نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(10) (2021) 725-728
DOI: 10.22060/mej.2019.16385.6358

Experimental Investigation on the Inter-Laminar Strength in a Hybrid Elastomer Modified Fiber Metal Laminate Under High and Low-Velocity Impact and Quasi-Static Bending

M. A. Zarezadeh Mehrizi, A. R. Taherzadeh-Fard, Gh. Liaghat*, H. Ahmadi, Y. Anani, A. Khodadadi, S.Asemani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Growing the need to impact resistive structures, hybrid laminates have been absorbed much attention. To reach appropriate strength, high stiffness, and good energy absorption, the interfacial adhesion between different layers is important. The present paper is an attempt to assess the adhesion between different layers in a hybrid laminate consists of natural rubber, glass/epoxy composite and two layers of aluminum under high and low-velocity impact and quasi-static three-point bending conditions. In order to minimize the debonding, three kinds of specimens were made by three different adhesives including Chemosil 222 and its primer, Bylamet S2 and Cyanoacrylate. Based on the results obtained from high and low-velocity impact tests, the best choice for elastomer/composite, composite/aluminum and elastomer/aluminum interfaces are bylamet S2, cyanoacrylate, and chemosil, respectively according to delaminated area. Samples containing bylamet S2 adhesive in all interfaces have a better performance in terms of dynamic stiffness.

Review History:
Received: 22 May. 2019
Revised: 28 Jul. 2019
Accepted: 2 Sep. 2019
Available Online: 28 Sep. 2019

Keywords:
Glass fiber/AL metal composite
Debonding
High-velocity impact
Low-velocity impact
Quasi-static bending

1- Introduction

During recent years, composite materials have attracted much attention in a vast variety of applications. Owing to outstanding features such as low weight, high stiffness, and good thermomechanical properties, these multi-phase materials have found popularity than their monolithic counterparts [1]; however, they suffer from low resistance in impact applications [2]. One solution to improve the perforation properties of composite laminates is to replace the brittle phase by an elastomeric media which in turn not only does reduce the threshold failure load but also retards the metal failure [3-5]. To maintain the structure stiffness, it is reasonable to use both composite and elastomeric phases but the layers' adhesion could be critical.

2- Methodology

2- 1- Materials

The aluminum which has been used is 6061-T6 (AMAG rolling GmbH) with a 0.5 mm thickness; elastomer layer is a natural rubber which has been compounded with different elements such as calcium carbonate, zinc oxide, and sulfur to achieve desirable elastic properties. The composite phase consists of epoxy as the matrix media and 6 layers of woven E-glass fiber as the reinforcement. The composite phase was manufactured by a hand layup process and a layer of peel ply was pulled off from both external surfaces to produce a rough area for better adhesion. Three types of adhesives were used to bond the layers including Chemosil 222 and its primer (Chemosil 211), Bylamet-S2 and 2-ethyl cyanoacrylate.

2- 2- Fabrication process and test procedure

Before the application of each adhesive, the surfaces of aluminum and composite were prepared according to ASTM standard D 2651 and D 2093, respectively. The rubber layer should be cured during a vulcanization process at the temperature of 160 $^{\circ}$C for 4 minutes (according to the rheometer test). This process was done in a 2 mm thickness mold on a hot press apparatus.

After vulcanization, the bonding between layers was accomplished at room temperature. The thickness of rubber in all types of specimens was about 2 mm. A scheme of the layers' arrangement is presented in Fig. 1.

High-velocity impact tests were carried out using a gas gun apparatus with an impact velocity of about 180 m/s; besides, low-velocity impact and quasi-static indentation tests were also conducted in initial energy of 37.8 joule and constant rate of 2 mm/min, respectively. Each type of sample was tested in two manners. In the first set, the elastomer layer had been located in the front side which will be named Elastomer Forward (EF) in high-speed tests and Elastomer Upward (EU) in low-speed and indentation tests; In another set the elastomer had been located on the backside of the sample which will be named Elastomer Backward (EB) in high-speed tests and Elastomer Downward or (ED) in low-velocity and indentation tests.

*Corresponding author's email: ghlia530@modares.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Petal crack lengths in Aluminium face sheet

Adhesive	EB Group (mm)	EF Group (mm)
Chemosil	16.5	19.5
Byla-S2	17.3	17.5
Cyanoacrylate	18.3	18

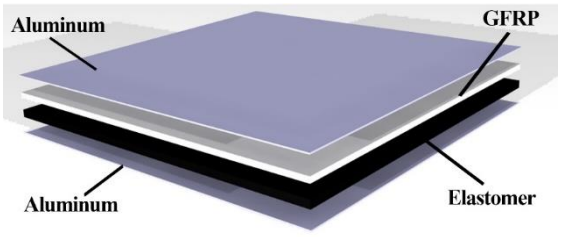


Fig. 1. The layers' arrangement in the hybrid structure

3- Results and Discussion

3- 1- High-velocity tests

The cross-section of samples was analyzed through an image processing software and the delaminated areas were obtained. Besides; the petal crack lengths were also obtained and presented in Table 1.

According to the results, the best adhesion for the elastomer/aluminum interface is observed to be obtained when using chemosil adhesive.

In the aluminum/composite interface the preliminary result was that the chemosil had the best performance from the kind of failure (adhesive or cohesive) point of view. Because of the more petal crack lengths in the case of chemosil, the degradation of the composite phase is the reason for the cohesive failure and therefore the use of chemosil for composite phase is not recommended. In the composite/ elastomer interface, the byla-S2 had the best performance according to the damage length.

Table. 3. Flexural properties of the samples under quasi-static flexural loading

Adhesive	Configuration	Flexural strength (kN)	Flexural stiffness (kN/mm)
Cyanoacrylate	ED	10.09	0.019053
	EU	12.94	0.0208
Byla S2	ED	8.43	0.02471
	EU	12.5	0.0255
Chemosil	ED	7.96	0.02178
	EU	7.6	0.02327

3- 2- Low-velocity impact

The delaminated length is obtained for the specimens and it was observed that the best adhesive for bonding elastomer/ aluminum interface was chemosil. This preference was because of the minimum damage and delamination lengths, which shows better adhesion compared to the other adhesives. For the aluminum/composite interface the primer result was that the chemosil had the best performance from the kind of failure (adhesive or cohesive) point of view; however, according to the high-velocity test results and degradation of composite phase, the next choice for this interface could be cyanoacrylate. For the composite/elastomer interface, the chemosil had the best performance according to the damage length.

According to the force-displacement diagrams, the required mechanical parameters were extracted and presented in Table 2. As observed, the specimens made by Byla-S2 adhesive have the highest stiffness; therefore, the overall layer adhesion in this specimen is better than the two other adhesives.

3- 3- Quasi-static three-point bending

According to the force-displacement diagrams, the flexural strength and stiffness were extracted and presented in Table 3.

This table illustrated that the specimens made by Byla-S2 adhesive have the highest stiffness than the two other specimens; therefore, the best choice to have an optimum adhesion could be the Byla-S2 adhesive.

4- Conclusions

In the present study, a four-layer laminate consist of

Table. 2. Dynamic stiffness and maximum force obtained from displacement diagrams

Parameters	Chemosil EU	Chemosil ED	Cyanoacrylate EU	Cyanoacrylate ED	Byla EU	Byla ED
F_{max} (N)	2992	3077	2930	3485	3076.6	3277.4
K (kN/mm)	0.42067	0.42	0.43984	0.42644	0.50694	0.47284
Absorbed energy (J)	25.9832	26.6813	24.9295	24.9538	18/7438	26.2671

aluminum, elastomer, and composite was fabricated and the layers' adhesion was studied under high and low impact and quasi-static three-point bending. The results could summarize as below:

• In high-velocity impacts, the best adhesion between aluminum and elastomer was achieved when using the chemosil adhesive which was according to minimum petal crack length and damaged area.

• In high and low-velocity impact tests, the cyanoacrylate adhesive had the best performance in aluminum/composite interface.

• In the composite/elastomer interface, the byla-S2 has the best performance according to the minimum damaged area; however, due to the proximity of the results, the Cyanoacrylate could also be a reasonable choice. In low-velocity impact tests, all three adhesives have similar behaviors and each could be used based on the designer's opinion.

• Based on the low velocity and quasi-static three-point bending tests, dynamic stiffness in the case of using Byla-S2 is higher than the two other adhesives; therefore, this adhesive is a suitable choice in low strain rate applications.

• The results demonstrate that chemosil is the best choice for aluminum/elastomer interface in all loading conditions which is approved by other published papers; besides, the same results have been obtained in both low and high-velocity impact tests which indicates that the loading rate has a minimum effect on adhesive performance.

• To sum up, if the laminate is exposed to complete failure and the aim is to maintain the structure coherent, the results of the high and low impact tests in delamination filed should be considered; however, if the aim is to design a structure to bear loads lower than the threshold, dynamic stiffness results obtained from low-velocity impact and quasi-static tests are recommended.

References

[1] H.U. Zaman, M.A. Khan, R.A. Khan, Comparative experimental studies of phosphate glass fiber/ polypropylene and phosphate glass fiber/natural rubber composites, Journal of Elastomers & Plastics, 44(6) (2012) 499-514.

[2] N.A. Patil, S.S. Mulik, K.S. Wangikar, A.P. Kulkarni, Characterization of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy-A Review, Procedia Manufacturing, 20 (2018) 554-562.

[3] D.-W. Lee, B.-J. Park, S.-Y. Park, C.-H. Choi, J.-I. Song, Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings, Composite Structures, 189 (2018) 61-69.

[4] E. Sarlin, M. Apostol, M. Lindroos, V.T. Kuokkala, J. Vuorinen, T. Lepistö, M. Vippola, Impact properties of novel corrosion resistant hybrid structures, Composite Structures, 108 (2014) 886-893.

[5] L. Xue, W. Mock, T. Belytschko, Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating, Mechanics of Materials, 42(11) (2010) 981-1003.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۰، سال ۱۳۹۹، صفحات ۲۹۳۱ تا ۲۹۵۰
DOI: 10.22060/mej.2019.16385.6358

بررسی تجربی استحکام بین لایه‌ای در چند لایه الیاف/فلز اصلاح شده با الاستومر در ضربات سرعت بالا و پایین و بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

محمد امین زارع زاده مهریزی، علیرضا طاهرزاده فرد، غلامحسین لیاقت* ، حامد احمدی،یاور عنانی، امین خدادادی، سیده سمانه آسمانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

خلاصه: با توجه به نیاز روز افزون به سازه‌های مقاوم در برابر بارهای ضربه‌ای، چندلایه‌های هیبریدی مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. همچنین به منظور رسیدن به مقاومت مناسب، سفتی بالا و ظرفیت جذب انرژی بالا، چسبندگی بین لایه‌های مختلف این نوع سازه‌ها اهمیت فراوانی دارد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی استحکام بین‌لایه‌ای در فصل مشترک لایه آلومینیوم،لایه کامپوزیت شیشه اپوکسی و لایه لاستیک طبیعی تحت بارگذاری‌های ضربه‌ای سرعت‌پایین، ضربه با سرعت بالا و شبه‌استاتیک است. سازه‌ای که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است شامل چهارلایه با جنس‌های مختلف می‌باشد که عبارت‌اند از: دو لایه آلومینیوم به عنوان لایه‌های خارجی و کامپوزیت با شش لایه شیشه/اپوکسی و یک لاستیک طبیعی بین دولایه آلومینیوم. برای رسیدن به بهترین چسبندگی و کمترین جدایش بین‌لایه‌ای در اثر بارگذاری‌های مختلف، سه نوع چسب مختلف شامل کموزیل ۲۲۲، بایلا و سیانوآکریلات در فرآیند ساخت استفاده شدند. آزمایش ضربه باسرعت بالا با پرتابه سر کروی و کالیبر ۱۰ میلیمتر توسط دستگاه تفنگ گازی انجام شد. آزمایش ضربه سرعت پایین با نفوذکننده ۱۰ میلی‌متری با دماغه کروی شکل توسط دستگاه سقوط وزنه انجام گرفت. در نهایت آزمایش شبه‌استاتیک خمش سه نقطه توسط دستگاه کشش–فشار یونیورسال روی نمونه‌های استاندارد صورت‌پذیرفت. مکانیزم‌های تخریب و خواص مکانیکی نمونه‌ها به دقت مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت. طبق نتایج آزمون ضربه سرعت بالا و پایین و با توجه به میزان گسیختگی بین‌لایه‌ای مناسب‌ترین گزینه برای فصل مشترک الاستومر/کامپوزیت، کامپوزیت/آلومینیوم و آلومینیوم/الاستومر به ترتیب چسب‌های بایلا، سیانوآکریلات و کموزیل است. از دیدگاه سفتی دینامیکی نمونه‌های حاوی چسب بایلا در تمام نقاط بین‌لایه‌ای دارای عملکرد بهتری است

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶

کلمات کلیدی:
کامپوزیت الیاف شیشه/ فلز آلومینیوم
جدایش بین‌لایه‌ای
ضربه سرعت بالا
ضربه سرعت پایین
خمش شبه‌استاتیک

۱- مقدمه

در طول چندین سال گذشته ابداع و کاربرد مواد کامپوزیتی نقطه عطفی در طراحی صنعتی مدرن شمرده شده‌است. با توجه به ویژگی‌هایی نظیر وزن پایین، تغییر طول و چقرمگی بالا، این مواد کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده‌اند؛ بعلاوه این‌که این مواد توانایی بالایی در حفظ پایداری ساختار ها از خود نشان می‌دهند [۱]. کامپوزیت‌ها با توجه به خواص ترمومکانیکی بالا نقش مهمی را در صنایع مختلف نظیر خودروسازی، نظامی، دریایی، پزشکی و... ایفا می‌کنند. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف با توجه به خواصی نظیر سهولت فرآوری، سفتی بالا، راحتی نصب و مقاومت در برابر تهدیدات محیطی توجه بالایی را به خود اختصاص داده‌اند [۲]. در کنار این فواید، کامپوزیت‌ها دارای معایبی از جمله ناهمسانگردی و ناهمگنی، جذب شدید رطوبت، عدم مقاومت در برابر حرارت، عدم امکان بازرسی به روش‌های متداول و مقاومت شکست پایین در برابر ضربه هستند [۳].

به دلیل اهمیت کاربرد این مواد در پدیده‌های نفوذ تلاش‌هایی به منظور بهبود مقاومت در برابر ضربه صورت پذیرفته است. طبق بررسی‌های انجام شده کاربرد یک یا چند لایه از یک ماده سخت مثل فولاد یا آلومینیوم در کنار کامپوزیت سبب حساسیت کمتر ساختار حاصل به بار ضربه و آسیب کمتر در برابر آن می شود [۶-۴]؛ بعلاوه استفاده از این نوع کامپوزیت‌های هیبریدی، بهره‌وری از بهترین خواص اجزا تشکیل‌دهنده در یک ماده و درنتیجه یافتن کاربردهایی جدید را منجر خواهد شد. علاوه بر استحکام و سفتی بالا، این نوع ساختار دارای ویژگی‌های دیگری نظیر روش‌های ساخت بهتر و یا خواص میرایی بالاتر می‌باشد [۴]. به عنوان نمونه در دهه ۱۹۶۰ کاربرد ورقه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه در پشت ورقه‌های سرامیکی باب جدیدی را در تولید ورقه‌های ضدگلوله با وزن پایین گشود. کاربرد الیاف شیشه و یا کولار در این ساختارها سبب بهبود عملکر آن‌ها از هر

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghlia530@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

دو جنبه بالستیک و ساختاری گردید [۷]. در اوایل دهه ۸۰ میلادی آلومینیوم به دلیل رفتار پلاستیک مطلوب و دوام مناسب در اینگونه ساختارها متداول شده و ساخت اولین نمونه‌های کامپوزیت‌های الیاف–فلز را رقم زد

یکی از این نوع چندلایه‌ها که تاکنون به‌طور گسترده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است، گلیر می‌باشد که از آلومینیوم و الیاف شیشه تشکیل شده است. در این نوع چندلایه تعداد معینی از لایه‌های کامپوزیتی اپوکسی/ لیف شیشه در بین دو یا چند لایه از فلز آلومینیوم قرار داده می‌شوند؛ بنابراین سازه حاصل دارای وزن پایین و سفتی بالا خواهد بود [۳].

تاکنون مقاومت گلیر در برابر ضربه سرعت بالا و پایین به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴–۸]. با توجه به ماهیت داکتیل آلومینیوم، بارهای ضربه‌ای برای آن تهدید جدی به حساب نمی‌آیند؛ چراکه این ماده می‌تواند در ناحیه الاستیک تغییر شکل‌های بالایی را متحمل شود. در مقابل، با توجه به ماهیت ترد کامپوزیت‌ها، این مواد با جذب انرژی کمی در ناحیه الاستیک دچار مود های آسیب مختلف خواهند شد [۱۵].

یکی از راه حل‌های موجود جایگزینی یک یا چند لایه کامپوزیتی با یک لایه الاستومری می‌باشد. این کار سبب بهبود خواص ضربه چندلایه حاصل خواهد شد به‌گونه‌ای که کاهش سرعت به ازای واحد دانسیته سطحی افزایش یافته [۱۸–۱۶] و یا مساحت ناحیه آسیب در ورق فلزی کاهش می‌یابد [۵ و ۱۹]. از مشکلات عمده این نوع سازه، کاهش سفتی با توجه به حذف ورق کامپوزیتی است. برای حل این موضوع، یکی از راه‌حل‌های موجود استفاده از هر دو نوع ورق کامپوزیتی و الاستومری در کنار یکدیگر می‌باشد [۲۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن لایه الاستومری به لایه‌های فلزی ، نه تنها بار آستانه آسیب را کم می‌کند، بلکه تخریب لایه فلزی را هم به تاخیر میاندازد. تغییرشکل‌های موضعی ولی بزرگ در اطراف محل برخورد بار ضربه ، نشان دهنده این است که سطح بحرانی آسیب بیشتری دیده است. همین امر باعث اتلاف بخش زیاد تری از انرژی شده که باعث می‌شود تا جدایش بین‌لایه‌ای هم کمتر بشود. بر اساس این نوع تخریب، انتظار می‌رود که سازه‌های همراه با لایه الاستومری نسبت به موارد مشابه که الاستومر ندارند، کارایی بیشتری داشته باشد [۲۱ و ۲۲]. انتظار می‌رود که استفاده از هر دو ورق کامپوزیتی و الاستومری علاوه بر حفظ سفتی سبب افزایش قابلیت جذب انرژی چندلایه شود؛ با توجه به عدم مطالعه مبسوط چنین سازه‌ای، مطالعه بیشتر بر روی جنبه‌های مختلف آن مفید به نظر می‌رسد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها که در این بررسی به آن پرداخته می‌شود، چسبندگی بین‌لایه‌ای است.

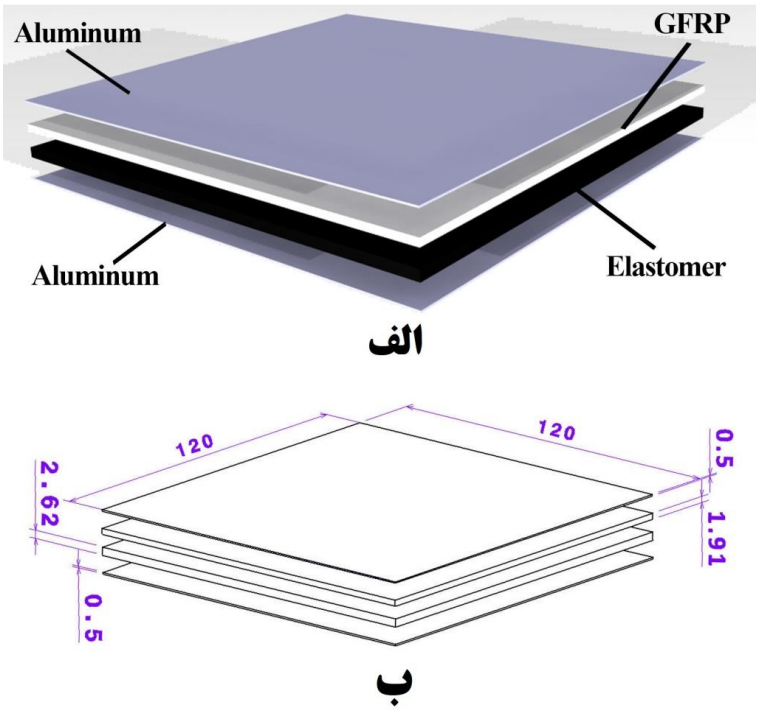
روش‌های مختلفی به منظور بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای وجود دارند. یکی از راه‌های موجود استفاده از عوامل سیلان می‌باشد. عامل سیلان توانایی ایجاد اتصال بین ماتریس آلی با فیلر معدنی را دارا می‌باشند. این ماده با ماتریس پلیمری یک پیوند کوالانسی و با فیلرها چندین پیوند معدنی تشکیل خواهد داد. این ویژگی برای ایجاد و یا بهبود اتصال بین فلز و لاستیک، فلز و رزین، لاستیک و رزین، شیشه و رزین و بیومواد به‌طور گسترده استفاده شده است [۲۳].

یکی دیگر از مطالعات انجام شده در این زمینه مربوط به فرایند اتصال تحت حرارت می باشد. فرایند اتصال تحت حرارت به‌طور گسترده در صنایعی که به اتصال لاستیک به فلز نیاز است استفاده می‌شود. پیچیدگی این روش از آن جهت است که هر دو فرایند پخت‌شدن لاستیک و سفت شدن چسب بین لاستیک و فلز در یک مرحله و همزمان صورت می‌پذیرد. اگرچه جزئیات دقیق فرایند اتصال مشخص نیست ولی می‌توان گفت که این فرایند متاثر از پدیده‌های مختلف نفوذ، جذب شیمیایی و اتصالات عرضی سطحی و حجمی است. در این فرایند یک فصل‌مشترک لاستیکی در مجاورت سطح فلز شکل می‌گیرد که حاصل نفوذ عوامل اتصالات‌عرضی موجود در لایه چسب به لاستیک می‌باشد. عمق نفوذ در این حالت حدود ۱۰ تا ۸۰ میکرومتر بوده و در ناحیه نفوذ تراکم اتصالات‌عرضی افزایش می‌یابد [۲۴]. کیفیت اتصال بین فلز و لاستیک به عوامل مختلفی نظیر ساختار اولیه و آماده‌سازی سطح فلز، ترکیب چسب و لاستیک استفاده شده و تاریخچه حرارتی فرایند پخت وابسته است. با این حال یکی از پارامترهای مهم در تعیین کیفیت این اتصال دمای قالب می باشد. این دما به نوبه خود می‌تواند زمان فرایند و در نتیجه بازدهی تولید را تحت‌الشعاع قرار دهد. در برخی منابع از بهبود کیفیت اتصال فلز/لاستیک با افزایش دما و در برخی موارد برعکس آن گزارش شده است. علاوه بر کیفیت اتصال، عامل دما بر روی فرایند اتصالات عرضی لاستیک نیز مؤثر است. طبق مطالعات انجام شده بر روی لاستیک فرآوری شده با سولفور افزایش بیش از اندازه دما سبب وقوع پدیده‌ای به نام بازگشت خواهد شد. در این پدیده اتصالات عرضی ناپایدار سولفور که در مراحل ابتدایی و دماهای پایین‌تر ایجاد شده‌اند به واسطه حرارت از بین خواهند رفت که این رویداد سبب کاهش تعداد اتصالات‌عرضی و در نتیجه افت خواص لاستیک نهایی خواهد شد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که دمای بحرانی در لاستیک فرآوری‌شده با سولفور حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود [۲۴]. پژوهش حاضر تلاشی است به‌منظور حداقل‌سازی تورق نوعی از چندلایه هیبریدی که شامل لایه‌های آلومینیوم به عنوان صفحات

Table 1. Aluminum properties [25]

جدول ۱: خواص آلومینیوم [۲۵]

نوع آلیاژ	کرنش شکست(٪)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	ضخامت(میلی‌متر)
۶۰۶۱-T۶	۴۰	۳۳۲	۷۲	۲۵۲	۰/۵



شکل ۱: الف: ترتیب و نحوه قرارگیری لایه‌ها بر روی یکدیگر ب: ابعاد هندسی لایه‌های به‌کار رفته در چندلایه کامپوزیت/فلز/الاستومر (ابعاد به میلی‌متر می باشد)

Fig. 1. A:The arrangement of the layers with respect to each other B:Geometric Dimensions of Layers Used in Composite / Metal / Elastomer Layers in mm)(Dimensions

بیرونی و دو لایه از کامپوزیت و الاستومر به عنوان صفحات داخلی در بارگذاری با انواع نرخ کرنش است. بدین منظور چندین نمونه با استفاده از سه نوع چسب مختلف ساخته شده و تحت آزمایشات ضربه سرعت بالا و سرعت پایین قرار می‌گیرند. به منظور پی بردن به توالی رخداد آسیب آزمایش خمش سه نقطه نیز بر روی نمونه‌ها صورت خواهد پذیرفت.

۲- ساخت و آزمایش نمونه‌ها

۲- ۱- مواد

آلومینیوم استفاده شده در این بررسی از درجه ۶۰۶۱-۶T و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.خواص آلومینیوم مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. الاستومر مورد استفاده نوعی لاستیک طبیعی ترکیب‌شده با ضخامت ۲/۶۲ میلی‌متر است. زمان و دمای پخت این لاستیک با توجه به نتایج آزمون رئومتر به ترتیب ۴ دقیقه و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

کامپوزیت مورد استفاده نیز شامل ۶ لایه لیف شیشه بافته‌شده با زمینه اپوکسی است که طی یک فرایند چینش دستی حاصل شده است. بر روی هر دو سطح کامپوزیت در حین فرایند ساخت از یک لایه داکرون استفاده شده تا چسبندگی بین‌لایه‌ای بهبود یابد. شماتیک کلی نمونه‌های مورد آزمایش و مشخصات هندسی هر لایه در شکل ۱ ارائه شده است.

برای ساخت نمونه‌ها از سه نوع چسب کموزیل ۲۲۲[1] و پرایمر مربوطه به نام کموزیل ۲۱۱[2] ، بایلا[3] و ۲-اتیل سیانواکریلیت[4] استفاده شده است. چسب کموزیل و پرایمر مربوطه محلول‌هایی تیگزوتروپ[5] بوده که شامل ۲۵ درصد وزنی از جامدات محلول در حلال فرار می‌باشد. این دو جزء به ترتیب دارای مشتقات بنزوکوینون دیاکزومین[6] و رزین فنولیک می‌باشند که آن‌ها را برای اتصال لاستیک طبیعی به فلزات مناسب می‌سازد [۲۴]. چسب بایلا نیز بر پایه سیانواکریلیت بوده و توسط اتیلن استر اصلاح شده‌است. این چسب برای اتصال لاستیک، پلاستیک و فلزات بسیار مناسب است. چسب سیانواکریلیت با نام تجاری استاربانند یک چسب دوجزئی است. با توجه به این‌که جزء دوم این چسب اتصال را ترد می‌سازد، و تاثیری در استحکام چسب ندارد (فقط باعث تسریع فرایند خشک شدن چسب می‌شود)، تنها از جزء اول استفاده شده و در عوض زمان لازم برای خشک شدن افزایش داده شده است.

۲- ۲- روش ساخت

قبل از ایجاد هرگونه اتصال، سطوح آلومینیوم و کامپوزیت طبق استانداردهای ملی مواد و تست آمریکا به شماره‌های[7] ۲۶۵۱ و[8] ۲۰۹۳ و برای چسبندگی بهتر اصلاح گردید. به منظور حذف هرگونه آلودگی و چربی، سطوح آلومینیوم با استون شسته می‌شود و سپس با آب شسته می‌شود. برای افزایش سطح درگیر با چسب، سطوح آلومینیوم با کاغذ سمباده خراشیده می‌شود. در نهایت برای بار دوم سطوح سمباده خورده با آب شسته شده و پس از خشک شدن آماده برای اتصال می‌باشد. سطوح کامپوزیتی هم ابتدا با استون شسته شده و پس از خراشیدن با سمباده، دوباره با آب شسته می‌شود. به منظور ساخت نمونه‌ها با چسب کموزیل ابتدا یک لایه پرایمر بر روی سطوح آلومینیوم و کامپوزیت قرار داده شد. پس از گذشت حدود ۲۰ دقیقه و تبخیر کامل حلال، چسب کموزیل بر روی نمونه‌ها به‌کار رفت. مجموعه آلومینیوم، کامپوزیت و الاستومر پخت نشده داخل پرس داغ با دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس و فشار ۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع قرار گرفت تا الاستومر پخته شود.

برای ساخت نمونه‌ها با چسب‌های بایلا و سیانواکریلیت، ابتدا الاستومر به ضخامت ۲ میلی‌متر دررس داغ پخته شده و سپس چسبندگی بین لایه‌های مختلف در دمای اتاق صورت پذیرفت. بخش‌هایی از فرایند ساخت در شکل ۲ به ترتیب آورده شده است.

۲- ۳- آزمایش نمونه‌ها

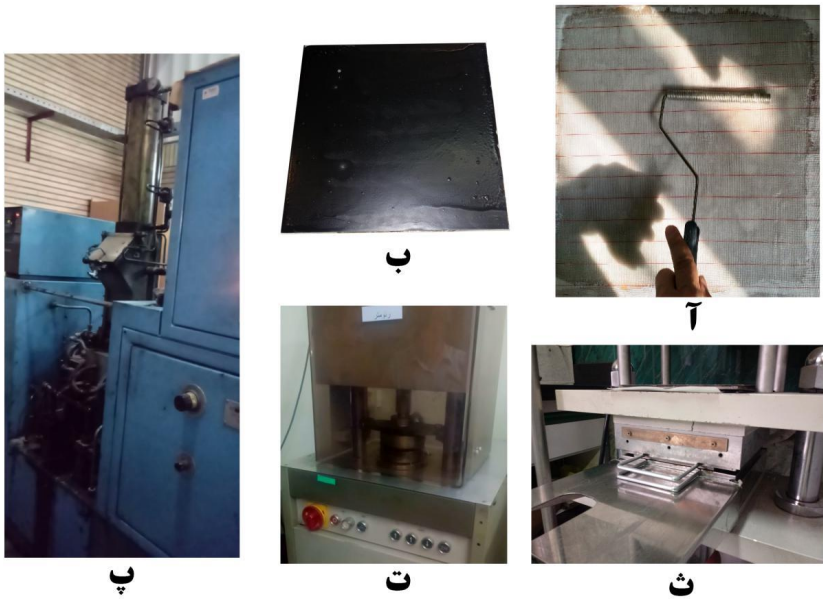
آزمایش ضربه سرعت بالا توسط دستگاه تفنگ گازی (شکل ۳ الف) با سرعت برخورد ۱۸۰ متر بر ثانیه توسط پرتابه سر کروی با کالیبر ۱۰ میلی‌متر و وزن ۹/۵ گرم انجام شده‌است. هر نوع نمونه در دو وضعیت مورد آزمایش قرار گرفت؛ در وضعیت اول لایه الاستومری به عنوان لایه دوم بعد از آلومینیوم در برابر ضربه قرار گرفته‌است. در وضعیت ثانویه الاستومر پس از آلومینیوم و کامپوزیت در جایگاه سومین لایه در برابر ضربه قرار گرفته است .آزمایش ضربه سرعت پایین توسط دستگاه سقوط وزنه روی نمونه انجام‌شد (شکل۳ ب). وزنه ۶ کیلوگرمی از ارتفاع ۷۰ سانتی‌متری برای این مرحله از آزمایش در نظر گرفته شد. (نمونه‌ها تحت برخورد نفوذکننده با انرژی حدود ۳۷/۸ ژول قرار گرفتند). هر نمونه در دو وضعیت آزمایش شد، در حالت اول الاستومر به عنوان دومین لایه از بالا بعد از آلومینیوم جلوی نفوذکننده قرار گرفته و در حالت دوم الاستومر به عنوان لایه سوم از بالا، بعد از آلومینیوم و کامپوزیت واقع شده‌است. آزمایش خمش شبه‌استاتیک توسط دستگاه کشش-فشار یونیورسال انجام شد (شکل ۳ ج). فاصله بین دو تکیه‌گاه برابر ۱۰ سانتی‌متر و نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ملی مواد و تست آمریکا به شماره ۷۲۶۴ در نظر گرفته‌شد. مشابه آزمایش سرعت پایین هر نوع نمونه در دو وضعیت الاستومر بالا و الاستومر پایین، آزمایش شده است.

تمامی نمونه‌ها پس از آزمایش‌های سرعت پایین و سرعت بالا توسط دستگاه جت آب برش خورده‌اند و مقطع آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است. در نهایت نیز به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مختلف نظیر اندازه ناحیه آسیب و یا پروفیل های تغییر شکل از یک نرم‌افزار پردازش تصویر استفاده شده‌است.

۳- نتایج و بحث

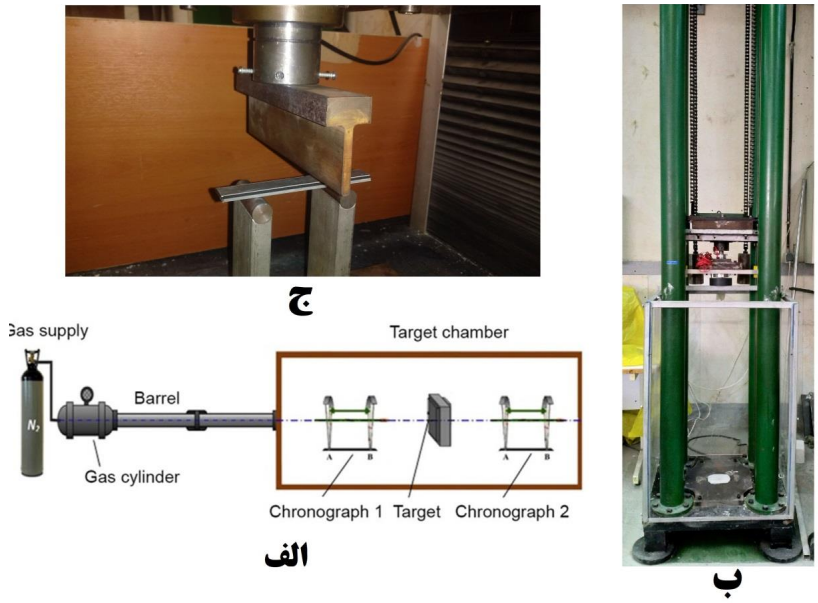
در این بخش نتایج و مشاهدات مربوط به سه آزمایش ضربه سرعت

1 Chemosil 222
2 Chemosil 211
3 Byla S2
4 2ethyl-Cyanoacrilate
5 Thixotropic
6 Benzoquinone Dioxime
7 ASTM D2651
8 ASTM D2093



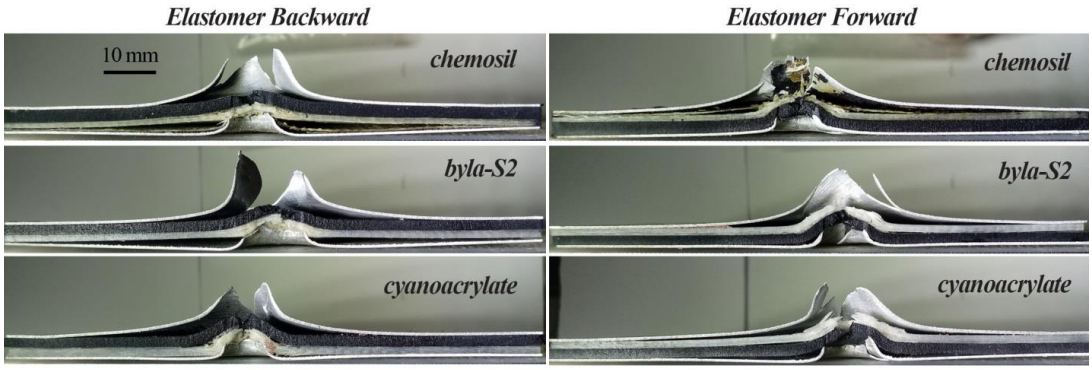
شکل ۲: فرایند ساخت تجربی نمونه‌ها، آ: ساخت کامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی، ب: اعمال چسب کموزیل روی ورق آلومینیومی، پ: فراوری الاستومر به واسطه بنبوری آزمایشگاهی، ت: آزمایش رئومتر به منظور یافتن زمان و دمای پخت الاستومر، ث: پخت الاستومر و آلومینیوم توسط پرس داغ آزمایشگاهی

Fig. 2. Experimental Construction Process of Samples,A:Hand layup composite fabrication B:Apply chemosil adhesive on aluminum sheet C:Elastomer Processing by Laboratory Banbury D:Rheometer test to find elastomer annealing time and temperature E:Volcanisation of elastomer and aluminum by laboratory hot press



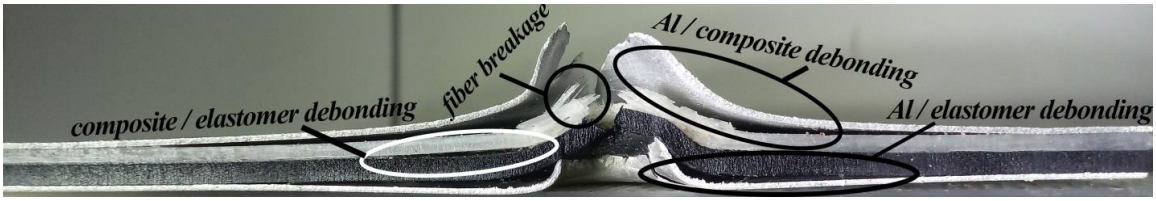
شکل ۳: تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات تجربی الف: شماتیک دستگاه تفنگ گازی [۲۶] ب: مکانیزم سقوط وزنه ج: گیره آزمایش خمش سه نقطه و نمونه مورد آزمایش

Fig. 3. Equipment used in experimental tests,A:Gas gun schematic B:Drop hammer setu C:Three-point bending test setup and test specimen



شکل ٤: مقاطع نمونه‌ها بعد از آزمایش سرعت بالا (تفنگ گازی)

Fig. 4. Sections of samples after high speed test (Gas gun)



شکل ٥: مکانیزم‌های تخریب نمونه ساخته شده با چسب سیانوآکریلات بعد از آزمایش سرعت بالا

Fig. 5. Destruction mechanisms of samples made with cyanoacrylate adhesive after high speed testing

Table 2. The length of the Delamination zone in different interfaces at high speed loading

جدول ۲: طول ناحیه آسیب در فصل مشترک‌های مختلف در بارگذاری سرعت بالا

فصل مشترک	نوع قرارگیری	کموزیل (میلی‌متر)	بایلا (میلی‌متر)	سیانوآکریلات (میلی‌متر)
الاستومر/آلومینیوم (میلی‌متر)	الاستومر جلو	۶/۳۸	۳۰/۰۹	۷۲/۱۱
	الاستومر پشت	۴۸/۶۱	۶۳/۱۸	۷۶/۵۱
کامپوزیت/آلومینیوم (میلی‌متر)	الاستومر جلو	*۹۸/۷۸	۸۴/۵۷	۸۸/۲۳
	الاستومر پشت	*۱۲/۰۵	۱۲۰/۰۰	۴۶/۲۱
الاستومر/کامپوزیت (میلی‌متر)	الاستومر جلو	۰	۱۷/۱۵	۲۳/۱۶
	الاستومر پشت	۰	۰	۲۶/۰۳

* رخداد گسیختگی داخل ورق کامپوزیتی

بالا، ضربه سرعت پایین و خمش سه نقطه به ترتیب ارایه می‌شود.

۳- ۱- ضربه سرعت بالا

۳- ۱- ۱- طول ناحیه آسیب

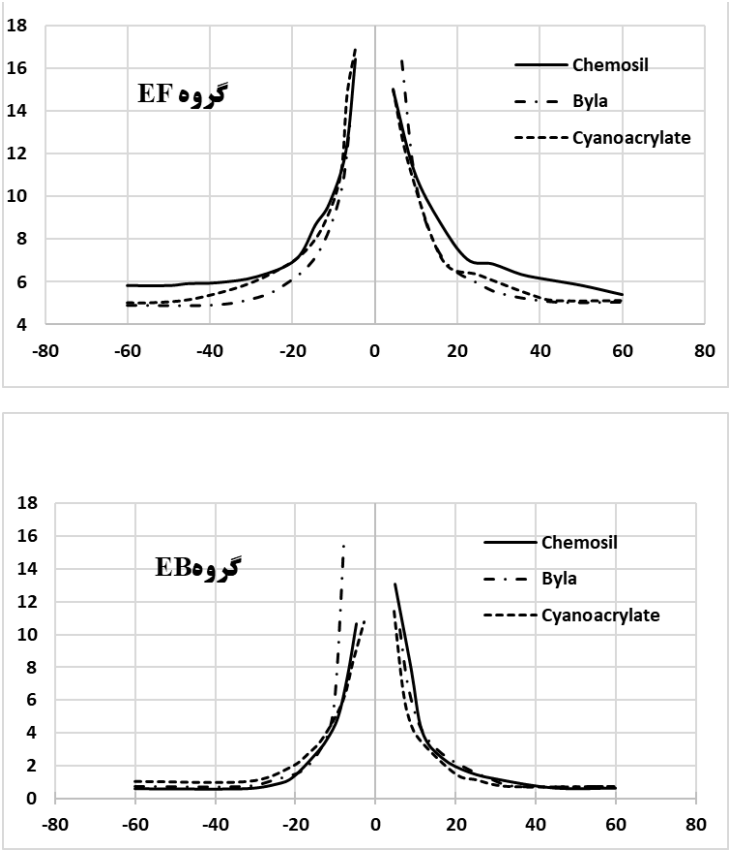
مقطع نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۴ ارائه شده‌است. طول ناحیه آسیب با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر محاسبه شده و در جدول ۲ ارائه شده‌است؛ به‌علاوه اینکه در شکل ۵ مکانیزم‌های تخریب برای نمونه با چسب سیانوآکریلات مشخص شده است. در ادامه هر فصل مشترک به‌صورت جداگانه بررسی می‌شود:

۳-۱-۱-۱- فصل مشترک الاستومر/آلومینیوم:

بر اساس سطح مقاطع مختلف نشان داده شده و طول جدایش بین‌لایه‌ای ، برای نمونه‌های الاستومر جلو[1]، تنها فصل مشترکی که می‌توان گفت هیچ جدایشی نداشته است، در نمونه‌های ساخته شده با کموزیل مشاهده می‌شود. در این فصل مشترک در چسب بایلا به میزان ۷۷ درصد و در چسب سیانوآکریلیت به میزان ۹۱ درصد طول ناحیه جدایش بیشتر است. در نمونه‌های الاستومر پشت[2] در تمامی فصل مشترک‌ها جدایش مشاهده می‌شود ولی مقدار مینیمم آن در نمونه‌هایی است که چسب کموزیل برای ساخت آن‌ها به کار رفته است. جدایش بین‌لایه‌ای در این چسب به طور میانگین به میزان ۳۶ درصد کمتر از دو چسب دیگر می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که در بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا، چسب کموزیل بهترین اتصال بین لایه‌های آلومینیوم و الاستومر را ایجاد میکند. این نتیجه گیری کاملا همسو با مشاهده انجام شده در مرجع [۲۴] است.

۳-۱-۱-۲- فصل مشترک کامپوزیت/آلومینیوم:

در این فصل مشترک در نمونه‌های الاستومر جلو، طول جدایش بین‌لایه‌ای در تمامی نمونه‌ها تقریبا برابر است و با اختلاف کمی بایلا S۲



شکل ٦: پروفیل تغییر شکل نمونه‌ها بعد از آزمایش سرعت بالا (تفنگ گازی))

Fig. 6. Deformation profiles of specimens after high speed testing (Gas gun)

1 EF

2 EB

Table 3. Petal crack length in aluminum layer at high velocity loading

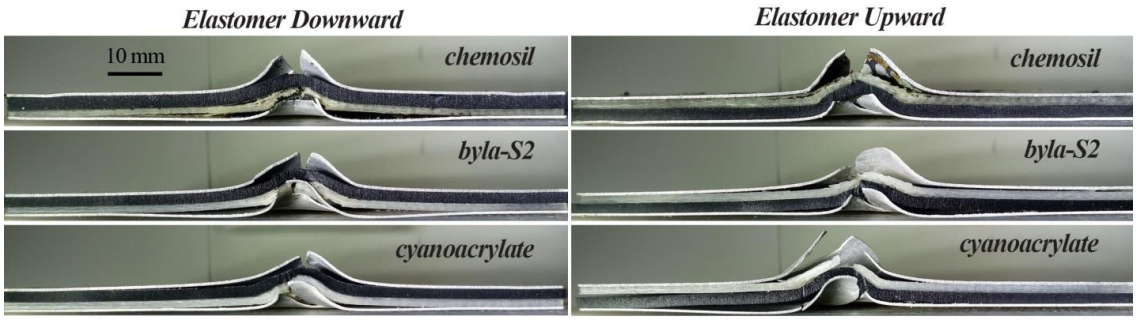
جدول ۳: طول ترک پتال در لایه آلومینیوم در بارگذاری سرعت بالا

نوع چسب	حالت الاستومر پشت (میلی‌متر)	حالت الاستومر جلو (میلی‌متر)
کموزیل	۱۶/۵	۱۹/۵
بایلا	۱۷/۳	۱۷/۵
سیانوآکریلیت	۱۸/۳	۱۸/۰

Table 4. The length of the Delamination zone in different interfaces at low speed loading

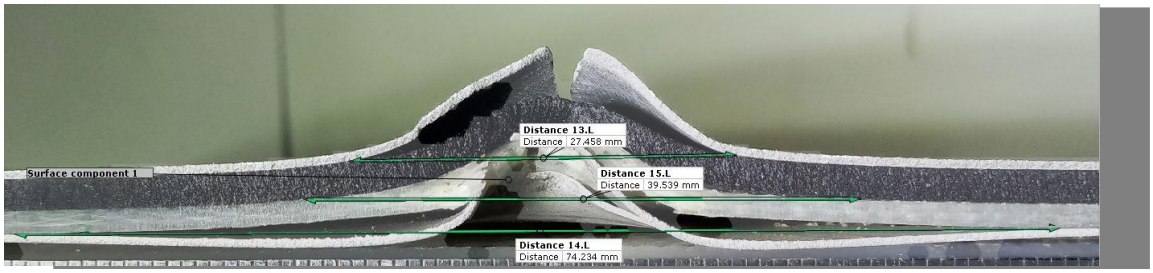
جدول ٤: طول میزان جداشدگی در فصل مشترک‌ها در بارگذاری با سرعت پایین (سقوط وزنه)

فصل مشترک	کموزیل(میلی‌متر)	سیانوآکریلات(میلی‌متر)	بایلا(میلی‌متر)	چسب
الاستومر/آلومینیوم	۲۲/۲۵۳۹	۷۸/۸۵	۶۶/۴۱۸۶	الاستومر بالا
	۲۴/۱۷۱۸	۵۸/۱۵۷۷	۲۷/۴۵۸	الاستومر پایین
کامپوزیت/آلومینیوم	*۶۴/۷۴۰۴	۳۹/۹۲	۹۶/۸۶۱۸	الاستومر بالا
	*۸۶/۷۴۱۲	۵۸/۱۶۷۳	۷۴/۲۳۳۹	الاستومر پایین
الاستومر/کامپوزیت	۰	۵۳/۸۴۳۵	۰	الاستومر بالا
	*۱۳	۰	۳۹/۵۱۳۲	الاستومر پایین



شکل ۷: مقاطع نمونه‌ها بعد از آزمایش سرعت پایین (سقوط وزنه)

Fig. 7. Sample sections after low speed test (Drop hammer)



شکل ۸: محاسبه طول ناحیه آسیب در نمونه الاستومر پایین ساخته شده با چسب بایلا بعد از آزمایش سرعت‌پایین

Fig. 8. Determination of delamination zone length in ED specimen made with Bayla adhesive after low velocity test

عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه برای این فصل مشترک نوع تخریب است. در نمونه‌های ساخته شده با کموزیل به جای جدایش بین‌لایه آلومینیوم و کامپوزیت، ساقط شدن اتصال با چسب[1] بین‌لایه‌های کامپوزیت مشاهده می‌شود.در اینجا دو فرضیه مطرح است: یکی این‌که بهترین چسبندگی را کموزیل ایجاد میکند و دیگری اینکه خواص کامپوزیت ترموست شیشه/اپوکسی به علت قرارگیری در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ دقیقه افت کرده است. برای جواب دادن به این شبهه انجام آزمایش جداگانه‌ای نیازمند است تا افت احتمالی خواص کامپوزیت در اثر قرار گرفتن در دمای بالا بررسی شود.

در نمونه‌های الاستومر پشت نتیجه تقریبا واضح است، چرا که در نمونه‌های ساخته شده با کموزیل علاوه بر داشتن کمترین طول جدایش بین‌لایه‌ای، جدایش بین‌لایه‌های کامپوزیتی[2] هم مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه عملکرد ضعیف چسب بایلا در این حالت است که لایه آلومینیوم از کامپوزیت کاملا جدا شده‌است.

۳-۱-۱-۳- فصل مشترک الاستومر/کامپوزیت

در این فصل مشترک تمامی چسب‌ها عملکرد نسبتا خوبی داشتند، ولی بهترین عملکرد را کموزیل داشته است، چرا که طول جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های ساخته شده با کموزیل صفر است و اتصال بعد از ضربه در هر دو حالت الاستومر جلو و الاستومر پشت، تقریبا آسیبی ندیده است. گزینه بعدی چسب بایلا است که در حالت الاستومر پشت جدایشی نداشته و در حالت الاستومر جلو هم طول جدایش بین لایه آن به میزان ۳۵ درصد کمتر از نمونه‌های ساخته شده با سیانوآکریلات است.

۳- ۱- ۲- پروفیل تغییر شکل

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود برای نمونه‌های الاستومر جلو، نمونه‌های ساخته شده با کموزیل بیشترین تغییر شکل سرتاسری را نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. میزان این تغییر شکل‌های سراسری را می‌توان به سفتی سازه ربط داد. هرچه تغییر شکل سراسری بیشتر باشد، یعنی سفتی سازه کمتر است که این موضوع نشان‌دهنده جدایش بین‌لایه‌ای بیشتر است. با توجه به شباهت نمودار تغییر شکل در نمونه‌های ساخته شده با بایلا و سیانوآکریلات، این جدایش بین‌لایه‌ای را می‌توان به جدا شدن لایه آلومینیوم از کامپوزیت نسبت داد که نتیجه آن همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، تغییر شکل بیشتر در لایه آلومینیوم است.

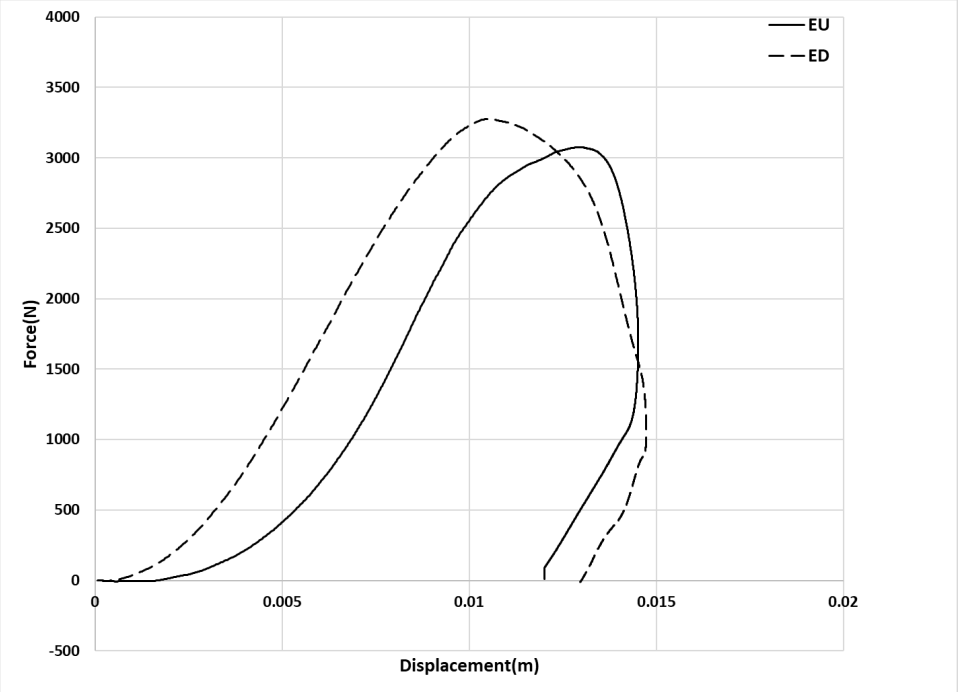
برای نمونه‌های الاستومر پشت، تمامی نمودارهای تغییر شکل مشابه هم بوده و نتیجه‌گیری خاصی برای چسبندگی لایه‌ها نمی‌توان از این نمودارها گرفت. قابل توجه است که ارتفاع تغییر شکل ایجاد شده در نمونه‌هایی که با چسب بایلا ساخته شده‌اند بیشتر است و طبق مرجع [۵] می‌توان به جذب انرژی بیشتر این سازه اشاره کرد.

۳- ۱- ۳- طول ترک پتال

یکی از متغیرهایی که توسط آن می‌توان میزان تغییر شکل و کشیدگی آلومینیوم را مشخص کرد، متوسط طول ترک ایجاد شده است. مقادیر متوسط طول ترک اندازه‌گیری و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

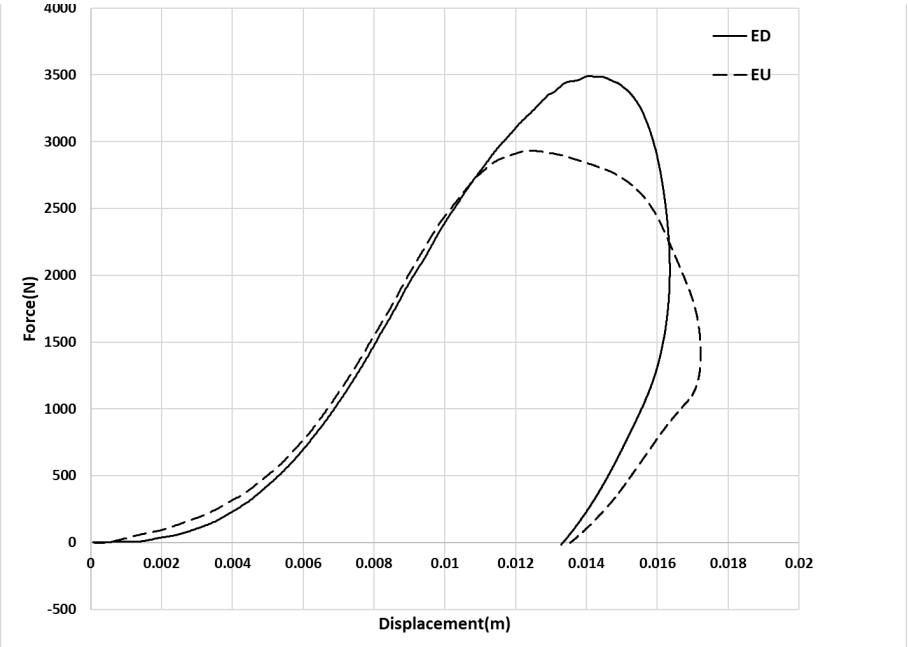
بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول، در نمونه‌های الاستومر پشت نمونه‌هایی که در آن‌ها چسب سیانوآکریلات به‌کار رفته دارای بیشترین طول ترک هستند. این میزان در چسب‌های کموزیل و بایلا به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۷/۳ میلی‌متر بوده در حالی‌که در چسب سیانوآکریلات ۱۸/۳ میلی‌متر می‌باشد. این امر نشان‌دهنده تغییر شکل بیشتر لایه آلومینیوم در این نمونه

1 Adhesive Failure
2 Cohesive Failure



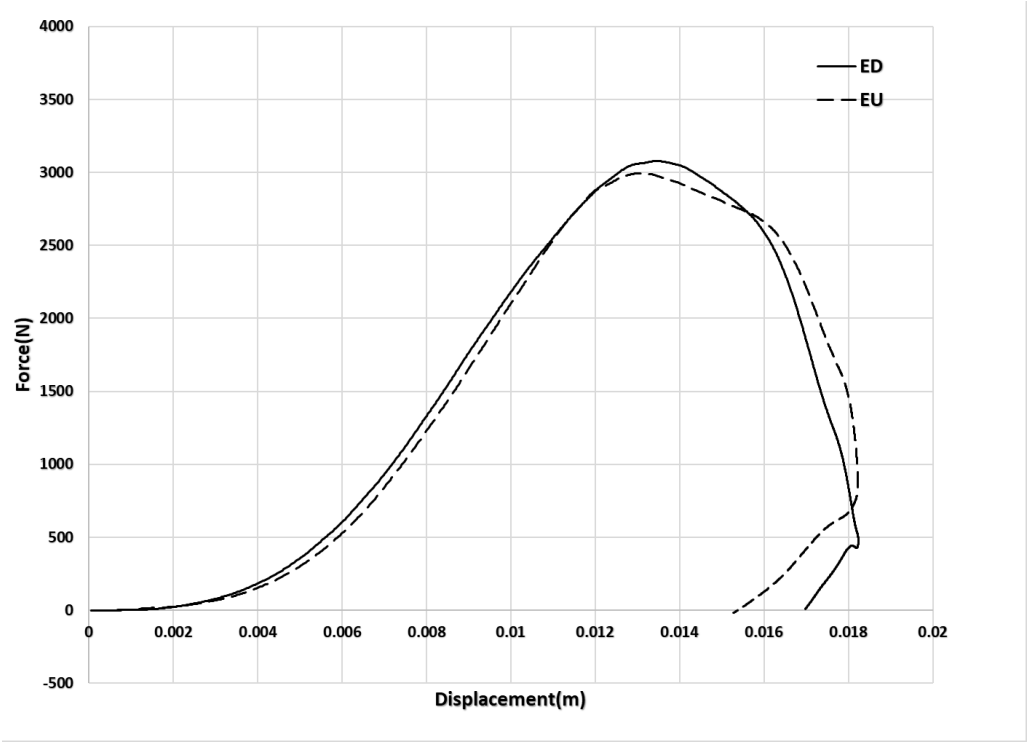
شکل ۹: نمودار نیرو–جابجایی نمونه ساخته شده با چسب بایلا تحت بارگذاری سرعت پایین

Fig. 9. Displacement-force diagram in the samples made with Baila-S2 adhesive under low speed loading



شکل ۱۰: نمودار نیرو–جابجایی نمونه ساخته شده با چسب سیانوآکریلات تحت بارگذاری سرعت پایین

Fig. 10. Displacement-force diagram in the samples made with cyanoacrylate adhesive under low speed loading



شکل ۱۱: نمودار نیرو–جابجایی نمونه ساخته شده با چسب کموزیل تحت بارگذاری سرعت پایین

Fig. 11. Displacement-force diagram in the samples made with chemosil adhesive under low speed loading

Table 5. The values of stiffness and maximum force obtained from displacement force diagrams

جدول ۵: مقادیر سفتی و حداکثر نیروی حاصل از نمودارهای نیرو–جابجایی

کمیات اندازه گیری شده	کموزیل الاستومر بالا	کموزیل الاستومر پایین	سیانو آکریلات الاستومر بالا	سیانو آکریلات الاستومر پایین	بایلا الاستومر بالا	بایلا الاستومر پایین
قله نیرویی (نیوتون)	۲۹۹۲	۳۰۷۷	۲۹۳۰	۳۴۸۵	۳۰۷۶/۶	۳۲۷۷/۴
سفتی دینامیکی (کیلو نیوتون بر میلی‌متر)	۰/۴۲۰۶۷	۰/۴۲	۰/۴۳۹۸۴	۰/۴۲۶۴۴	۰/۵۰۶۹۴	۰/۴۷۲۸۴
انرژی جذب شده (ژول)	۲۵/۹۸۳۲	۲۶/۶۸۱۳	۲۴/۹۲۹۵	۲۴/۹۵۳۸	۱۸/۷۴۳۸	۲۶/۲۶۷۱

است که نشان دهنده سفتی خمشی کمتر و اتصال ضعیف‌تر در این فصل مشترک است. نتایج قبلی که بر مبنای طول جدایش بین‌لایه‌ای بودند (طبق جدول ۱) می‌توانند این نتایج را تصدیق کنند.

برای نمونه‌های الاستومر جلو، بیشترین طول ترک لایه آلومینیوم در نمونه‌های ساخته شده با چسب کموزیل دیده می‌شود که می‌تواند نتایج قبلی بر مبنای اینکه اتصال بین لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت در صورت استفاده از چسب کموزیل ضعیف است، را تصدیق کند.

۳- ۲- ضربه سرعت پایین

۳- ۲- ۱- طول ناحیه آسیب

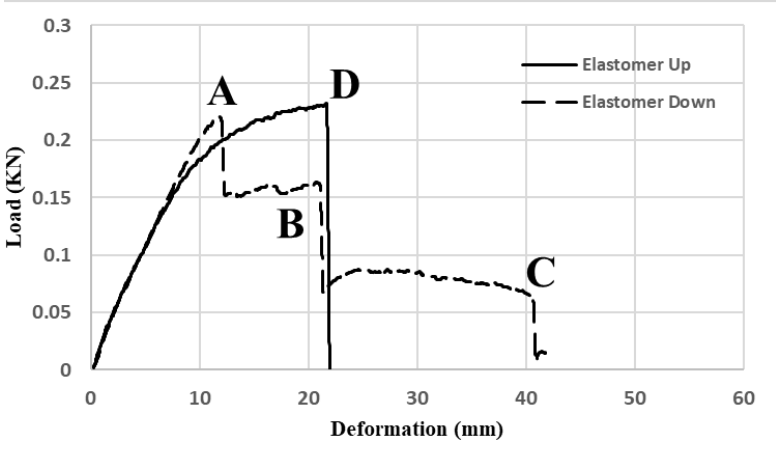
مقطع نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۷ ارائه شده است. طول ناحیه آسیب با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر محاسبه شده (شکل ۸) و در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه هر فصل مشترک به‌صورت جداگانه بررسی می‌شود:

۳-۲-۱-۱- فصل مشترک الاستومر/آلومینیوم:

در حالت الاستومر بالا، نمونه‌های ساخته شده با کموزیل کمترین میزان جدایش بین لایه الاستومری و آلومینیوم را دارند. در حالت الاستومر پایین هم کموزیل بهترین چسبندگی را در این بخش داشته است. میزان جدایش در این فصل مشترک در نمونه‌های کموزیل ۵۲ درصد کمتر از بایلا و ۶۶ درصد کمتر از سیانوآکریلات است. بعد از کموزیل، بهترین عملکرد را بایلا داشته که جدایش آن نسبت به سیانوآکریلات ۲۸ درصد کمتر است. ضعیف‌ترین عملکرد در این فصل مشترک را چسب سیانوآکریات داشته است. بهترین عملکرد برای این فصل مشترک را چسب کموزیل دارد که این نتیجه‌گیری را مرجع [۲۴] نیز تایید می‌کند.

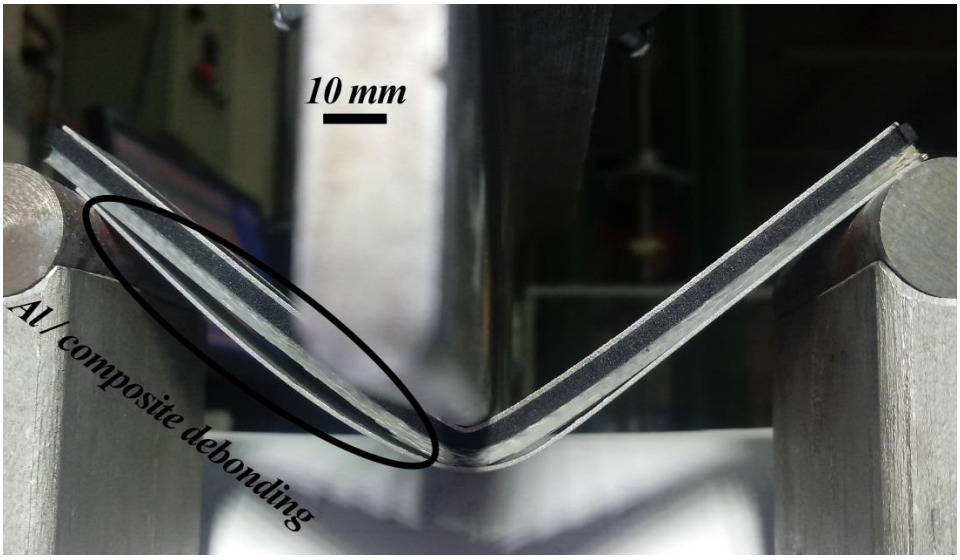
۳-۲-۱-۲- فصل مشترک کامپوزیت/آلومینیوم:

در این قسمت، براساس میزان تخریب و طول جدایش، سیانوآکریلات بهترین عملکرد را داشته است، در این فصل مشترک جدایش در نمونه‌های سیانوآکریلات ۳۵ درصد کمتر از نمونه‌های کموزیل و ۴۳ درصد کمتر از نمونه‌های بایلا است. اما اگر به نوع تخریب‌ها دقت کنیم، در نمونه‌های ساخته شده با کموزیل به جای جدایش لایه کامپوزیتی از آلومینیوم، شاهد جدایش بین لایه‌های کامپوزیت هستیم. دو فرضیه در اینجا مطرح می‌شود ، یکی این‌که کموزیل با توجه به نوع آسیب، بهترین چسب برای این بخش است و دو این‌که، خواص کامپوزیت ترموست به علت قرارگیری آن در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد دچار افت شده است. به منظور تصمیم‌گیری برای بهترین چسب در این فصل مشترک، نیاز است تا آزمایش‌های دیگری هم مبتنی بر بررسی خواص کامپوزیت حرارت دیده صورت گیرد. نتایج در هردو وضعیت الاستومر بالا و الاستومر پایین مشابه هم هستند.



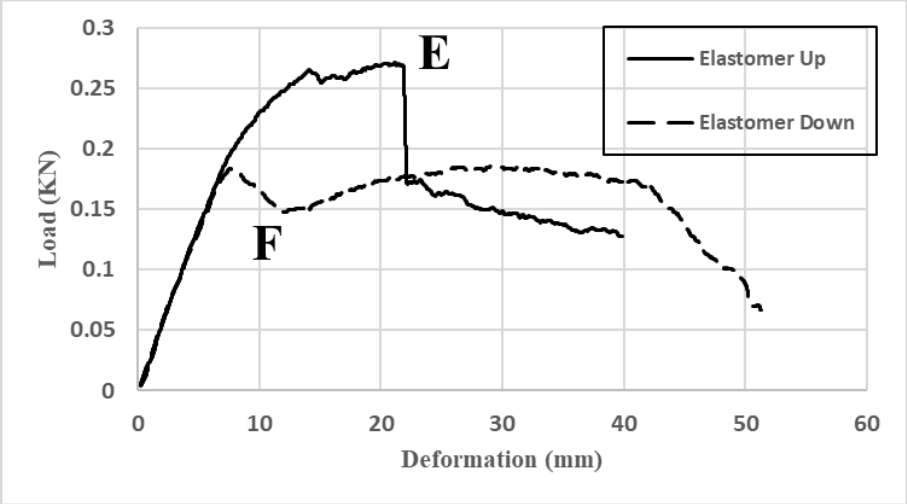
شکل ۱۲: نمودار نیرو–جابجایی در حالت استفاده از چسب سیانوآکریلیت در بارگذاری خمشی شبه استاتیکی

Fig. 12. Displacement-force diagram using cyanoacrylate adhesive in quasi-static flexural loading



شکل ۱۳: جدایش بین کامپوزیت و آلومینیوم در نمونه الاستومر بالا در چسب سیانوآکریلیت در بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

Fig. 13. Separation between composite and aluminum in EU sample in cyanoacrylate adhesive in quasi-static flexural loading

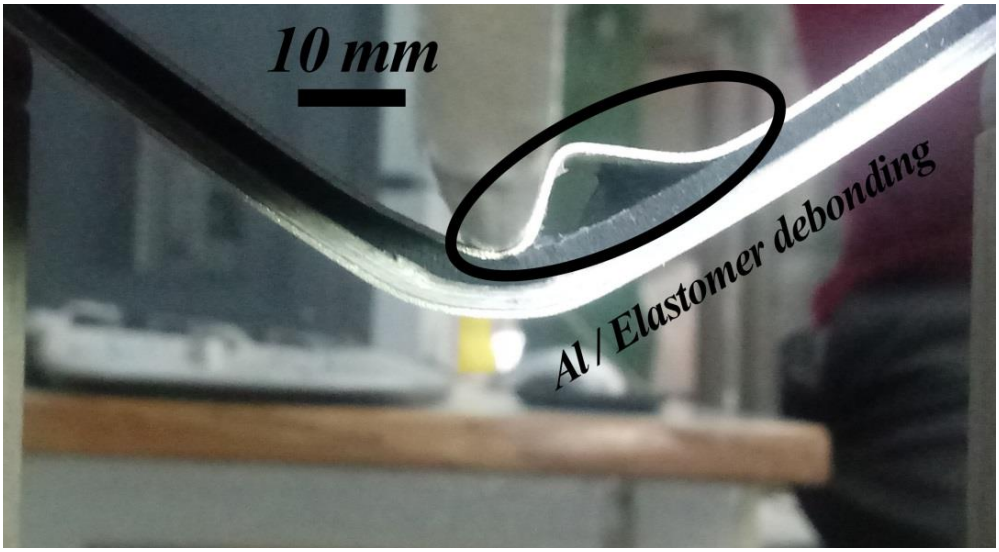


شکل ۱۴: نمودار نیرو–جابجایی در حالت استفاده از چسب بایلا در بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

Fig. 14. Diagram of displacement-force in the use of bylaadhesive in quasi-static flexural loading

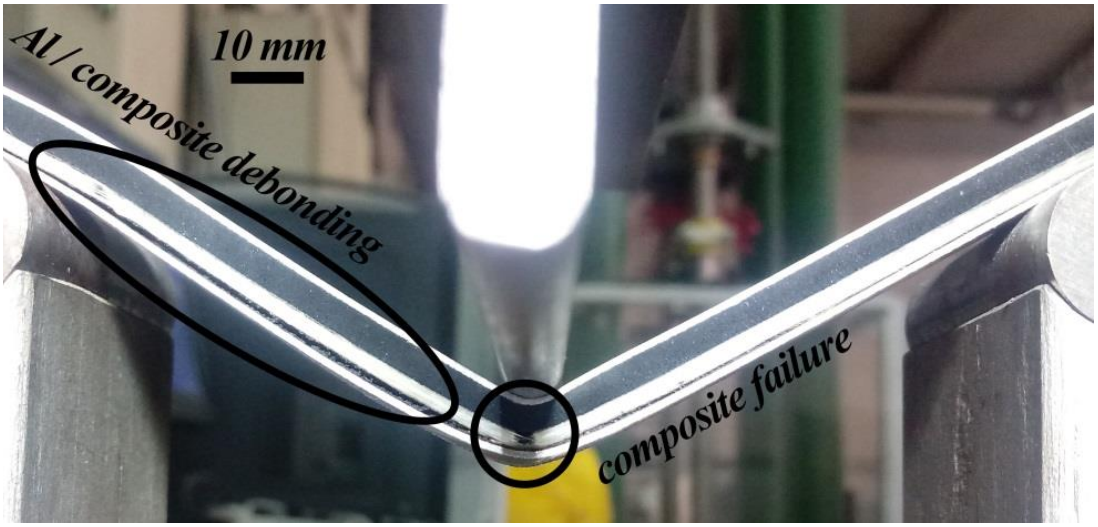
۳-۲-۱-۳- فصل مشترک الاستومر/کامپوزیت:

در این بخش، تمامی چسب‌ها عملکرد قابل قبول و نسبتا خوبی داشتند. اما با توجه به طول جدایش، باز هم کموزیل بهترین عملکرد را داشته به‌صورتی‌که در وضعیت الاستومر بالا، جدایشی در نمونه‌های ساخته شده توسط کموزیل مشاهده نمی‌شود و در نمونه های الاستومر پایین هم این جدایش خیلی کم و قابل صرف‌نظر است. همچنین در نمونه‌های الاستومر پایین با کموزیل، جدایش بین لایه کاپوزیت و الاستومری نیست، بلکه لایه‌های کامپوزیتی از هم جدا شده‌اند. به صورت متوسط جدایش در نمونه‌های کموزیل ۶۷ درصد کمتر از بایلا و ۷۶ درصد کمتر از نمونه‌های ساخته شده با سیانوآکریلات است. گزینه دوم در صورت در دسترس نبودن کموزیل، بایلا است که در وضعیت الاستومر بالا جدایشی مشاهده نشده و در دیگر وضعیت هم طول جدایش کمتری نسبت به مورد مشابه ساخته



شکل ۱۵: کمانش موضعی در مود اول ایجاد شده در لایه آلومینیوم در حالت الاستومر بالا در استفاده از چسب بایلا در بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

Fig. 15. Local buckling in the first mode created on the aluminum layer in EU mode using bylaadhesive in quasi-static flexural loading



شکل ١٦: جدایش بین الاستومر و آلومینیوم در نمونه الاستومر بالا در چسب کموزیل در بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

Fig. 16. Separation between elastomer and aluminum in EU specimen in chemosil adhesive in quasi-static flexural loading

شده با سیانوآکریلات داشته است. جدایش در نمونه‌های بایلا نسبت به سیانوآکریلات هم ۷۲ درصد کمتر است.

۳- ۲- ۲- سفتی دینامیکی

با توجه به مجهز بودن دستگاه سقوط وزنه به سنسور شتاب‌سنج، خروجی دستگاه نمودار شتاب-زمان است. که با انتگرال‌گیری از شتاب، سرعت و با یک مرحله دیگر انتگرال‌گیری، جابجایی‌ها بدست می‌آید. همچنین بر اساس قانون دوم نیوتن می‌توان نیرو در هر لحظه را محاسبه کرد. در نهایت نمودار های نیرو-جابجایی به‌دست می‌آیند که شیب قسمت خطی آن‌ها نشان‌دهنده سفتی سازه است. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مربوط به نمودار نمونه‌های ساخته شده با چسب بایلا، سیانوآکریلات و کموزیل است. هر سازه‌ای که سفتی بیشتری داشته باشد یعنی چسب بهتری در آن به‌کار رفته و تمامی لایه‌ها به‌صورت یکپارچه بار را تحمل می‌کنند و سازه‌ای که سفتی کمتری دارد یعنی جدایش بین‌لایه‌ای در آن زودتر رخ داده و یکپارچگی سازه از بین رفته است. در جدول ۵ مقادیر سفتی و ماکزیمم نیروی تحمل شده مربوط به هر نمونه گزارش شده است.

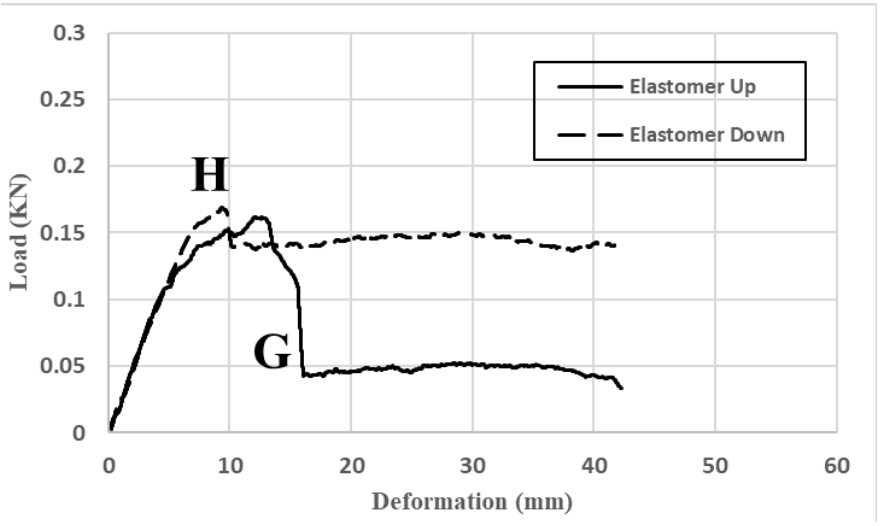
بر اساس نتایج ارائه شده در جدول فوق و مقایسه سفتی نمونه‌ها، نمونه‌های ساخته شده با بایلا بالاترین سفتی را داشته و اتصال بین لایه‌ها در نمونه‌های ساخته‌شده توسط این چسب، نسبت به دو چسب دیگر بهتر بوده است. سفتی در نمونه‌های ساخته شده با بایلا ۱۳ درصد بیشتر از نمونه‌های سیانوآکریلات و ۱۷ درصد بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با کموزیل است. بعد از بایلا، چسب سیانوآکریلات با اختلاف اندک (۳ درصدی) نسبت به چسب کموزیل، بهترین عملکرد را داشته و توانسته یکپارچگی نمونه را تا حد خوبی حفظ کند.

نکته قابل توجه بیشتر بودن سفتی نمونه‌های الاستومر بالا نسبت به الاستومر پایین در تمامی حالات است. با توجه به عملکرد بهتر کامپوزیت در کشش نسبت به فشار، دلیل این امر می‌تواند قرارگیری لایه کامپوزیت در ناحیه تحت کشش در تمام نمونه‌های الاستومر بالا باشد.

Table 6. Flexural properties of the samples under quasi-static flexural loading

جدول ٦: خواص خمشی نمونه‌های مورد بررسی تحت بارگذاری خمشی شبه‌استاتیک

نوع چسب به کار رفته	نوع قرارگیری	سفتی خمشی (کیلو نیوتن بر میلی‌متر)	استحکام خمشی (کیلو نیوتن)
سیانوآکریلات	الاستومر پایین	۰/۰۱۹۰۵۳	۱۰/۰۹
	الاستومر بالا	۰/۰۲۰۸	۱۲/۹۴
بایلا	الاستومر پایین	۰/۰۲۴۷۱	۸/۴۳
	الاستومر بالا	۰/۰۲۵۵	۱۲/۵
کموزیل	الاستومر پایین	۰/۰۲۱۷۸	۷/۹۶
	الاستومر بالا	۰/۰۲۳۲۷	۷/۶۰



شکل ۱۷: نمودار نیرو-جابجایی در حالت استفاده از چسب کموزیل در بارگذاری خمشی شبه‌استاتیکی

Fig. 17. Displacement-force diagram for the use of chemosil adhesive in quasi-static flexural loading

۳- ۳- خمش سه‌نقطه

۳- ۳- ۱- توالی رخداد آسیب

در حین انجام آزمایش، نمودار نیرو-زمان به‌صورت پیوسته ترسیم شده که در ادامه به تحلیل هر کدام پرداخته می‌شود. نمودار نیرو-زمان درحالت استفاده از چسب سیانوآکریلیت در شکل ۱۲ ارائه شده است.

در حالت الاستومر پایین، سه افت در نمودار مشاهده می‌شود. در نقاط A و B به ترتیب ایجاد جدایش بین لایه‌های کامپوزیت/الاستومر و الاستومر/آلومینیوم رخ می‌دهد. در نقطه C یک جدایش ناگهانی و وسیع بین کامپوزیت و آلومینیوم اتفاق می‌افتد. در حالت الاستومر بالا، تنها یک افت در نقطه D مشاهده می‌شود که مربوط به جدایش ناگهانی و نسبتا گسترده بین کامپوزیت و آلومینیوم است. این جدایش در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. نهایتا می‌توان گفت که چسب سیانوآکریلیت در هر سه اتصال بسیار ضعیف عمل کرده و برای این نوع چندلایه در بارگذاری شبه‌استاتیکی مناسب نمی‌باشد.

در حالت استفاده از چسب بایلا، نمودار نیرو-مکان به‌صورت شکل ۱۴ خواهد بود. همانگونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، در حالت الاستومر بالا تنها یک افت در نمودار قابل مشاهده است (نقطه E) که مربوط به جدایش بین الاستومر و آلومینیوم می‌باشد. این جدایش بسیار موضعی بوده و در آن آلومینیوم در مجاورت ایندنتور وارد مود کمانشی می‌شود (شکل ۱۵). در حالت الاستومر پایین افت مشهودی در نمودار مشاهده نمی‌شود و تنها در نقطه F یک افت موضعی وجود دارد که مرتبط با جدایش بین‌لایه‌ای نیست و احتمالا به دلیل بروز آسیب داخل فاز کامپوزیتی ظاهر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چسب بایلا برای اتصال الاستومر و آلومینیوم مناسب نخواهد بود. درنهایت، نمودار نیرو-جابجایی در حالت استفاده از چسب کموزیل در شکل ۱۷ ارائه شده است.

در این نمودار در حالت الاستومر بالا، افت ایجاد شده در نقطه G مربوط به جدایش بین آلومینیوم و کامپوزیت می‌باشد. این جدایش از وسط نمونه آغاز شده و تا نواحی انتهایی پیش می‌رود. در این حالت هیچ‌گونه جدایشی بین الاستومر و آلومینیوم مشاهده نشد. در نمونه الاستومر پایین، هیچ جدایشی بین لایه‌ها مشاهده نشده و افت ایجاد شده در H می‌تواند به دلیل بروز آسیب در لایه کامپوزیتی باشد. در نهایت می‌توان گفت که چسب کموزیل برای اتصال آلومینیوم و کامپوزیت مناسب نبوده ولی جهت اتصال آلومینیوم و الاستومر مناسب به نظر می‌رسد. در شکل ۱۶ نمونه ساخته شده با کموزیل در انتهای فرایند نشان داده شده است. در مرجع [۲۴] نیز به بررسی چسبنگی الاستومر به فولاد به واسطه چسب کموزیل پرداخته شده است و نتایج حاصل از آزمایش ورکنی[1] نشاندهنده توانایی بالای چسب کموزیل در این اتصال است که تطابق خوبی با نتیجه حاصل از این پژوهش دارد.

۳- ۳- ۲- خواص مکانیکی نمونه‌ها

سفتی نمونه‌ها به همراه استحکام خمشی با توجه به استاندارد مربوطه از نمودارهای نیرو-جابجایی محاسبه شده و در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول، سفتی و استحکام به ترتیب برابر شیب و ماکزیمم نیرو در نمودار می‌باشد.

همان‌گونه که از جدول برمی‌آید، نمونه‌های ساخته شده با بایلا به میزان ۲۰ درصد نسبت به چسب سیانوآکریلات و به میزان ۸ درصد نسبت به چسب کموزیل مقادیر بالاتری از سفتی خمشی را دارا می‌باشند. این موضوع به دلیل چسبندگی بهتر لایه‌ها در حضور این نوع چسب بوده و با توجه به این نکته که تنها یک جدایش موضعی در بین الاستومر و فلز رخ می‌دهد، نتیجه‌ای دور از انتظار نیست. کمترین میزان سفتی در نمونه با چسب سیانوآکریلیت مشاهده می‌شود که دلیل آن جدایش‌های مکرر لایه‌ها از همدیگر در حضور این نوع چسب است. عملکرد بهتر چسب بایلا از منظر سفتی سازه‌ای در بارگذاری ضربه سرعت پایین نیز مشهود است.

از منظر استحکام، در هر دو نوع نمونه ساخته شده با چسب سیانوآکریلیت و بایلا، میزان استحکام خمشی حالت الاستومر پایین به ترتیب ۲۳ و ۳۲/۵ درصد کمتر از حالت الاستومر بالا است. دلیل این امر احتمالا این باشد که در نمونه‌های الاستومر پایین، کامپوزیت در ناحیه فشاری (قسمت بالایی نمونه) واقع شده و ازآن‌جا که کامپوزیت‌ها عموما در فشار ضعیف‌تر از کشش می‌باشند، استحکام خمشی نسبت به حالت الاستومر بالا کاهش می‌یابد. در نمونه با چسب کموزیل، این دو مقدار به یکدیگر نزدیک می‌باشند که دلیل این امر می‌تواند کاهش خواص لایه کامپوزیتی در اثر حرارت باشد.

٤- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک چندلایه هیبریدی شامل لایه‌های آلومینیوم به‌عنوان صفحات خارجی و دو لایه شامل کامپوزیت و الاستومر به عنوان صفحات میانی ساخته شده و چسبندگی بین‌لایه‌ای در سه حالت ضربه سرعت بالا و پایین و بارگذاری شبه‌استاتیکی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

۱- در ضربات سرعت بالا، بهترین چسبندگی بین الاستومر و آلومینیوم در زمان استفاده از چسب کموزیل حاصل شد. این نتیجه با توجه به کمینه

1 Peel Test

بودن مقادیر طول ترک پتال و ناحیه آسیب در نمونه‌های ساخته شده با این چسب گرفته شده و نشان‌دهنده تغییر شکل کمتر این نمونه و در نتیجه سفتی بالاتر آن در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با دو چسب دیگر است. این چسب در ضربات سرعت پایین نیز بهترین عملکرد را برای این فصل مشترک دارا بود.

۲- در ضربات سرعت بالا و ضربات سرعت پایین، در فصل مشترک آلومینیوم و کامپوزیت، چسب سیانوآکریلیت عملکرد بهتری را نسبت به بایلا از خود نشان می‌دهد. در نمونه ساخته شده با چسب بایلا، یک جدایش در تمام عرض نمونه در این فصل مشترک در حالت الاستومر پشت مشاهده شده بنابراین، چسب بایلا برای این فصل مشترک مناسب نیست.

۳- بر اساس ضربات سرعت بالا، در فصل مشترک کامپوزیت و الاستومر، چسب بایلا با توجه به بزرگی ناحیه آسیب، بهترین عملکرد را داراست. البته با توجه به نزدیکی نتایج بدست آمده، چسب سیانوآکریلیت نیز می‌تواند انتخاب مناسبی برای این فصل مشترک باشد. در ضربات سرعت پایین برای فصل مشترک کامپوزیت الاستومر، بر اساس میزان جدایش بین‌لایه‌ای بهترین عملکرد را کموزیل در ابتدا، سپس بایلا و در نهایت چسب سیانوآکریلات داشته است، اما با توجه به این‌که طول ناحیه جدایش بین‌لایه‌ای در هر سه نمونه تقریبا برابر است، عملکرد هر سه چسب قابل قبول بوده و بسته به شرایط موجود و صلاح دید طراح، هرکدام از این سه چسب برای این فصل مشترک قابل استفاده است.

۴-بر اساس نتایج حاصل از نمودار نیرو-جابجایی در ضربه سرعت پایین و محاسبه مقادیر سفتی دینامیکی، میزان سفتی در نمونه‌های ساخته شده با بایلا ۱۳ درصد بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیانوآکریلات و ۱۶/۵ درصد بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با چسب کموزیل هست.

۵-در آزمایشات خمش شبه‌استاتیکی، بهترین عملکرد در زمان استفاده از چسب بایلا حاصل شد. میزان سفتی در نمونه‌های ساخته شده با چسب بایلا نسبت به کموزیل ۱۱/۵ درصد و نسبت به سیانوآکریلات ۲۶ درصد بیشتر است. این نتیجه با توجه به کمتر بودن میزان لایه لایه شدگی و نیز بالاتر بودن سفتی نمونه ساخته شده با این چسب حاصل شده است.

از منظر سفتی دینامیکی هر دو آزمایش سرعت پایین و خمش شبه‌استاتیکی، چسب بایلا را به عنوان بهترین چسب معرفی می‌کنند که این امر نشان می‌دهد که نتایج این دو آزمایش تطابق خوبی با هم دارند. همچنین طبق نتایج هر سه آزمایش، چسب کموزیل بهترین انتخاب برای اتصال بین الاستومر-فلز است. که این نتیجه‌گیری مورد تایید مراجع دیگر نیز است. نتایج آزمایش‌های سرعت بالا و پایین در تمامی فصل مشترک‌ها هم با هم تطابق دارد. نتیجه‌گیری می‌تواند این باشد که استحکام چسب‌ها وابسته به نرخ کرنش نیست.

بنابراین بسته به نوع کاربرد و بارهای وارده به چندلایه در صورتی‌که سازه در معرض تخریب کامل قرار داشته باشد و هدف اصلی حفظ یکپارچگی چندلایه در برابر بارهای اعمالی باشد نتایج مربوط به جدایش بین‌لایه‌ای در آزمایشات ضربه سرعت بالا و پایین معتبر بوده و اگر هدف از طراحی سازه مقاومت و حفظ ساختار و یکپارچگی در برابر بارهای کمتر از حداکثر بار قابل تحمل سازه باشد نتایج حاصل از سفتی دینامیکی مربوط به آزمایشات ضربه سرعت پایین و خمش شبه‌استاتیک دارای اعتبار خواهد بود.

منابع مالی

منابع مالی با استفاده از بودجه پژوهشی دراختیار گذارده شده توسط معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس تامین شد.

منابع

[1] D. Mohotti, T. Ngo, S.N. Raman, M. Ali, P. Mendis, Plastic deformation of polyurea coated composite aluminium plates subjected to low velocity impact, Materials & Design (1980-2015), 56 (2014) 696-713.

[2] H.U. Zaman, M.A. Khan, R.A. Khan, Comparative experimental studies of phosphate glass fiber/ polypropylene and phosphate glass fiber/natural rubber composites, Journal of Elastomers & Plastics, 44(6) (2012) 499-514.

[3] N.A. Patil, S.S. Mulik, K.S. Wangikar, A.P. Kulkarni, Characterization of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy-A Review, Procedia Manufacturing, 20 (2018) 554-562.

[4] E. Sarlin, M. Apostol, M. Lindroos, V.T. Kuokkala, J. Vuorinen, T. Lepistö, M. Vippola, Impact properties of novel corrosion resistant hybrid structures, Composite Structures, 108 (2014) 886-893.

[5] L. Xue, W. Mock, T. Belytschko, Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating, Mechanics of Materials, 42(11) (2010) 981-1003.

[6] D.-W. Lee, B.-J. Park, S.-Y. Park, C.-H. Choi, J.-I. Song, Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings, Composite Structures, 189 (2018) 61-69.

[7] H. Mahfuz, Y. Zhu, A. Haque, A. Abutalib, U. Vaidya, S. Jeelani, B. Gama, J. Gillespie, B. Fink, Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method, International journal of impact engineering, 24(2) (2000) 203-217.

[8] M.S. HooFatt, C. Lin, D.M. Revilock, D.A. Hopkins, Ballistic impact of GLARE™fiber–metal laminates, Composite Structures, 61(1) (2003) 73-88.

[9] H. Ahmadi, H. Sabouri, G. Liaghat, E. Bidkhori, Experimental and numerical investigation on the high velocity impact response of GLARE with different thickness ratio, Procedia Engineering, 10 (2011) 869-874.

[10] M. Sadighi, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, Impact resistance of fiber-metal laminates: A review, International Journal of Impact Engineering, 49 (2012) 77-90.

[11] F. Morinière, R. Alderliesten, R. Benedictus, Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates–a review, International Journal of Impact Engineering, 67 (2014) 27-38.

[12] F. Moriniere, R. Alderliesten, R. Benedictus, Low-velocity impact energy partition in GLARE, Mechanics of Materials, 66 (2013) 59-68.

[13] S.H. Khan, A.P. Sharma, R. Kitey, V. Parameswaran, Effect of metal layer placement on the damage and energy absorption mechanisms in aluminium/glass fibre laminates, International Journal of Impact Engineering, 119 (2018) 14-25

[14] R. Das, A. Chanda, J. Brechou, A .Banerjee, Impact behaviour of fibre–metal laminates, in: Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures, Elsevier, 2016, pp. 491-542.

[15] G.B. Chai, P. Manikandan, Low velocity impact response of fibre-metal laminates –A review, Composite Structures, 107 (2014) 363-381.

[16] D. Mohotti, T. Ngo, S.N. Raman, P. Mendis, Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact, Materials & Design, 82 (2015) 1-17.

[17] D. Mohotti, T. Ngo, P. Mendis, S.N. Raman, Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact, Materials & Design (1980-2015), 52 (2013) 1-16.

[18] C. Roland, D. Fragiadakis, R. Gamache, Elastomer–steel laminate armor, Composite structures, 92(5) (2010) 1059-1064.

[19] M.A. Zarezadeh, Taherzadeh-Fard, G. Liaghat, H. Ahmadi, A. Khodadadi, Experimental study on the plies adhesion of a novel hybrid laminate composed of aluminum, glass-epoxy composite and natural rubber layers under low velocity impact, in: The 6th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-6) ,Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, 2018.

[20] J. Krollmann, T. Schreyer, M. Veidt, K. Drechsler, Impact and post-impact properties of hybrid-matrix laminates based on carbon fiber-reinforced epoxy and elastomer subjected to low-velocity impacts, Composite Structures, 208 (2019) 535-545.

[21] D. Düring, L. Weiß, D. Stefaniak, N. Jordan, C. Hühne,Low-velocity impact response of composite laminates with steel and elastomer protective layer, Composite Structures, 134 (2015) 18-26.

[22] A. Taherzadeh-Fard, M.A. Zarezadeh, G. Liaghat, H. Ahmadi, A. Khodadadi, Investigation on the debonding between different layers in a hybrid aluminum/glass-epoxy/rubber laminate under high velocity impact in: The 6th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-6) Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, 2018.

[23] J. Sang ,S. Aisawa, K. Miura, H. Hirahara, O. Jan, P. Jozef, M. Pavol, Adhesion of carbon steel and natural rubber by functionalized silane coupling agents, International Journal of Adhesion and Adhesives, 72 (2017) 70-74.

[24] A. Souid, A. Sarda, R. Deterre, E .Leroy, Influence of reversion on adhesion in the rubber-to-metal vulcanization-bonding process, Polymer Testing, 41 (2015) 157-162.

[25] S. Abotula, V. Chalivendra, An experimental and numerical investigation of the static and dynamic constitutive behaviour of aluminium alloys, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 45(8) (2010) 555-565.

[26] A. Khodadadi, G. Liaghat, H. Ahmadi, A.R. Bahramian, Y. Anani, O. Razmkhah, S. Asemeni, Numerical and experimental study of impact on hyperelastic rubber panels, Iranian Polymer Journal, 28(2) (2019) 113-122.

.

این صفحه عمداً خالی است