مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 249-256

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تولید هیبرید فلزی- پلیمری به روش تزریق پلیمر روی فلز پوشش داده شده با لیزر

علیرضا امیدوار[1]، پیمان مصدق[2*]، هادی بهادران[1]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، mosadegh@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 خرداد 1395
پذیرش: 10 مرداد 1395
ارائه در سایت: 29 شهریور 1395

کلید واژگان:
هیبرید فلز-پلیمر
تزریق پلاستیک
پوشش دهی لیزر
تاگوچی

چکیده

فلزات و پلیمرها، از مواد بسیار مناسب برای کاربردهای مهندسی هستند. با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف از جمله صنعت اتومبیل، نیاز به مواد مقرون به صرفه با استحکام بالا و وزن پایین برای ساخت بدنه، به صورت روزافزونی احساس می‌شود. تاکنون در اغلب موارد، از فلزات مستحکمی همچون فولاد و دیگر فلزات، برای ساخت این تجهیزات استفاده شده و بسته به نوع استفاده، عایق و پوشش‌دهی مناسب برای به حداکثر رساندن بازده تعبیه گردیده است. یکی از انواع مواد کامپوزیتی، استفاده از فلز و پلیمر در کنار یکدیگر است. اتصال فلز و پلیمر در این روش، با قرار دادن یک لایه پلیمر روی یک لایه فلز، با ایجاد برآمدگی‌هایی ظریف روی سطح فلز به کمک فرآیند پوشش‌دهی با لیزر و سپس انجام عملیات تزریق روی آن انجام می‌شود. مزیت این روش این است که با انتخاب مناسب الگوی برجسته سازی و جنس و دبی پودر مورد استفاده، استحکام اتصال را می‌توان متناسب با نوع و میزان بارگذاری طراحی کرد. پارامترهای مورد بررسی، فشار نگه‌داری، دمای قالب، الگوی روی فلز و ضخامت پلیمر است. نتایج تست‌های کشش و خمش صورت گرفته و بررسی تاگوچی پارامترها نشان می‌دهد که استحکام کششی اتصال در دمای قالب 50 درجه سانتی‌گراد، فشار تراکم کمتر (7 مگاپاسکال)، ضخامت پلیمر بیشتر (3 میلی‌متر) و الگوی پوشش موازی بالاتر خواهد بود. همچنین، بالاترین مدول خمشی هیبرید نیز در دمای قالب 50 درجه سانتی‌گراد، فشار تراکم کمتر (7 مگاپاسکال) و الگوی موازی اتفاق می‌افتد.

Fabrication of metal-polymer hybrid via injection molding of polymer on laser cladded metal

Alireza Omidvar, Peiman Mosaddegh*, Hadi Bahadoran

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, mosadegh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 June 2016
Accepted 31 July 2016
Available Online 19 September 2016

Keywords:
Metal-Polymer hybrid
Injection molding
Laser cladding
Taguchi

ABSTRACT

Metals and polymers are frequent materials for engineering purposes. Technological advances have called for new materials with high stiffness and low production cost, especially in automotive industry. Up until now, the most common approach has been to employ high strength metals like steel in manufacturing different parts and subsequently coating them with regard to their application, in order to reach maximum performance. One of the novel composites is metal-polymer hybrid which is produced by injection molding a layer of polymer on a laser cladded metal to form a laminated composite. The superiority of this method lies in the diversity of pattern and powder materials and feed rate in cladding that can be optimized for a particular loading in different applications. Evaluating parameters are holding pressure, mold temperature, cladding pattern, and polymer thickness. Simple Tension and three-point bending tests showed that the maximum strength of joint adhesion was achieved at 50℃ mold temperature, lower holding pressure (70MPa), higher thickness (3mm), and parallel pattern. Moreover, better flexural modulus was reached at 50℃ mold temperature, lower holding pressure (70MPa), lower thickness (2mm), and parallel pattern.

1- مقدمه

امروزه طراحان به منظور کاهش هزینه‌ها و مصرف سوخت سعی در کاهش وزن سازه‌ها و قطعات مهندسی دارند و به همین علت، وزن کمتر در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی و ابزارهای مهندسی اهمیت بالایی دارد. کامپوزیت‌ها بهترین راه برای تحقق این هدف هستند. یکی از انواع کامپوزیت، استفاده از هیبرید فلز و پلیمر در کنار یکدیگر است که این امکان را فراهم می‌آورد تا از خواص هر دو جنس به طور هم‌زمان در یک قطعه استفاده شود. فولاد و پلیمر به علت مشخصات مکانیکی مورد نیاز صنایع، تولید و فرم‌دهی آسان همراه با قیمت پایین، رایج‌ترین مواد اولیه صنایع هساستتند. از جمله کاربردهای هیبرید فلزی–پلیمری تولید انواع پروفیل با مقاطع مختلف جهت استفاده در صنایع خودرو سازی است که از نمونه‌های رایج آن می‌توان به جلوبندی خودروهای سواری اشاره کرد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Omidvar, P. Mosaddegh, H. Bahadoran, Fabrication of metal-polymer hybrid via injection molding of polymer on laser cladded metal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 249-256, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

مهم‌ترین مساله در این تکنولوژی، نحوه ایجاد اتصال و بهبود آن و در پی آن میزان استحکام و اعوجاج قطعه تولیدی می‌باشد که موجب تنوع در روش‌های تولید شده است. در ادامه خلاصه‌ای از روش‌های ایجاد و یا بهبود اتصال بین فلز و پلیمر برای ساخت یک هیبرید صنعتی ارائه شده است.

1-1- تغییر در مونومر پلیمر

در این روش برای افزایش چسبندگی پلیمر به فلز، ساختار شیمیایی پلیمر را دست خوش تغییر می‌کنند. به عنوان به که چسبندگی به فلز ناچیزی از خود نشان دارد، مالئیک انیدرید(با فرمول شیمیایی $C_4H_2O_3$) به جهت قطبی شدن مولکول پلیمر و افزایش چسبندگی آن به فلز، اضافه می‌شود.

مزیت استفاده از این روش عدم لزوم استفاده از مواد آماده‌ساز سطح است. در مقابل، یکی از مهم‌ترین عیوب این روش چسبیدن پلیمر به بدنه قالب و مجموعه سیلندر و ماردون دستگاه تزریق می‌باشد.[1 ,2]

2-1- استفاده از یک جزء سوم

استفاده از یک جزء سوم مانند چسب نیز برای انجام این اتصال می‌تواند مؤثر باشد. برای نمونه چسب اکرلیک-اپوکسی نیازی به آماده‌سازی سطوح کم‌انرژی پلیمر از خانواده الفین‌ها ندارد و بسیار سریع عمل می‌کند. این روش در سال 2009 توسط شرکت داو[1] اتومبیل، جهت ساخت جلوبندی خودروی فولکس واگن به ثبت رسیده است [1].

همچنین چسبندگی بالای پلیمر و فلز را می‌توان به کمک آغشته سازی سطح فلز به پرایمر، قبل از تزریق پلیمر روی سطح فلز نیز به‌دست آورد.

در روش دیگر از این دسته، ورق فولادی را با یک ماده آلی که چسبندگی خوبی با پلیمر تزریقی دارد، پیش پوشش می‌دهند [4,3,1].

3-1- اتصال مکانیکی

دسته سوم از روش‌های اتصال فلز به پلیمر، قفل مکانیکی آن‌ها در یکدیگر است. این روش شامل دور زدن لبه‌ها، سوراخ‌ها، خلل وفرج‌ها و ... از سطح فلز به وسیله پلیمر می‌باشد. همچنین برای اوقاتی که هندسه و یا کارایی مورد انتظار از قطعه، اجازه ایجاد لبه، سوراخ و یا دور زدن فلز توسط پلیمر را نمی‌دهد، می‌توان اقدام به ایجاد فرورفتگی‌ها و یا برآمدگی‌هایی با توجه به ضخامت لایه پلیمری، در سطح فلز کرد [5,1].

1-3-1- نصب برجستگی

در سال 2009، پژوهشی پیرامون اتصال لایه کربن-اپوکسی به لایه فلزی توسط یوکسینیک، اسکیرر و زارمبا انجام شد. در این روش برای ایجاد اتصال بین لایه فولادی و لایه اپکسی از نصب پین‌های استوانه‌ای شکل و سر کروی روی سطح فلز به کمک پرتوی الکترونی استفاده شده است. پین‌های سر کروی مشخصات مکانیکی بالاتری را برای اتصال ایجاد می‌کند [6].

2-3-1- ایجاد زبری روی سطح

روشی دیگر برای برقراری اتصال، ایجاد زبری در مقیاس میکرو با استفاده از فرآیندهایی نظیر شات بلاست و گریت بلاست روی سطح فلز و سپس تزریق پلیمر روی فلز گرم شده می‌باشد و در سال 2006 توسط لوشتا، ماریلنو و باریانی ابداع شده. تحلیل و بررسی نشان می‌دهد که استفاده از الیاف باعث افزایش نفوذ پلیمر و خواص مکانیکی می‌شود [8,7,3].

[1] Daw automotive

مهم‌ترین پارامتر مؤثر در این طرح، دمای سطح فلز می‌باشد. به طوری که با افزایش دمای سطح فلز، نفوذ پلیمر و الیاف به داخل این زبری‌ها بیشتر می‌شود. همچنین، هر چه سرعت تزریق بالاتر باشد، کسر لایه منجمد تزریق کمتر شده، نفوذ پلیمر بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه اتصال محکم‌تر خواهد بود.

3-3-1- اتصال به کمک لیزر

روش دیگر برای ایجاد زبری روی سطح فلز و نفوذ پلیمر به داخل آن، استفاده از لیزر است. استفاده از لیزر برای ایجاد اتصال، به روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. یک تکنولوژی در سال 2011 توسط اندرس رزنر ابداع شد که در آن پلیمر در برابر طول موج لیزر، شفاف و فلز، جاذب پرتو لیزر می‌باشد. تابش لیزر موجب ایجاد فشار در لایه‌های درونی فلز، حرکت مواد مذاب رو به بالا و جمع شدن آن روی سطح فلز می‌شود. این پدیده یک زیر برش در سطح فلز ایجاد می‌کند وکمک می‌کند تا پلیمر که در اثر تماس با فلز ذوب شده و تحت فشار اعمالی به محل اتصال به داخل حفره نفوذ کند. استحکام اتصال تا حد زیادی به فشار اتصال، زمان اعمال آن و نحوه تجمع انرژی نیز بستگی دارد [10,9].

در این مقاله، اتصال فلز و پلیمر با ایجاد برآمدگی‌هایی ظریف روی سطح فلز به کمک فرآیند پوشش دهی با لیزر و سپس انجام عملیات تزریق روی آن انجام می‌شود. در این روش که کاملاً جدید است و در کشور مشابه آن انجام نشده است، پلیمر مذاب تحت دما و فشار بالا برجستگی‌های روی سطح فلز را کاملاً احاطه می‌کند. در ادامه با منقبض شدن پلیمر، برجستگی‌های فلز در پلیمر به دام می‌افتد. مزیت این روش این است که با انتخاب مناسب الگوی برجسته‌سازی و جنس و دبی پودر مورد استفاده، استحکام اتصال را می‌توان متناسب با نوع و میزان بارگذاری طراحی کرد.

موارد زیر از ویژگی‌های این روش نوین، در مقایسه با سایر روش‌ها است:

- سرعت و دقت بالای ایجاد الگو روی انواع مختلف سطح فلز
- سازگاری عمل با سایر فرآیندهای خطوط تولید همچون برش با لیزر
- امکان ایجاد انواع خط الگو با ارتفاع و پهناهای متفاوت، متناسب با نوع، میزان و جهت بار
- قابل استفاده با انواع ترموپلاستیک‌های تزریقی بدون نیاز به استفاده از الیاف تقویت کننده
- عدم نیاز به گرم کردن لایه فلزی، انجام عملیات آماده‌سازی و یا حتی تمیز کردن سطح
- سازگار با پروسه‌های تولید همچون کارگاه رنگ و شرایط مختلف آب و هوایی با تکرار پذیری عالی

هدف از انجام این پروژه ساخت قطعات هیبریدی فلز-پلیمر و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر استحکام اتصال ایجاد شده، به منظور تنظیم این عوامل برای بهبود اتصال بین فلز و پلیمر می‌باشد. نوآوری انجام شده در این روش ساخت، استفاده از لیرز برای ایجاد الگوهایی با ویژگی‌های هندسی کنترل شده به عنوان عامل اصلی اتصال می‌باشد.

2- تجهیزات آزمایشگاهی

ابتدا قطعه‌ای استاندارد و متناسب با آزمایش‌های مورد نظر انتخاب می‌شود. این قطعه فلزی، پس از یک آماده‌سازی سطحی ساده در دستگاه لیزر قرار می‌گیرد تا الگوی مورد نظر روی آن قرار گیرد. آن‌گاه قطعات فلزی آماده شده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

را در دستگاه تزریق پلیمر قرار داده و پلیمر انتخابی روی آن تزریق می‌شود. سپس با استفاده از روش تاگوچی[1] قطعات هیبرید ساخته شده، مورد آزمایش قرار می‌گیرند تا تأثیر عوامل مختلف و حالت بهینه هرکدام روی استحکام اتصال بررسی شود.

همان‌طور که گفته شد، برای ایجاد اتصال لایه پلیمری به لایه فولادی، روی سطح فلز برآمدگی‌های ظریفی ایجاد می‌شود. جنس برآمدگی‌های ایجاد شده از پودر فولاد ضدزنگ 314 است که به کمک دستگاه لیزر گازی دی اکسید کربن با توان نامی 150 وات، ساخت شرکت فناوران لیزر سهند، پوشش داده می‌شود. توان، قطر پرتو و سرعت حرکت دستگاه روی سطح فلز به ترتیب 115 وات، 0.4 میلی‌متر و 110 میلی‌متر بر دقیقه و دبی پودر برابر 8 گرم بر دقیقه تنظیم شده است. "شکل 1" تصویر ایجاد پوشش موازی روی یک نمونه را نشان می‌دهد.

برای ساخت این هیبرید، یک قالب دو صفحه‌ای از جنس فولاد ابزار[2] ساخته شده است. کلیه اجزای مدار تزریق در صفحه حفره‌ها ماشین‌کاری شده است و هر کدام از صفحات سنبه و ماتریس، مدار خنک‌کننده مجزایی با دبی 10 لیتر بر دقیقه از روغن مخصوص قالب دارند. "شکل 2" شماتیک قالب ساخته شده را نشان می‌دهد.

ماشین تزریقی مورد استفاده از شرکت هایسینگ[3] بوده و شرکت وارد کننده آن نکو بهینه ماشین است و مشخصات فنی آن در جدول شماره 1 نشان داده شده است.

روش ساخت نمونه‌های هیبرید به این صورت است که ورق‌های فولادی پوشش داده شده را در حفره‌های قالب گذاشته و سپس پلیمر سیکلو اولفین کوپلیمر روی آن تزریق می‌گردد. جدول 2 شرایط مختلف تزریق را برای قطعات نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، در این پژوهش استحکام

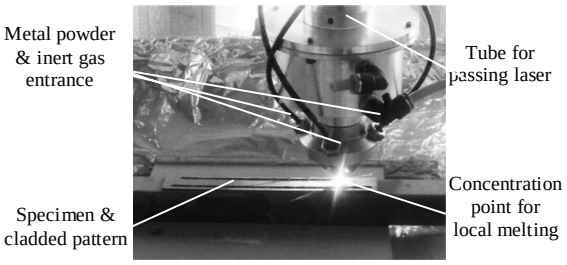

Fig. 1 Cladding of stainless steel with CO_2 laser

شکل 1 اجرای پوشش دهی سطح روی فولاد ضد زنگ با لیزر گازی دی اکسید کربن

جدول 1 مشخصات ماشین تزریق پلاستیک

Table 1 Injection molding machine specification

کمیت	اندازه
کورس ماردون	126 (mm)
قطر ماردون	27 (mm)
نرخ حجمی تزریق	$93.46(\frac{cm^3}{s})$
سرعت پاسخ گویی هیدرولیک	0.2 (s)
ماکسیمم فشار تزریق	173 (MPa)
تناژ دستگاه	88 (Ton)
نسبت تشدید	10

[1] Taguchi
[2] Tool p-20
[3] HAIXING model HXF 88

کششی اتصال و مدول خمشی هیبرید مورد نظر می‌باشد. هر دو این کمیت‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش تک محوره محصول شرکت سنتام[4] اندازه‌گیری می‌شود که مشخصات آن در جدول 3 آمده است. "شکل 3" تصویر اندازه‌گیری مدول خمشی هیبرید را به روش خمش سه نقطه‌ای و با استفاه از دستگاه تست کشش نشان می‌دهد. "شکل 4" تصویر اندازه‌گیری استحکام کششی را به روش تست تک محوره و با استفاده از دستگاه سنتام نشان می‌دهد.

برای بررسی استحکام اتصال فلز به پلیمر، نمونه‌های "شکل 5 و 6" طراحی و ساخته شده است. این نمونه‌ها مخصوص آزمایش تست کشش است

جدول 2 پارامترهای تزریق

Table 2 Injection parameters

کمیت	مقدار
زمان تزریق	3s
حجم تزریق	$93.46\frac{cm^3}{s}$
زمان خنک کاری	30s
دمای تزریق	275°C
فشار تزریق	85Bar
فشار نگه‌داری	70Bar-110Bar

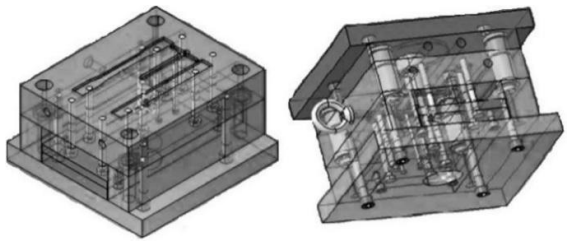

Fig.2 Manufactured mold for injection molding of products

شکل 2 قالب تزریق پلاستیک ساخته شده برای ساخت قطعات

جدول 3 مشخصات دستگاه تست کشش تک محوره

Table 3 tensile machine specification

کمیت	مقدار
ظرفیت نهایی اعمال نیرو	5000 (N)
حداکثر سرعت فک	300 (mm/min)
دقت انکودر	0.01 (mm)
ظرفیت لودسل مورد استفاده	50 (kgF)
دقت لودسل مورد استفاده	0.1 (N)

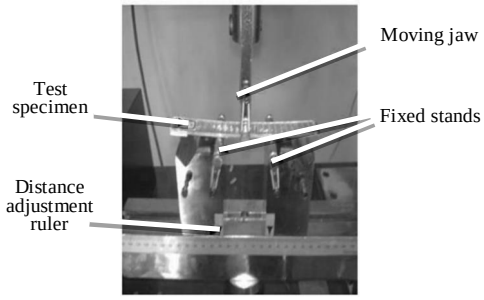

Fig. 3 Extracting bending modulus of the product with parallel pattern

شکل 3 اندازه گیری مدول خمشی هیبرید با الگوی عمودی

[4] STM-50

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

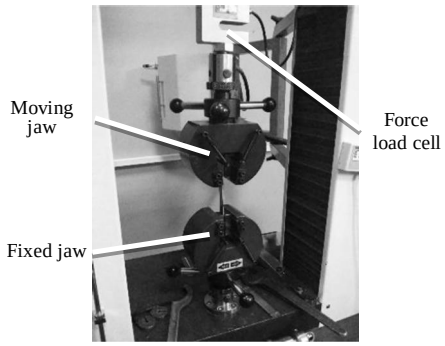

Fig. 4 Extracting joint strength of hybrid via uniaxial test

شکل 4 اندازه گیری استحکام کششی هیبرید با تست تک محوره

و هندسه کلی آن طبق استاندارد[1] [11] به این شرح است که یک سر لایه فولادی، طرف دیگر لایه پلیمری و در میانه اتصالی به طول 40 میلی‌متر دارند. در این اتصال دو الگو روی سطح فولاد ضد زنگ پوشش داده شده است و در هر دو الگو، طول لیزر شده برابر و مقدار آن 60 میلی‌متر می‌باشد. الگوی اول که" موازی" نام دارد از 3 عدد خط هر یک به طول 30 میلیمتر، هم‌راستا با جهت قطعه درست شده است. الگوی دوم که "عمودی" نام دارد، از 4 عدد خط لیزر شده به طول 15 میلی‌متر، عمود بر راستای قطعه هیبرید ساخته شده است. همچنین "شکل 7" نحوه قرارگیری فلز در قالب برای این قطعات را نشان می‌دهد.

پلیمر مورد استفاده سیکلو اولفین کوپلیمر[2] از محصولات شرکت تپاس[3] می‌باشد. رده مورد استفاده در این پژوهش شماره 6015 بوده و مشخصات ترمومکانیکی و رئولوژیکی این رده در جدول 4 نشان داده شده است.

سیکلوالفین از خانواده الفین‌ها و یک ماده کاملاً آمورف است. به دلیل استحکام مناسب سیکلو الفین کوپلیمر و مقاومت بالای آن در برابر ترکیبات شیمیایی، کامپوزیت فلزی-پلیمری حاصل، برای ساخت قطعات باربر در سازه‌های صنعتی از جمله خودرو و همچنین در ساخت تجهیزات پزشکی کاربرد دارد.

روش اجرای آزمایش براساس استاندارد[4] [13] می‌باشد و با استفاده از

جدول 4 مشخصات ترمومکانیکی و رئولوژیکی سیکلو الفین کوپلیمر [12]

Table 4 cyclic olefin copolymer thermo mechanical and rheological properties [12]

کمیت	اندازه
دمای مذاب	260 − 310 ℃
حداکثر تنش برشی	0.3 MPa
حداکثر نرخ برش	$40000\frac{1}{s}$
دمای خروج از قالب	141 C
MFI	$\frac{4.08\ g}{10\ min}$
دمای شیشه‌ای	150 ℃
چگالی حالت جامد	$1.02\frac{g}{cm^3}$
مدول الاستیک	3000 MPa
ضریب پواسون	0.405
مدول برشی	990 MPa
ضریب انبساط حرارتی	6×10^{-5} 1/℃

[1] ASTM D903
[2] Cyclic olefin copolymer
[3] TOPAS
[4] ASTM D638

دستگاه تست کشش انجام می‌شود. در این آزمایش دو گیره از بالا و پایین، نمونه را گرفته و با سرعتی ثابت و برابر 5 میلی‌متر بر دقیقه می‌کشند. میزان جابجایی، با اندازه‌گیری جابجایی فک‌ها و میزان نیروی اعمالی، با استفاده از لودسل[5] با ظرفیت 5 تن که در فک بالایی تعبیه شده است، اندازه‌گیری شده و در نهایت نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی به‌دست می‌آید.

مدول خمشی، جایگزینی برای بیان سفتی الاستیک[6] موادی است که رفتار کششی و فشاری متفاوتی از خود به نمایش می‌گذارند. برای اندازه گیری مدول خمشی در مواد پلاستیکی سخت و نیمه‌سخت، مطابق با آزمایش استاندارد[7] [14] عمل شده است. در این آزمایش، از نمونه‌هایی با سطح مقطع مستطیلی به‌عنوان تیر استفاده می‌شود. نمونه‌ها روی دو تکیه‌گاه با فاصله مشخص قرار داده می‌شوند. سپس به‌کمک یک دماغه از بالا و در وسط این دو تکیه‌گاه، نیرو با سرعت خطی مشخصی به وسط تیر وارد شده و خیز تیر اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری هم زمان خیز تیر و نیروی وارد بر آن، می‌توان مدول خمشی کامپوزیت را در ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش، طبق فرمول (1) تعیین کرد. نمونه‌های اندازه‌گیری مدول خمشی نیز در دو الگوی موازی و عمودی، به ترتیب در "شکل‌های 8 و 9 " نشان داده شده است.

$$E = \frac{PL^3}{48\,v\,I} \qquad (1)$$

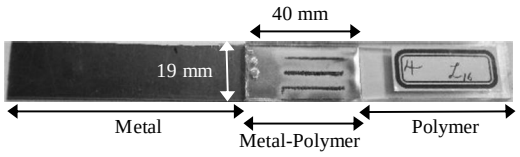

Fig.5 tension test specimen with parallel pattern

شکل 5 نمونه تست کشش با الگوی موازی

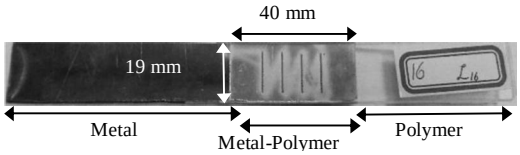

Fig.6 tension test specimen with traverse pattern

شکل 6 نمونه تست کشش با الگوی عمودی

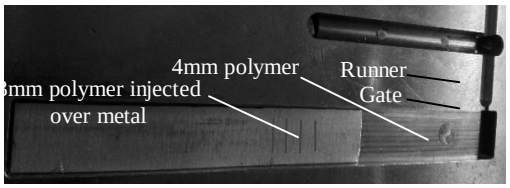

Fig.7 metal position in cavity for tension test specimens

شکل 7 محل قرار گیری فلز در حفره قالب برای قطعات تست کشش

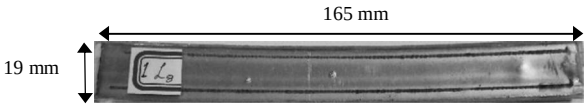

Fig.8 three point bending specimen with parallel pattern

شکل 8 نمونه تست خمش سه نقطه‌ای با الگوی موازی

[5] Load cell model ISO 7500
[3] Elastic stiffness
[7] ASTM D5934

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

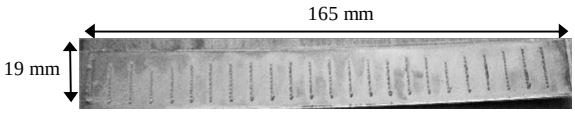

Fig.9 three point bending specimen with traverse pattern

شکل 9 نمونه تست خمش سه نقطه‌ای با الگوی عمودی

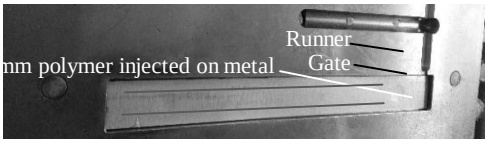

Fig.10 metal position in cavity for flexure test specimens

شکل 10 محل قرار گیری فلز در حفره قالب برای قطعات تست خمش

در همه نمونه‌های نشان داده شده لایه پایینی، فولاد ضد زنگ با ضخامت یکسان 1 میلی‌متر است که به وسیله دستگاه[1] از ورق فولادی و در جهت نورد، بریده شده است. ورق مکانیکی به روش نورد سرد ساخته شده و مشخصات مکانیکی آن در جدول 5 درج شده است.

بخش بالایی نمونه پلیمر است که روی سطح فلز به وسیله دستگاه تزریق پلاستیک تزریق می‌شود. همچنین "شکل 10" نحوه قرارگیری فلز در قالب برای این قطعات را نشان می‌دهد.

3- طراحی و نتایج آزمایش

برمبنای مطالعات و تست‌های انجام شده عامل‌های دمای قالب، فشار تراکم، ضخامت پلیمر و الگوی پوشش بیشترین تأثیر را روی استحکام اتصال و مدول خمشی هیبرید دارند. آزمایش‌های اندازه‌گیری استحکام اتصال و مدول خمشی هیبرید با در نظر گرفتن سطح‌های زیر برای عوامل نام برده اجرا شده است.

- ضخامت پلیمر در دو سطح، شامل ضخامت‌های 2 و 3 میلی‌متر (ضخامت فلز 1 میلی‌متر برای تمامی آزمایش‌ها)
- الگوی پوشش‌دهی سطح، در دو سطحی شامل الگوهای موازی و عمودی
- دمای قالب در چهار سطح، شامل دماهای 35، 50، 65 و 80 درجه سانتی گراد
- فشار تراکم در دو سطح، شامل فشارهای 7 و 11 مگاپاسکال

عوامل انتخاب شده در این آزمایش، به گونه‌ای هستند که تعامل بین آن‌ها اهمیت چندانی نداشته و تنها تأثیر مستقیم هر پارامتر مهم می‌باشد. بنابراین به منظور اجرای بهینه‌تر آزمایش‌ها، مناسب‌تر است که طراحی آزمایش‌ها براساس آرایه متعامد 16 تایی[2] تاگوچی طراحی و اجرا گردد. لازم به توضیح است که استحکام اتصال بین این دو جنس در حالتی که هیچ پوششی روی سطح فلز ایجاد نشده، صفر است چرا که اصولاً چسبندگی ناچیزی بین اولفین‌ها و فلز می‌باشد.

جدول 5 مشخصات مکانیکی لایه فولاد ضد زنگ

Table 5 properties of stainless steel

کمیت	اندازه
جنس	فولاد ضد زنگ آستنتی
حد استحکام تسلیم	310 (MPa)
مدول الاستیسیته	210 (GPa)
ضریب پواسون	0.3

[1] Wirecut
[2] L16

زمانی از روش تاگوچی استفاده می‌شود که می‌خواهیم تاثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌ای از محصول خروجی را با کمترین تعداد آزمایش ممکن مورد بررسی قرار دهیم. این روش بخصوص برای مواقعی که پارامترهای مختلف با یکدیگر تعاملی ندارند بسیار سودمند و دقیق است. در این روش براساس تعداد پارامتر و تعداد سطحی که هرکدام از آن‌ها دارد، یک آرایه معرفی می‌شود که هر ستون نماینده یکی از پارامترها و اعداد هرستون نماینده یک سطح از آن پارامتر می‌باشد. همچنین تعداد سطرها نشان دهنده تعداد آزمایش‌های مورد نیاز است. اعداد هر سطون به گونه‌ای انتخاب می‌شود که با ستون‌های دیگر متعامد باشد. با انجام آزمایش‌ها به ترتیب داده شده در هر آرایه و تحلیل آن‌ها، نه تنها می‌توان تاثیر مستقیم هر پارامتر را روی محصول خروجی بررسی کرد و حالت بهینه آن را پیدا کرد، بلکه می‌توان به اولویت تاثیر پارامترها در محصول نهایی نیزپی برد.

مهم‌ترین اولویت در تحلیل نتایج آزمایش، بررسی میزان تأثیر هر عامل بر حد نهایی استحکام کششی اتصال است. مطلوب برای اتصال به کار رفته در قطعه هیبریدی آن است که بالاترین میزان استحکام را داشته باشد. بنابراین نتایج تحلیل بهینه‌سازی برای استحکام اتصال، تحت عنوان هرچه بیشتر، بهتر انجام شده است. منظور از بهینه‌سازی به روش تاگوچی استفاده از تحلیل خروجی نسبت به اغتشاش[3] است که شرایطی است که در آن حساسیت عملکرد و یا خروجی نسبت به اغتشاش‌ها کمترین مقدار باشد. نتیجه بهینه‌سازی و میزان تأثیر هر عامل بر میزان استحکام اتصال در "اشکال 11 تا 14" نشان داده شده است.

در نمودار "اشکال 11 تا 14" محور افقی نشان‌دهنده سطوح مختلف

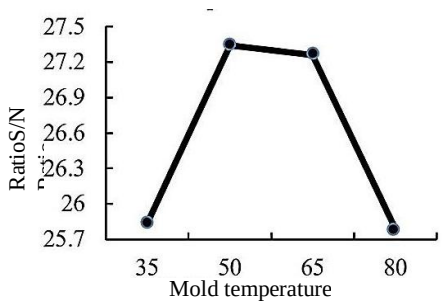

Fig.11 Mold temperature signal to noise ratio for joint strength

شکل 11 نتایج آنالیز سیگنال به نویز دمای قالب برای استحکام اتصال

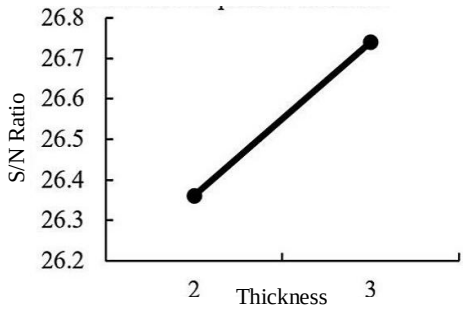

Fig.12 Thickness signal to noise ratio for joint strength

شکل 12 نتایج آنالیز سیگنال به نویز ضخامت برای استحکام اتصال

[3] Signal to noise ratio

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

پارامترها و محور عمودی نشان‌دهنده خورجی موردنظر می‌باشد و بیشتر بودن آن نشان‌دهنده تاثیر و نتیجه بهتر آن سطح از پارامتر روی خروجی اندازه‌گیری شده می‌باشد. استفاده از فشار تراکم کمتر و خط لیزر موازی برای افزایش استحکام مناسب‌تر است. همچنین استفاده از ضخامت بیشتر و تنظیم دمای قالب در حدود 50 درجه، موجب استحکام بالاتر اتصال می‌شود. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، تأثیر دما صعودی یا نزولی نمی‌باشد بلکه دارای یک ماکزیمم است که رعایت آن برای تولید هیبرید توصیه می‌شود. در توضیح این پدیده دو اثر افزایش دما را معرفی می‌کنیم که یکی در جهت افزایش استحکام اتصال و دیگری در جهت کاهش آن اقدام می‌کند. در توضیح عملکرد اثر موافق باید گفت، هر چه دمای سیال تنظیم کننده دما و به دنبال آن دمای سطح قالب افزایش یابد، میزان تنش پسماند و انقباض حاصل از آن در قطعه پلیمری افزایش می‌یابد. این موضوع موجب می‌شود تا پلیمر برجستگی‌های سطح فلز را با فشار بیشتری در بر گیرد و در نتیجه اتصال رفتار استحکامی بالاتری را از خود نشان می‌دهد.

اما در تفسیر اثر مخالف گفته می‌شود که جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمر در لایه منجمد در جهت جریان است، ولی جهت‌گیری زنجیره‌ها در میانه سطح مقطع پلیمر در حین فاز تراکم تغییر کرده و عمود بر جهت جریان می‌شود. با افزایش دمای سطح قالب، ضخامت لایه منجمد کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت لایه منجمد منجر به گرادیان بالاتر تغییر جهت زنجیره‌های پلیمر و در پی آن، تغییر در توزیع تنش و کرنش شده که با توجه به ماهیت ترد ماده می‌تواند شکست زود هنگام را نتیجه دهد. همان‌طور که ملاحظه شد، دو اثر ذکر شده در جهت‌های مخالف عمل می‌کند و لذا باعث می‌شود که نمودار دما دارای یک ماکزیمم نسبی باشد.

افزایش فشار تراکم منجر به کاهش تنش پسماند و در نتیجه کاهش انقباض نهایی قطعه می‌شود. بنابراین هرچه فشار تراکم کمتر باشد، انقباض بیشتر خواهد بود. لذا پلیمر برجستگی‌های سطح را با فشار بیشتری چنگ می‌زند و در نتیجه استحکام اتصال بالاتر می‌رود. هرچه فشار تراکم کمتر باشد، اعوجاج قطعه نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین باید در نظر داشت که با کاهش فشار تراکم، امکان ایجاد شکل نهایی نامطلوب برای قطعه و یا حتی ایجاد تخلخل در پلیمر وجود دارد.

بخش پلیمری سطح مقطع نمونه‌های تست کشش با الگوی عمودی کمتر است و لذا استحکام کششی در محل اتصال کاهش می‌یابد. این موضوع در کنار رفتار ترد پلیمر و ایجاد زمینه برای رشد و توسعه میکرو ترک‌ها دو چندان می‌شود. همچنین الگوی ضخامت به فرم موازی، همراستا با جریان است. لذا در الگوی جریان سیال، جهت‌گیری زنجیره مولکولی و کسر لایه منجمد، تغییرات ناگهانی ایجاد نکرده و توزیع تنش یکنواخت‌تر را فراهم می‌آورد.

تأثیر افزایش ضخامت را می‌توان جلوگیری از تمرکز تنش در محل اتصال و جلوگیری از ایجاد گرادیان‌های بالای جهت‌گیری مولکولی در سطوح تماس دانست که استحکام بالاتر اتصال را به ارمغان می‌آورد. با مشاهده دقیق نمودار متوجه می‌شویم که مهم‌ترین عامل تأثیر گذار در استحکام اتصال به ترتیب دمای قالب، فشار تراکم، ضخامت پلیمر تزریقی و الگوی خط لیزر است. این نتیجه گیری این‌گونه به‌دست می‌آید که هرچه پارامتری دارای اعداد بزرگتری از نسبت خروجی به اغتشاش (محور عمودی) باشد، تاثیر بیشتری در کیفیت محصول نهایی می‌گذارد.

نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های پلیمر تنها، فولاد ضد زنگ تنها (با

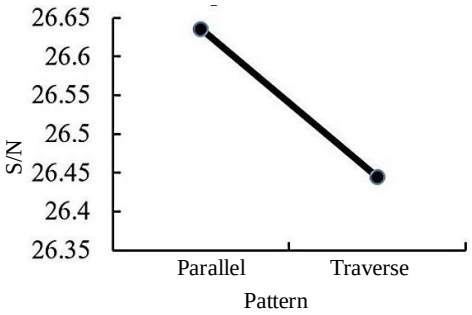

Fig.13 Pattern signal to noise ratio for joint strength

شکل 13 نتایج آنالیز سیگنال به نویز الگو برای استحکام اتصال

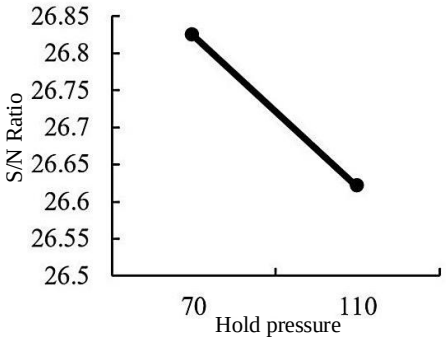

Fig.14 Hold pressure signal to noise ratio for joint strength

شکل 14 نتایج آنالیز سیگنال به نویز فشار هولد برای استحکام اتصال

ضخامت 1 میلی‌متر) و هیبرید پلیمر–لایه ضدزنگ (ضخامت لایه فولاد ضد زنگ و پلیمر به ترتیب 1 و 3 میلی‌متر در طول 4 سانتی‌متر) در "شکل 15" نشان داده شده است. این آزمایش مطابق با استاندارد اجرا شده است. با مقایسه نمودارها، متوجه افزایش قابل توجه استحکام قطعه پلیمری به وسیله لایه فولادی می‌شویم.

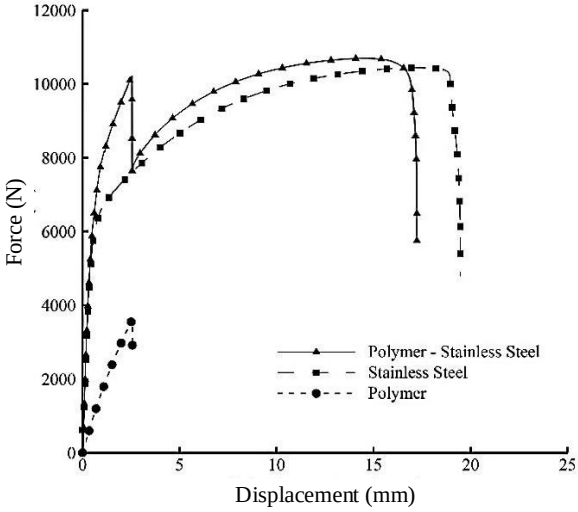

Fig.15 Comparison of neat polymer and metal with composite

شکل 15 مقایسه پلیمر و فلز خالص با کامپوزیت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

وضعیت نمودارهای نیرو-جابه‌جایی برای پلیمر و فلز به ترتیب با دایره و مربع نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، جمع نمودار نیرو- جابه‌جایی پلیمر با فلز، با نمودار نیرو- جابه‌جایی هیبرید با ضخامت 4 میلی‌متر (ضخامت پلیمر و لایه فولادی به ترتیب 3 و 1 میلی‌متر) در انطباقی نزدیک است. مطابق نمودارهای نشان داده شده در شکل، وقتی قطعه هیبرید کشیده می‌شود، هر یک از لایه‌های کامپوزیت به نسبت سختی خود بخشی از نیرو را می‌گیرد تا این‌که لایه فولادی تسلیم شود. توجه کنید که تا قبل از شکست پلیمر فرض یکسان بودن کرنش دو لایه معتبر است. در این مرحله سفتی فلز کاهش چشمگیری می‌یابد تا تقسیم نیرو بین دو جنس، به هم نزدیک‌تر شود و در ادامه با افزایش نیرو، پلیمر به نقطه شکست برسد. بعد از شکست پلیمر، نمودار نیرو-جابه‌جایی هیبرید در یک نقطه بر نمودار نیرو-جابه‌جایی فلز منطبق می‌شود. اما این بار، فلز حرکت به سمت شکست را با استحکامی بالاتر و البته کرنش نهایی کمتر دنبال می‌کند.

از آن‌جا که نیروی اعمالی بر قطعات به صورت تنش برشی در ناحیه اتصال پلیمر و فلز نمود پیدا می‌کند، طبق حداکثر نیروی نهایی به دست آمده از شکل 12(10200N) و با در نظر گرفتن سطح مقطع موثر تحت تأثیر برش ($255mm^2$)، استحکام اتصال طبق فرمول (2) حدود 40MPa محاسبه می‌شود.

$$\tau = P/A \qquad (2)$$

مطلوب برای اتصال به کار رفته در قطعات هیبریدی "شکل های 8 و 9" که تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار می‌گیرند، این است که بالاترین میزان مدول خمشی را داشته باشد. زیرا یک پروفیل یا قطعه با مدول خمشی بالا به دلیل کرنش یا جابه‌جایی کمتر در بار گذاری می‌تواند در طیف وسیعی از سازه‌های صنعتی استفاده شود. نتایج تحلیل خروجی به اغتشاش برای مدول خمشی هیبرید تحت عنوان هرچه بیشتر، بهتر در نمودار "اشکال 16 تا 19" نشان داده شده است.

براساس تئوری کامپوزیت و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده، با افزایش ضخامت پلیمر، مدول خمشی هیبرید مورد نظر باید کاهش داشته باشد. این موضوع به روشنی در نمودار "اشکال 16 تا 19" لحاظ شده است. در تفسیر علت این پدیده باید گفت که هر چه ضخامت پلیمر کم شود، مدول خمشی کامپوزیت به مدول خمشی لایه فولادی که برابر 210 گیگاپاسکال است، نزدیک می‌شود و لذا مدول خمشی افزایش می‌یابد.

همچون سری آزمایش‌های تست کشش، بهترین دما برای اجرای آزمایش، حدود 50 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مطابق با توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین محل اثر دما، تنش‌های پسماند و کسر لایه منجمد می‌باشد.

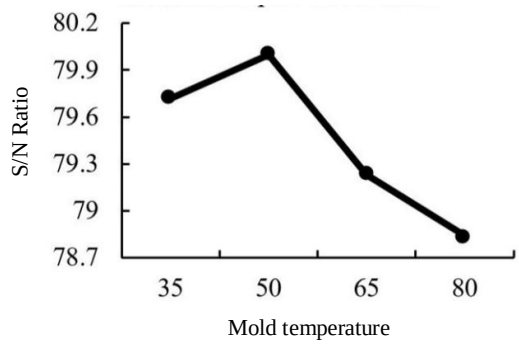

Fig.16 Mold temperature Signal to noise ratio for hybrid bending modulus

شکل 16 نتایج آنالیز سیگنال به نویز دمای قالب برای مدول خمشی هیبرید

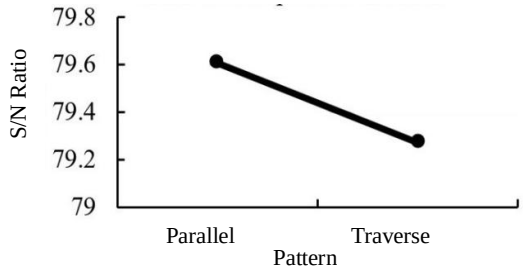

Fig.17 Pattern Signal to noise ratio for hybrid bending modulus

شکل 17 نتایج آنالیز سیگنال به نویز الگو برای مدول خمشی هیبرید

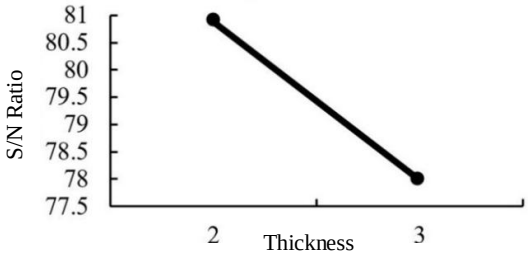

Fig.18 Signal to noise ratio for hybrid bending modulus

شکل 18 نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای مدول خمشی هیبرید

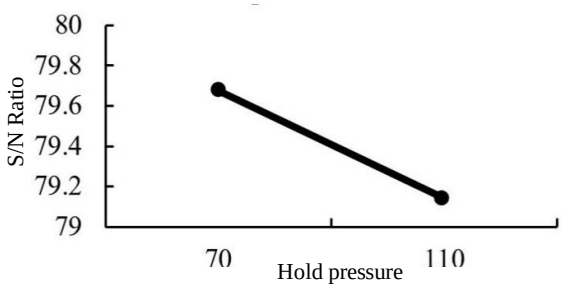

Fig.19 Signal to noise ratio for hybrid bending modulus

شکل 19 نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای مدول خمشی هیبرید

افزایش تنش‌های پسماند ناشی از بالا بردن دمای سطح قالب، اجرای تست خمش سه نقطه‌ای در جهت انحنای قطعه و همچنین وسط نبودن مکان تار خنثی در لایه فولادی، از عوامل مؤثرکاهش اندک مدول خمشی با افزایش دما می‌باشد.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد با اعمال فشار تراکم بالاتر، مدول خمشی کاهش می‌یابد. همچنین در باب فشار تراکم می‌توان گفت که تنش انقباضی بیشتری که در نمونه با فشار تراکم کمتر ایجاد می‌شود، باعث می‌شود تا ترک‌ها را به هنگام اجرای تست خمش سه نقطه‌ای بسته نگه دارد و کامپوزیت، مدول خمشی بالاتری از خود به نمایش بگذارد.

لایه فولادی تنها با الگوی موازی، مدول خمشی بالاتری در مقایسه با لایه فولادی با الگوی پوشش‌دهی عمودی دارد. همچنین ایجاد ترک‌ها در جهت عمود بر قطعه در نمونه با الگوی پوشش‌دهی عمودی بیشتر است و لذا مدول خمشی نمونه با الگوی پوشش عمودی کمتر خواهد بود.

4- نتیجه گیری

1- استحکام اتصال به دست آمده با این روش ساخت قطعات هیبریدی در حدود 40 مگاپاسکال است که افزایش قابل توجهی نسبت به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]

استحکام فلز و پلیمر خالص، به خصوص در جابه‌جایی‌های کم، می‌باشد.

2- طرح هندسی الگوهای برجسته باید مطابق نوع بارگذاری و با ارتفاع کمتر از ضخامت پلیمر ایجاد شوند تا پلیمر با توجه به ضریب انبساط حرارتی خطی بالاتر خود، برجستگی‌ها را در بر گرفته و اتصال با استحکام بالا را فراهم آورد. بارگذاری در جهت عمود بر الگوهای ایجاد شده، علاوه بر افزایش میزان میکروترک‌ها، سطح بارگذاری مؤثر کمتری را نیز ایجاد می‌کند که این عوامل موجب کاهش استحکام محصول نهایی می‌شود.

3- علاوه بر انقباض حرارتی پلیمر، تنش‌های پسماند کششی به جا مانده از فرایند تولید نیز دیگر عامل جمع شوندگی پلیمر می‌باشد. از طرف دیگر هر عاملی که انقباض بیشتر پلیمر را نتیجه دهد، استحکام و مدول خمشی بالاتری برای هیبرید مهیا می‌کند.[16,15]

4- دمای قالب بر تنش‌های پسماند و کسر لایه منجمد تأثیر گذار است. به طوری که با افزایش دمای قالب، تنش‌های پسماند افزایش و در نتیجه استحکام اتصال افزایش می‌یابد. اما در مقابل با افزایش دما، کسر لایه منجمد کاهش و در نتیجه گرادیان تغییر جهت زنجیره‌های مولکولی و توزیع تنش در حوالی الگوهای برجسته افزایش می‌یابد که توزیع نامناسب و تمرکز تنش را به همراه خواهد داشت. این تاثیرات متقابل وجود یک دمای بهینه برای فرایند را توجیه می‌کند.

5- هر چه فشار تراکم در فرایند تولید کمتر باشد میزان بالاتری از تنش در قطعه به جا خواهد ماند و در نتیجه استحکام اتصال بیشتر است. بنابراین کاهش فشار تراکم استحکام بالاتر اتصال را نتیجه می‌دهد. اما در مقابل هر چه میزان تنش‌های پسماند در بخش پلیمری هیبرید بیشتر باشد، هیبرید اعوجاج بیشتری را به خود می‌گیرد.

6- ضخامت بالاتر تزریق، توزیع مناسب‌تری از تنش را در نواحی اطراف برجستگی‌ها ایجاد می‌کند و شکل‌گیری توزیع تنش را کاهش می‌دهد.

الگوی موازی برجستگی‌ها به گونه‌ای است که سطح مقطع مفید اتصال را افزایش می‌دهد و الگوی توزیع تنش مناسب‌تری را فراهم می‌آورد.

7- سطح زیر نمودار تنش-کرنش در هیبرید نسبت به فلز خالص اندکی افزایش یافته و در نتیجه چقرمگی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین افزایش خواص مکانیکی فلز به کار برده شده در هیبرید نسبت به فلز خالص نیز مشاهده می‌شود. این بدان معنی است که در کاربردهایی مانند جلوبندی خودرو این هیبرید علاوه بر مقاومت بالاتر در مقابل فشار، مقاومت ضربه بیشتری نیز دارد.

5- فهرست علایم

τ	تنش برشی (Pa)
A	سطح مقطع (m^2)
v	خیز تیر (m)
L	طول (m)
E	مدول خمشی (Pa)
I	ممان اینرسی سطح (m^4)
P	نیرو (N)

6- مراجع

[1] M. Grujicic, V. Sellappan, M. A. Omar, N. Seyr, A. Obieglo, M. Erdmann, J. Holzleitner, An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, No. 1, pp. 363-373, 2008.

[2] C. Ochoa-Putman, U. K. Vaidya, Mechanisms of interfacial adhesion in metal–polymer composites–Effect of chemical treatment, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 8, pp. 906-915, 2011.

[3] W. S. Kim, I. H. Yun, J. J. Lee, H. T. Jung, Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer–metal interfaces using micro-patterned surface topography, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, No. 6, pp. 408-417, 2010.

[4] M. Grujicic, V. Sellappan, L. Mears, X. Xuan, N. Seyr, M. Erdmann, J. Holzleitner, Selection of the spraying technologies for over-coating of metal-stampings with thermo-plastics for use in direct-adhesion polymer metal hybrid load-bearing components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, No. 1, pp. 300-312, 2008

[5] M. Grujicic, V. Sellappan, B. Pandurangan, G. Li, A. Vahidi, N. Seyr, M. Erdmann, J. Holzleitner, Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp. 19-36, 2008.

[6] S. Ucsnik, M. Scheerer, S. Zaremba, D. H. Pahr, Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 3, pp. 369-374, 2010.

[7] G. Lucchetta, F. Marinello, P. F. Bariani, Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 559-562, 2011.

[8] M. Grujicic, V. Sellappan, G. Arakere, N. Seyr, M. Erdmann, Computational feasibility analysis of direct-adhesion polymer-to-metal hybrid technology for load-bearing body-in-white structural components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, No. 1, pp. 282-298, 2008.

[9] A. Roesner, S. Scheik, A. Olowinsky, A. Gillner, U. Reisgen, M. Schleser, Laser assisted joining of plastic metal hybrids, *Physics Procedia*, Vol. 12, No. 01, pp. 370-377, 2011.

[10] J. P. Bergmann, M. Stambke, Potential of laser-manufactured polymer-metal hybrid joints, *Physics Procedia*, Vol. 39, No. 01, pp. 84-91, 2012.

[11] ASTM D903, Standard test method for peel or stripping strengh of adhesive bonds, *ASTM International*, Vol. 15, No. 06, 2004.

[12] *Thermo mechanical and reological properties of cyclic olefin copolymer*, Accessed on 30 november 2014; http://www.topas.com/tech-center/datasheets

[13] ASTM D638, Standard test method for tensile properties of plastics, *ASTM International*, Vol. 08, No. 01, 2001.

[14] ASTM D5934, Standard test method for determination of modulus of elasticity for rigid and semi-rigid plastic specimens by controlled rate of loading using three-point bending, *ASTM International*, Vol. 08, No. 03, 2002.

[15] Tim A. Osswald, *Polymer Processing Fundamentals*, Second Edition, pp. 20-80, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998.

[16] Douglas M. Bryce, *Plastic Injection Molding: Manufacturing Startup and Management*, Third Edition, pp. 50-100, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1999.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.9.14.3]