 و رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد. روش‌های آماده‌سازی سطحی شامل عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک، عملیات قلیایی و عملیات مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش مکانیکی، ضعیف‌ترین رفتار خمشی را از خود نشان می‌دهند، به طوری که نمونه بعد از تغییر شکل محدودی دچار تورق می‌شوند. نمونه‌های آماده‌سازی شده با روش قلیایی نسبت به نمونه‌های مکانیکی رفتار خمشی بهتری از خود نشان می‌دهند، اما رفتار کلی آن‌ها مشابه با نمونه‌های مکانیکی می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت

سولفو کرومیک موجب ایجاد یک ساختار متخلخل اکسیدی بر روی سطح می‌شود که از حفرات منظم و دیواره زبر بین حفرات تشکیل شده است. این ساختار متخلخل عملکرد بهتری در مقایسه با ساختار پولکی شکل در چسبندگی بین لایه‌ها ایفا می‌کند.

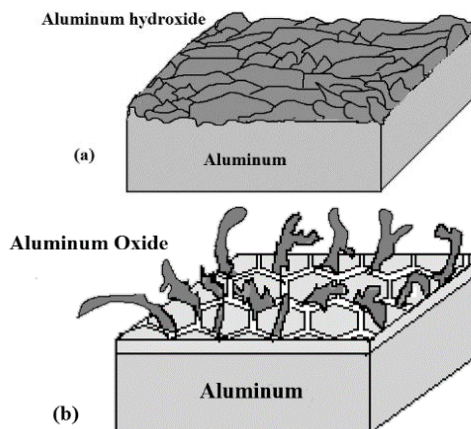
شکل 8 نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری در نمونه آماده‌سازی‌شده با محلول حکاکی سولفو کرومیک می‌باشد. مطابق با این شکل، چسبندگی قوی بین لایه آلومینیومی و لایه کامپوزیتی برقرار است و همان‌طور که مشخص است هیچ گونه ترک، حفره و یا فاصله‌ای بین این دو لایه وجود ندارد و مکانیزم قفل مکانیکی به وضوح قابل تشخیص می‌باشد. شکل 10 نیز، نشان‌دهنده شکل شماتیکی از نفوذ رزین اپوکسی درون حفرات موجود بر سطح آلومینیوم و همچنین پیوند قوی بین لایه‌ها از طریق مکانیزم قفل مکانیکی می‌باشد.

همچنین، شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست لایه‌های کامپوزیتی الیاف بازالت/اپوکسی بعد از آزمون خمشی را نشان می‌دهد.



**Fig. 7** The surface morphology of aluminum alloy after sulfochromic-etch treatment

شکل 7 مورفولوژی سطحی الیاف آلومینیوم بعد از عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک



**Fig. 8** Schematic illustration of surface morphology of aluminum after a) alkaline treatment and b) sulfochromic etch treatment

شکل 8 نمایش شماتیکی مورفولوژی سطحی آلومینیوم بعد از (الف) عملیات قلیایی و (ب) عملیات حکاکی با محلول سولفو کرومیک

- [11] Ostapiuk, M. Surowska, B. and Bieniaś, J., "Interface Analysis of Fiber Metal Laminates" *Composite Interfaces*, Vol. 21, No. 4, pp. 309-318, 2013.
- [12] Mohamad, M. Marzuki, H. F. A. Bakar, S. N. A. Abdullah, A. N. Ubaidillah, E. A. E. Abidin, M. F. Z. and Omar, S., "Effect of Anodizing Electrolyte for Structural Adhesives Bonding Study of Aluminium-Carbon Laminates Composites" *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol. 10, pp. 2091-2101, 2014.
- [13] Khalili, S. M. R. Daghigh, V. and Eslami Farsani, R., "Mechanical Behavior of Basalt Fiber-Reinforced and Basalt Fiber Metal Laminate Composites under Tensile and Bending Loads" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 8, pp. 647-659, 2011.
- [14] Ferrante, L. Sarasini, F. Tirillò, J. Lampani, L. Valente, T. and Gaudenzi, P., "Low Velocity Impact Response of Basalt-Aluminium Fibre Metal Laminates" *Materials & Design*, Vol. 98, pp. 98-107, 2016.

که عملیات آماده‌سازی با محلول حکاکی سولفوکرومیک موجب بهبود چشمگیری در رفتار خمشی نسبت به نمونه‌های مکانیکی و قلیایی می‌شود. استحکام خمشی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های مکانیکی 43 درصد افزایش پیدا کرده است و کرنش شکست نسبت به نمونه‌های مکانیکی 6 برابر افزایش پیدا کرده است. این تفاوت در رفتار مکانیکی نمونه‌ها می‌تواند در اثر تفاوت در مورفولوژی سطحی لایه آلومینیومی باشد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نشان‌دهنده این است که سطح آلومینیوم بعد از عملیات مکانیکی فقط دارای زبری ماکرومتری بوده که موجب پیوند ضعیف بین لایه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی شده است. بهبود خواص خمشی نمونه‌های قلیایی در مقایسه با نمونه‌های مکانیکی می‌تواند به دلیل مورفولوژی پولکی شکل تشکیل شده بر روی سطح آن باشد که موجب ایجاد قفل‌های مکانیکی بین لایه‌ها شده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حکاکی با محلول سولفوکرومیک موجب تشکیل یک لایه اکسیدی متخلخل بر روی سطح می‌شود. حفرات تشکیل شده بر روی سطح آلومینیوم به عنوان مکانی مناسب برای پر شدن توسط رزین اپوکسی محسوب می‌شوند، به طوری که بعد از اتمام فرایند پخت، چسبندگی قوی بین لایه‌ها برقرار می‌شود و در این نمونه‌ها تورق مشاهده نمی‌شود. این دلایل موجب شده که انرژی جذب‌شده نمونه آماده‌سازی شده با محلول سولفوکرومیک 12.5 برابر بیشتر از نمونه مکانیکی باشد.

## 5- مراجع

- [1] Sinmazçelik, T. Avcu, E. Bora, M. Ö. and Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods" *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] Chai, G. B. and Manikandan, P., "Low Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates – a Review" *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [3] Sadighi, M. Alderliesten, R. C. and Benedictus, R., "Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review" *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.
- [4] Ostapiuk, M. Surowska, B. and Bieniaś, J., "Interface Analysis of Fiber Metal Laminates" *Composite Interfaces*, pp. 309-318, 2014.
- [5] Zarei, H. Fallah, M. Minak, G. Bisadi, H. and Daneshmehr, A., "Low Velocity Impact Analysis of Fiber Metal Laminates (FMLs) in Thermal Environments with Various Boundary Conditions" *Composite Structures*, Vol. 149, pp. 170-183, 2016.
- [6] Gan, Y. X., "Effect of Interface Structure on Mechanical Properties of Advanced Composite Materials" *Int J Mol Sci*, Vol. 10, No. 12, pp. 5115-34, Nov 25, 2009.
- [7] Botelho, E. C. Silva, R. A. Pardini, L. C. and Rezende, M. C., "Evaluation of Adhesion of Continuous Fiber-Epoxy Composite/Aluminum Laminates" *J. Adhesion Sci. Technol*, Vol. 18, pp. 1799-1813, 2004.
- [8] Mohamad, M. Marzuki, H. F. A. Ubaidillah, E. A. E. Abidin, M. F. Z. Omar, S. and Rozi, I. M., "Effect of Surface Roughness on Mechanical Properties of Aluminium-Carbon Laminates Composites" *Advanced Materials Research*, Vol. 879, pp. 51-57, 2014.
- [9] Ardakani, M. A. Khatibi, A. A. and Ghazavi, S. A., "A Study on the Manufacturing of Glass-Fiber-Reinforced Aluminum Laminates and the Effect of Interfacial Adhesive Bonding on the Impact Behavior", *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition*, June 2-5, 2008.
- [10] Lawcock, G. Ye, L. Wing Mai, Y. and Teh Sun, C., "The Effect of Adhesive Bonding between Aluminum and Composite Prepreg on the Mechanical Properties of Carbon-FiberreinforcedMetal Laminates" *Composites Science and Technology*, Vol. 57, pp. 35-45, 1997.

