



بررسی تجربی قابلیت اتصال ورق‌های کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم توسط فرایند کلینچینگ

رسول ندرلی¹، علی فضلی^{2*}، مهدی سلطان پور³، پرویز اسدی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، صندوق پستی 3414896818، a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 فروردین 1400

داوری اولیه: 18 اردیبهشت 1400

پذیرش: 25 خرداد 1400

کلیدواژه‌گان:

فرایند کلینچینگ

ورق سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/

آلومینیوم

اثر هندسه ابزار

اتصال توسط شکل‌دهی

ورق‌های کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم از جمله مواد جدیدی هستند که در جهت کاهش وزن و مصرف سوخت وسایل نقلیه در حال توسعه می‌باشند. استفاده از روش‌های رایج برای اتصال این مواد به سایر بخش‌های سازه، بسیار پرچالش است. در این پژوهش، قابلیت اتصال ورق سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم به یک ورق تک لایه آلومینیوم به ضخامت 1 میلی‌متر توسط فرایند کلینچینگ، که یک فرایند اتصال با شکل‌دهی است، بررسی شده است. ورق‌های سه‌لایه از آلومینیوم 5754 و پلی‌اتیلن با ترکیب ضخامتی 0/5 - 0/6 - 0/5 میلی‌متر، تحت شرایط آزمایشگاهی ساخته شدند. اثر عمق نفوذ پین و زاویه مخروطی پین بر خواص اتصال بررسی شد. با بررسی مقطع اتصال، پارامترهای هندسی آن شامل قفل مکانیکی و ضخامت گلوبی در شرایط اتصال مختلف مقایسه شدند. همچنین استحکام اتصال توسط آزمون برشی و آزمون جدایش بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش عمق نفوذ پین تا یک مقدار بهینه باعث افزایش قفل مکانیکی و استحکام اتصال می‌شود. همچنین استحکام اتصال کلینچ با پین استوانه‌ای بالاتر از استحکام اتصال با پین مخروطی 3 درجه در عمق نفوذ یکسان است. در تمامی شرایط آزمون، شرایط مناسب‌تر اتصال زمانی حاصل شد که مد شکست، ترکیبی از مد خروج از کف و پارگی گلوبی باشد.

Experimental investigation of the joinability of three-layer aluminum/ polymer/ aluminum composite sheets by the clinching process

Rasoul Naderli, Ali Fazli*, Mahdi Soltanpour, Parviz Asadi

Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 3414896818 Qazvin, Iran, a.fazli@eng.ikiu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 18 April 2021
First Decision: 8 May 2021
Accepted: 15 June 2021

Keywords:

Clinching Process
Three-Layer Aluminum/ Polymer/
Aluminum Sheet
Tool Geometry Effect
Joining by Forming

Abstract

Three-layer aluminum/polymer/aluminum laminate sheets are one of the new materials used to decrease the weight and air pollution of vehicles. Using the conventional methods for joining these sheets have lots of challenges. In this paper, the jointability of the three-layer aluminum/polymer/aluminum to a single-layer 1-mm-thick aluminum sheet is investigated, using the clinching process, which is a joining by forming process. The three-layer aluminum/polymer/aluminum sheets are prepared under laboratory conditions using the aluminum 5754 and in 0.5/0.6/0.5 thickness arrangement. The effect of the pin penetration depth and pin conical angle on the joint properties is investigated. The joint cross-section is considered to compare the neck thickness and interlock in different joining conditions. Also, the joints' strength is investigated using shear and peel tests. The results indicate that increasing the pin penetration depth to an optimum value, improves the interlock and joint strength. Additionally, the strength of the joint created by the straight pin is higher than that of the 3deg conical pin, in the same pin penetration depth. In all test conditions, the best joining conditions happened when the failure mode was a combination of the bottom separation and neck fracture.

1- مقدمه

مواد مختلف مانند فولاد، آلومینیوم، منیزیم و مواد کامپوزیتی برای دستیابی به استحکام بالا در قسمت سرنشین و در عین حال جذب انرژی‌های زیاد در منطقه تخریب‌پذیر خودرو استفاده می‌شود تا در صورت تصادف، ایمنی سرنشین رعایت شود. یکی دیگر از دلایل مهم برای استفاده از مواد مختلف، کاهش وزن

یکی از روش‌های دستیابی به خواص مکانیکی متغیر در نواحی مختلف از یک محصول، استفاده از مواد با خواص متنوع است که در صنایع خودروسازی، هوافضا، دریایی و نظامی بسیار رایج است [1]. به‌عنوان مثال، در یک خودرو با سازه مدرن از ترکیبی از

Please cite this article using:

R. Naderli, A. Fazli, M. Soltanpour, P. Asadi, Experimental investigation of the joinability of three-layer aluminum/ polymer/ aluminum composite sheets by the clinching process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 27- 38, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جوشکاری ذوبی، برای اتصال آنها امکان پذیر نیست. زیرا وقتی فولاد به نقطه ذوب خود می‌رسد، آلومینیوم کاملاً تخریب شده است. اتصالات مکانیکی نیز به علت نیاز به سوراخکاری و افزایش تمرکز تنش در اطراف ناحیه اتصال خواص مکانیکی ضعیف‌تری ایجاد خواهند کرد. زیرا تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌های اتصالات، باعث کاهش استحکام و در نتیجه ایجاد عیوب ناشی از خوردگی می‌شود. همچنین افزایش وزن، نیاز به انجام عملیات خاص ماشینکاری مانند سوراخکاری، ایجاد رزوه و ... از دیگر محدودیت‌های اتصالات مکانیکی هستند. اتصال با چسب نیز زمان‌بر است و در برخی محیط‌های خورنده، و زمانی که سازه در معرض ترکیبات شیمیایی می‌باشد، غیرقابل کاربرد هستند.

متداول‌ترین روش‌هایی که در حال حاضر برای اتصال ورق‌های سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز به سایر قسمت‌های سازه، استفاده می‌شود شامل استفاده از اتصالات مکانیکی، استفاده از چسب و همچنین فرایند تاکردن⁵ هستند که در شکل 1 نحوه انجام آنها نشان داده شده است.

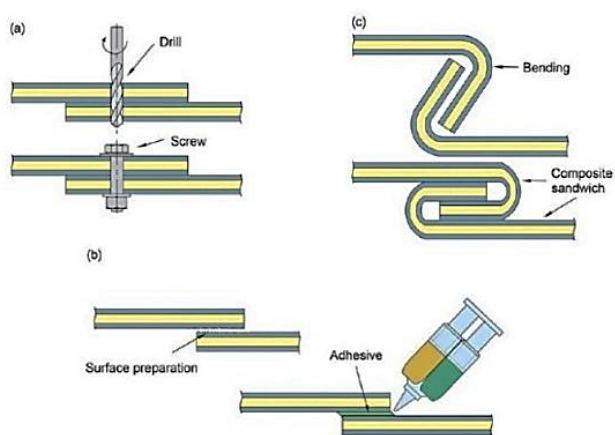


Fig. 1 Common methods used for joining of three-layer metal/polymer/metal sheets a) Mechanical fasteners b) Adhesive bonding c) hemming [9]

شکل 1 روش‌های متداول اتصال ورق‌های سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز (a) اتصالات مکانیکی (b) اتصالات چسبی (c) تاکردن [9]

باستیا و همکاران در سال 2020 با استفاده از جایگذاری یک حلقه استوانه‌ای، دو ورق سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز را به یکدیگر متصل کردند. در این روش مطابق شکل 2، ابتدا با ابزار، محل جایگذاری حلقه افزودنی در هر دو ورق سه‌لایه ایجاد می‌شود. پس از جایگذاری این حلقه در شیار ایجاد شده دو ورق، با اعمال فشار محوری، حلقه استوانه‌ای درون هسته پلیمری به صورت شعاعی تغییرشکل می‌یابد و دو جزء اتصال را به یکدیگر متصل می‌کند [9].

وسایل نقلیه و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می‌باشد [2]. مواد ترکیبی از جمله مواد جدیدی هستند که در این صنعت مورد توجه قرار گرفته است. این مواد از 2 یا چند ماده مختلف تشکیل می‌شوند. در واقع هدف اصلی از تولید مواد ترکیبی، تجمع مزیت‌ها و کاهش محدودیت‌های چند ماده مختلف در یک ماده واحد است [3].

مجموعه‌ای از مواد ترکیبی وجود دارند که با اتصال یک درمیان لایه‌های فلزی نازک و همچنین لایه‌های پلیمری حاصل می‌شوند که به آنها کامپوزیت‌های فلز/پلیمر/فلز¹ گفته می‌شود. لایه‌های مختلف این مواد معمولاً با اتصال چسبی به همدیگر متصل می‌شوند. در صورت ایجاد ترک در یک لایه فلزی، رشد ترک با رسیدن به لایه پلیمر بعدی متوقف شده و با سرعت رشد ترک کمتر می‌شود، بنابراین با توجه به این که شکست ناشی از خستگی معمولاً با جوانه زنی و رشد ترک رخ می‌دهد، شکست ناشی از خستگی در این محصولات دیرتر روی می‌دهد. همچنین حضور لایه فلز نسبتاً ضربه‌پذیر و مستحکم در مجاورت لایه پلیمری موجب افزایش ضربه‌پذیری و جذب انرژی توسط این مواد در مقایسه با مواد دیگر می‌شود [3]. این مواد نیز مانند دیگر مواد ترکیبی که خواص مواد تشکیل دهنده خود را دارند، از خواص هر دو لایه فلزی و پلیمری بهره‌مند هستند [4].

به علت مزایای مختلفی همچون نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی بالا و عایق بودن در برابر صوت و ارتعاش، ورق‌های کامپوزیتی فلز/پلیمر/فلز کاربردهای خود را در قسمت‌های مختلف بدنه در صنعت خودرو و یا ... پیدا کرده‌اند [5]. این مواد می‌توانند در کاهش صدا و ارتعاش (N&V)² در وسایل نقلیه مفید واقع شوند. این محصولات در شرکت‌های خودروسازی زیر مجموعه گروه فیات کرایسلر اتومبیلز³ از جمله شرکت خودرو سازی فراری، لامبورگینی، جیپ، آلفارومئو، مازراتی، دوج و ... استفاده شده‌اند [6]. این ورق‌های لمینیتی سه‌لایه معمولاً توسط روش‌های پرس‌داغ و نورد ساخته می‌شوند [7].

اتصال طیف وسیعی از مواد غیر همسان در ساخت سازه‌ها، استفاده از روش‌های متداول اتصال‌دهی همچون جوشکاری ذوبی، چسب و اتصالات مکانیکی⁴ را با مشکلاتی مواجه کرده است [8]. به عنوان مثال به علت اختلاف 800 تا 900 درجه سانتی‌گراد در دمای ذوب فولاد و آلومینیوم، استفاده از روش

¹ Metal/polymer/metal

² Noise and Vibration,

³ Fiat Chrysler Automobiles

⁴ Mechanical fasteners

⁵ Hemming

و با پر کردن حفره ماتریس و ایجاد تغییر شکل پلاستیک موضعی در محل اتصال به یکدیگر متصل می‌شوند.

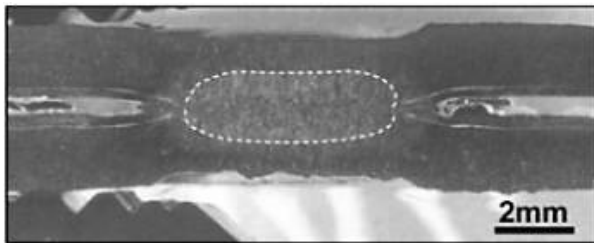


Fig. 3 using point resistance welding (RSW) method to joining three-layer sheet [10]

شکل 3 استفاده از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای متصل کردن ورق سه‌لایه [10]

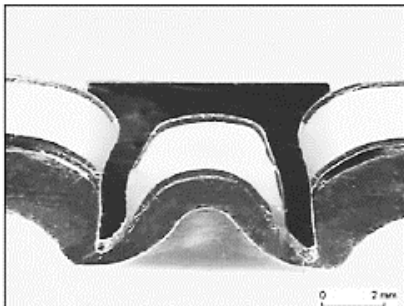


Fig. 4 Using self-pierce riveting to joining three-layer sheet [11]

شکل 4 استفاده از پرچ‌های خود سوراخ کن برای متصل کردن ورق سه‌لایه [11]

مهمترین پارامترهای که بر روی استحکام اتصال فرایند کلینچینگ تاثیرگذار است مقدار شکل‌گیری قفل مکانیکی⁴ و ضخامت گلوبی⁵ هستند که در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

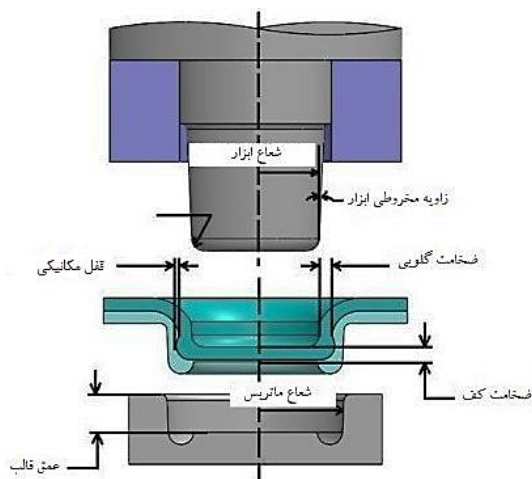


Fig. 5 Parameters of the clinching process [13]

شکل 5 پارامترهای فرایند کلینچینگ [13]

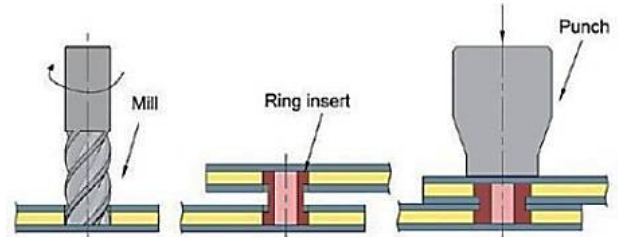


Fig. 2 Using a cylindrical ring to join three-layer metal/polymer/metal sheets [9]

شکل 2 استفاده از یک حلقه استوانه‌ای برای متصل کردن ورق‌های سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز [9]

با توجه به نوع کاربرد و محل قرارگیری ورق سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز، می‌توان از روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW¹) نیز برای اتصال آن به سایر قسمت‌های سازه استفاده کرد. تانکو و همکارانش در سال 2015 ورق سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز را با جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بین دو فلز دیگر متصل کرده‌اند که شماتیکی از این روش در شکل 3 مشاهده می‌شود. در این روش از دو پالس برای متصل کردن اجزاء اتصال استفاده شده است که پالس اول منجر به ذوب و حذف هسته پلیمری در محل تماس و ایجاد تماس فلز به فلز در دو لایه فلزی ورق سه لایه بوده و پالس دوم منجر به کامل شدن فرایند جوشکاری مقاومتی و اتصال ورق‌ها به یکدیگر استفاده شده است [10].

پیکن و همکارانش در سال 2006 ورق‌های سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم را با استفاده از پرچ‌های خود سوراخ کن به ورق آلومینیومی دیگر متصل کردند. سطح مقطع این اتصال در شکل 4 دیده می‌شود. ایشان بیان داشتند که عیوب مشاهده شده در اطراف دم پرچ احتمالاً بر اثر برگشت رو به عقب پرچ ناشی از برگشت فنری هسته پلیمری است [11].

استفاده از تغییر شکل پلاستیک برای اتصال مواد، یک تکنولوژی نسبتاً جدید است که در دهه‌های گذشته توسعه پیدا کرده است. در چنین فرایندهایی، تغییر شکل‌های اعمال شده به یک یا چند جزء اتصال موجب می‌شود که اجزای اتصال به یکدیگر بپیوندند. این روش اتصال به‌علت عدم استفاده از عناصر اتصال مانند پیچ، مهره، پرچ و الکترو جوشکاری، منجر به کاهش وزن و هزینه می‌شود [12].

فرایند کلینچینگ² از جمله فرایندهای اتصال به وسیله شکل‌دهی³ که برای اتصال ورق‌ها، بدون استفاده از هرگونه اجزای اضافی به کار می‌رود. در این روش ورق‌های دخیل در اتصال توسط سنبه به داخل حفره ماتریس تغییر شکل داده شده

¹ Resistance spot welding

² Clinching process

³ Joining by forming

⁴ Interlock
⁵ Wall thickness

صفحه آلومینیوم تخت قرار گرفته و روی آن با فیلم چسب مالئیکه پوشانده شد. سپس گرانول پلی‌اتیلن روی آن ریخته شد تا به صورت مستقیم گرانول‌ها بر روی ورق آلومینیومی ذوب شوند. در ادامه روی گرانول‌ها با یک لایه دیگر فیلم چسب مالئیکه پوشانده شد و در آخرین مرحله لایه‌گذاری، ورق آلومینیومی ضخامت 0/5 میلی‌متر روی لایه‌های قبلی قرار گرفت. پس از کامل شدن مراحل لایه‌گذاری، صفحه‌ی دیگری بر روی لایه‌ها قرار گرفت. لایه‌های ورق سه‌لایه جهت پخت به همراه دو صفحه زیر و روی آنها به داخل پرس داغ با دمای 195 درجه که دو کفه آن از همدیگر باز می‌باشد منتقل شدند. پس از گذشت 15 دقیقه، دو کفه پرس داغ تحت فشار 2 تن بر روی لایه‌ها بسته شد. لازم به ذکر است از فاصله اندازه‌های با ضخامت 1/6 میلی‌متر جهت تنظیم ضخامت ورق سه‌لایه بین دو صفحه‌ی آلومینیومی استفاده شد. بدین ترتیب فشار اعمالی پرس داغ که حدوداً 2 تن می‌باشد باعث خارج شدن تمام پلیمر بین دو ورق 0/5 میلی‌متری نخواهد شد و فقط مقدار اضافی پلیمر تا حصول ضخامت 1/6 میلی‌متری از بین دو پوسته خارج می‌شود. پس از صرف زمان 30 دقیقه، دو کفه پرس داغ باز شده و ورق سه‌لایه پخته شده به همراه دو صفحه‌ی زیر و روی آنها به داخل پرس سرد با فشار 2 تا 3 تن منتقل شدند تا دمای ورق سه‌لایه تحت فشار به دمای محیط کاهش یابد به این ترتیب فرایند ساخت ورق سه‌لایه تکمیل شد. برای انجام آزمایشات مطابق با شکل 8 نمونه‌های تست‌های برشی¹ و جدایش² از ورق‌های ساخته شده آماده شدند.

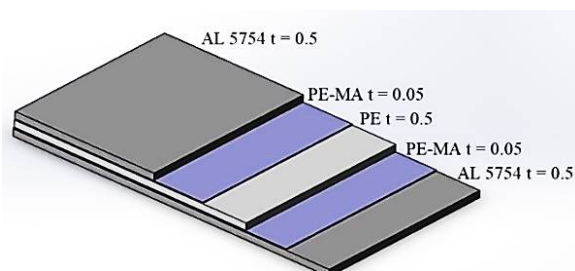


Fig. 6 Schematic of three-layer aluminum / polymer / aluminum composite

شکل 6 شماتیک ورق سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم 5754

Table 1 Chemical composition of 5754 aluminum sheet

%Al	%Si	%Fe	%Mg	%Mn	%Cr	%Cu	%Ti	%Zn	%Res.		
94/2	-97/4	0/4	0/4	0/5	2/6	-3/6	0/3	0/1	0/15	0/2	0/15

¹ shear test

² Peel test

تجهیزات این فرایند نسبتاً ارزان بوده و هیچ‌گونه آماده‌سازی برای سطح ورق نیاز نیست. این ویژگی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در هزینه و زمان تولید شده است [13]. با این وجود محدودیت‌هایی وجود دارد که ممکن است مانع استفاده از اتصال کلینچینگ در تعدادی از کاربردها شود. یکی از معایب اصلی فرایند کلینچینگ آن است که یک برآمدگی در یک طرف اتصال، و یک فرورفتگی در طرف دیگر اتصال به وجود می‌آورد. به همین دلیل استفاده از این روش برای سطوحی که در معرض دید هستند و باید کاملاً صاف و بدون زائده باشند، مثل سطوح خارجی خودرو و سطوح مورد استفاده در کاربردهای کشویی مانند، امکان‌پذیر نیست. همچنین به دلیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید موضعی در محل اتصال، استفاده از این روش بر روی موادی که شکل‌پذیری پایینی دارند، محدودیت دارد و موجب ایجاد ترک بر روی ورق با شکل‌پذیری پایین می‌شود [14]. با توجه به اینکه استفاده از روش‌های رایج اتصال دهی برای اتصال ورق سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز به سایر بخش‌های سازه، بسیار پرچالش است، از این رو در این پژوهش، قابلیت اتصال ورق کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم توسط فرایند کلینچینگ بررسی شده است.

2- مواد و روش تجربی

2-1- ساخت ورق کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم

ورق سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم، تحت شرایط آزمایشگاهی با ترکیب‌بندی ضخامت 0/5 - 0/6 - 0/5 توسط فرایند پرس داغ ساخته شد. برای پوسته از ورق آلومینیوم 5754 با ضخامت 0/5 میلی‌متر استفاده شد. همچنین هسته پلیمری از نوع پلی‌اتیلن می‌باشد. برای چسباندن لایه‌ها به همدیگر از چسب پلیمری مالئیکه که به صورت فیلم نازک تهیه شدند، استفاده شد. شماتیک از ورق سه‌لایه ساخته شده در شکل 6 دیده می‌شود. ترکیب شیمیایی ورق مورد استفاده، خواص پلی‌اتیلن و چسب مالئیکه به ترتیب در جداول 1 تا 3 قابل مشاهده است. مراحل ساخت ورق سه‌لایه در شکل 7 دیده می‌شود. برای چسبندگی بهتر لایه‌ها به یکدیگر ابتدا سطح ورق 5754 آماده سازی شد. برای این منظور ابتدا سطح ورق توسط سنباده شماره 30 زیر شده و در ادامه توسط شوینده‌های چربی‌زدا کاملاً عاری از هرگونه گرد و غبار و چربی شد. این فرایند شستشو و چربی‌زدایی بر روی فیلم چسب مالئیکه نیز انجام شد. در چیدمان لایه‌ها ابتدا ورق آلومینیومی بر روی یک

جدول 3 خواص چسب مالئیکه مورد استفاده

Table 3 Properties of Maleic glue used

فرمول شیمیایی	دمای ذوب	چگالی	مقدار مالئیک
$C_4H_2O_3$	118 °C	0/92 g/cm ³	%1/7

جدول 2 خواص پلی‌اتیلن مورد استفاده

Table 2 Properties of polyethylene used

ترکیب شیمیایی	دمای ذوب	چگالی
$(C_2H_2)_n$	135 °C	0/96 g/cm ³



Fig. 7 Steps of preparing three-layer sheet

شکل 7 مراحل ساخت ورق سه لایه

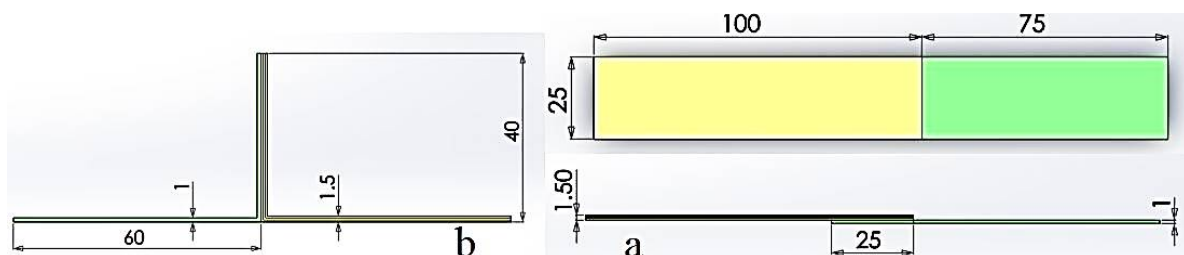


Fig. 8 specimen Details of the shear test (a) and peel test (b).

شکل 8 جزئیات نمونه تست برشی (a) و تست جدایش (b)

گرفت. برای این منظور مطابق با جدول 4 پین با عمق نفوذ 2/2، 2/4، 2/6 و 2/8 میلی‌متر در المان‌های اتصال، ساخته شد. به‌عنوان مثال ارتفاع پین 7/2 مربوط به عمق نفوذ 2/2 می‌باشد (شکل 9). برای بررسی اثر زاویه پین مطابق با شکل 10 از زاویه پین 0 و 3 درجه استفاده شده است (شکل 11).

از تمام شرایط تعریف شده در جدول 4، هر کدام سه نمونه تحت تست برشی قرار گرفتند و از اتصالی که بالاترین استحکام بدست آمد، مجدداً به تعداد سه نمونه تست جدایش انجام شد تا رفتار بهترین اتصال توسط تست جدایش نیز بررسی گردد. پس از انجام اتصالات و آماده شدن نمونه‌ها، برای تست برشی و در آخر تست جدایش، از دستگاه تست کشش مدل STM-400 استفاده شد (شکل 14).



Fig. 10 General sheet testing machine model SMT-A 400 B

شکل 10 دستگاه آزمون‌های عمومی ورق مدل SMT- A 400 B

جدول 4 لیست پارامترهای هندسی استفاده شده در تحقیق حاضر

Table 4 The list of geometrical parameters used in the present work

اثر عمق نفوذ پین (میلی‌متر)	اثر زاویه پین (درجه)
2/2	0
2/4	3
2/6	
2/8	

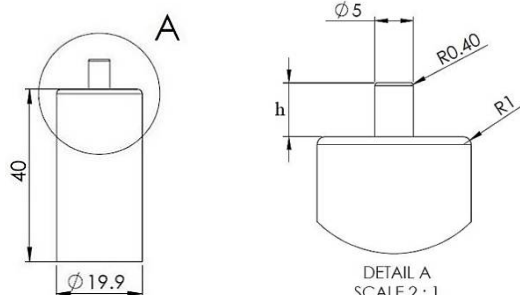


Fig. 11 Geometry of the pin to investigate the effect of the penetration depth (The values used for h are: 7.2, 7.4, 7.6 and 7.8)

شکل 11 خصوصیات هندسی پین جهت بررسی اثر عمق نفوذ (مقادیر استفاده شده برای h برابرند با: 7/2، 7/4، 7/6 و 7/8)

2-2- مجموعه استفاده شده برای انجام فرایند کلینچینگ

ست‌آپ مورد استفاده جهت انجام اتصال کلینچینگ ورق سه‌لایه به ورق تک‌لایه در شکل 9 مشاهده می‌شود. قطعه شماره 1 و 2 به ترتیب ماتریس و پین هستند که وظیفه شکل‌دهی موضعی به ورق‌های متصل شونده را برعهده دارند. ماتریس در قطعه شماره 3 که ورق‌گیر می‌باشد جانمایی شده است. قطعه شماره 4 دارای شیارهای است که ورق‌های متصل شونده توسط آن موقعیت دهی شده است. همچنین قطعه شماره 4 راهنمایی برای حرکت پین نیز می‌باشد. ابتدا ورق تک‌لایه آلومینیومی بر روی شیار قطعه 4 قرار می‌گیرد. ورق سه‌لایه آماده شده بر روی ورق تک‌لایه قرار می‌گیرد. سپس قطعه شماره 3 بر روی ورق‌ها قرار می‌گیرد. پس از قرار گرفتن ورق‌های متصل شونده در ست‌آپ، پین توسط اعمال نیرو ورق‌ها را به صورت موضعی به داخل حفره ماتریس هدایت می‌کند. متناسب با نیروهای اعمالی و شکل هندسی پین و حفره ماتریس، میزان قفل مکانیکی و ضخامت‌گلوپی تغییر می‌کند که استحکام اتصال وابسته به این پارامترها می‌باشد.

برای انجام اتصالات از دستگاه آزمون‌های عمومی ورق مدل SMT- A 400 B با نیروی اتصال 45 کیلو نیوتن که توسط پین به موضع اتصال اعمال می‌شود و نیروی ورق‌گیر 55 کیلو نیوتن استفاده شده است (شکل 10).

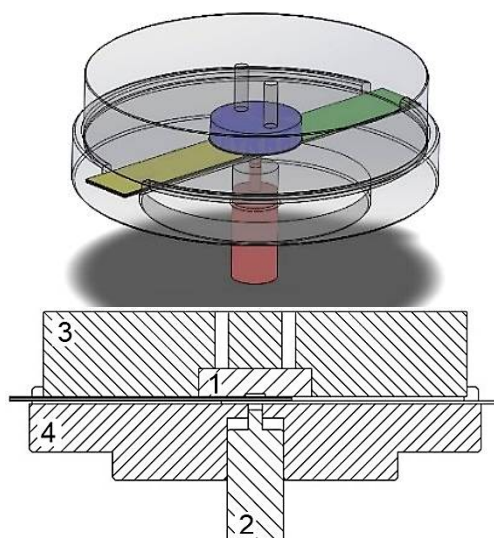


Fig. 9 Setup used to perform the clinching joint.

شکل 9 ست‌آپ استفاده شده برای انجام اتصال کلینچینگ

2-3- آزمون‌های تجربی انجام شده

در آزمایش‌های تجربی قابلیت اتصال در ورق سه‌لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم، توسط فرایند کلینچینگ، اثر تغییر عمق نفوذ پین و زاویه پین بر روی اتصال این ورق‌ها مورد بررسی قرار

3- نتایج و بحث

در بررسی‌های اولیه از امکان سنجی اتصال ورق سه‌لایه به ورق تک‌لایه با فرایند کلینچینگ، مشخص گردید که اتصال فقط زمانی صورت می‌گیرد که ورق سه‌لایه، سمت ماتریس و ورق تک‌لایه سمت پین قرار گرفته باشد. دلیل این اتفاق قابلیت شکل‌پذیری کمتر پوسته ورق سه‌لایه با ضخامت 0/5 میلی‌متر نسبت به ورق تک‌لایه با ضخامت یک میلی‌متر، می‌باشد. در اتصالاتی که ورق سه‌لایه سمت پین قرار داشت، در حالتی که نیرو و عمق نفوذ کم بود اتصال برقرار نمی‌شد که به علت عدم شکل‌گیری دو پوسته ورق سه‌لایه به مقدار مورد نیاز جهت تشکیل قفل مکانیکی در ورق تک‌لایه می‌باشد. در حالتی که نیرو و عمق نفوذ پین کمی بیشتر می‌شد، ورق ضخامت 0/5 پوسته ورق سه‌لایه دچار پارگی می‌شد. در نتیجه در تمامی اتصالات ورق سه‌لایه در سمت ماتریس قرار گرفت.

در بررسی اتصالات کلینچ شده ورق آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم به ورق تک‌لایه آلومینیوم ابتدا هندسه مقطع اتصال حاصله بررسی شد و اثر عمق نفوذ پین در هندسه اتصال حاصله ارزیابی شد. هندسه اتصالات حاصله با پین استوانه‌ای در عمق نفوذهای مختلف در شکل 15 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نفوذ پین، مواد بیشتری در جهت شعاعی حرکت کرده‌اند. در مقطع مربوط به عمق نفوذ پین 2/2 میلی‌متر هیچ‌گونه قفل مکانیکی مشاهده نمی‌شود، اما با افزایش عمق نفوذ پین، قفل مکانیکی افزایش پیدا کرده است. در اتصال ورق سه‌لایه مشاهده شده است که با وجود هسته پلیمری الاستیک، اتصال فقط بین ورق تک‌لایه و پوسته ورق سه‌لایه ایجاد شده است.

همین‌طور مشاهده می‌شود که در تمام عمق‌های نفوذ، در حالی که ضخامت لایه بالایی ورق سه‌لایه بسیار کاهش یافته و حتی منجر به پارگی آن لایه در زیر پین شده است، اما ضخامت لایه پایینی ورق سه‌لایه تغییر چندانی نکرده است. تغییر شکل لایه پایینی تنها شامل حرکت انتقالی به داخل حفره ماتریس و پر کردن حفره بوده است. پس از پر شدن حفره ماتریس با لایه پایینی، حرکت بیشتر پین، منجر به تغییر شکل بیشتر این لایه نشده است. دلیل این مسأله را می‌توان تنش تسلیم کمتر لایه پلیمری میانی و همچنین اصطکاک کمتر پلیمر با لایه‌های آلومینیومی دانست. در اثر اعمال نیروی فشاری سنبه تنش فشاری اعمال شده به لایه پلیمری و لایه آلومینیومی زیرین یکسان خواهد بود.

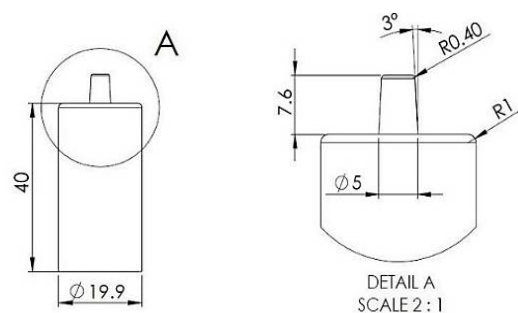


Fig. 12 Geometry of clenching pin to investigate the effect of pin angle
شکل 12 خصوصیات هندسی پین در فرایند کلینچینگ جهت بررسی اثر زاویه پین

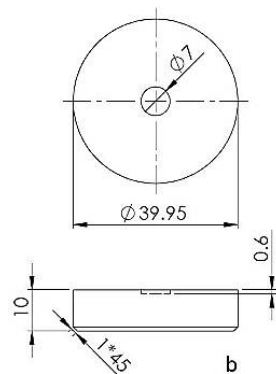


Fig. 13 Geometry of the matrix for the clenching process
شکل 13 خصوصیات هندسی ماتریس در فرایند کلینچینگ



Fig. 14 Preparation of the clinched specimens to perform the shear and peel tests

شکل 14 آماده‌سازی نمونه‌های کلینچ شده جهت انجام تست‌های برش و جدایش

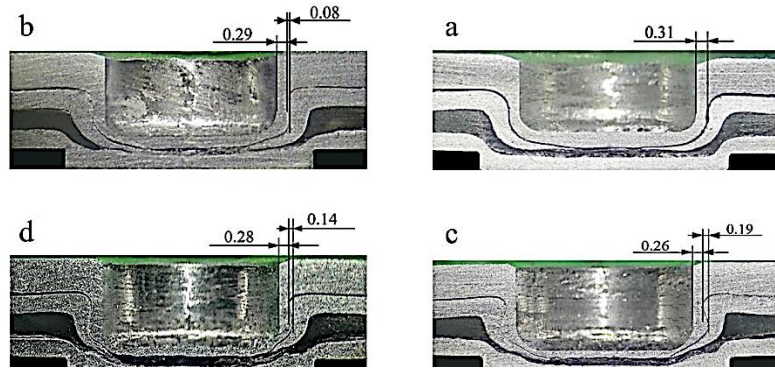


Fig. 15 Cross-sections of the joints created with different pin penetration depth a) 2.2 b) 2.4 c) 2.6 d) 2.8 mm

شکل 15 مقاطع برش خورده حاصل از اتصال با عمق متفاوت نفوذ پین (a) 2.2 (b) 2.4 (c) 2.6 (d) 2.8 میلی‌متر

جذب شده نمونه‌ها در آزمون برشی زمانی رخ می‌دهد که مد شکست در آزمون برشی مد شکست ترکیبی باشد. بنابراین می‌توان گفت، مد شکست ترکیبی، بهینه‌ترین حالت پارامترهای فرایند کلینچ ورق سه لایه آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم به ورق تک لایه را نشان می‌دهد.

لایه پلیمری به خاطر استحکام کم، تسلیم شده و شروع به جریان در جهت شعاعی می‌کند، به گونه‌ای که ضخامت لایه پلیمری در قسمت خارج از اتصال، بیشتر از ضخامت اولیه این لایه می‌شود. اما لایه زیرین به خاطر استحکام بالاتر با همان نیرو، تغییر شکل چندانی نخواهد داشت. همچنین به خاطر اصطکاک کم لایه پلیمری با لایه پایینی، نیروی برشی چندانی نیز برای تغییر شکل لایه زیرین به آن اعمال نمی‌شود.

به همین دلیل، تغییر شکل لایه زیرین ناچیز است. علت تفاوت تغییر شکل لایه آلومینیومی بالایی و پایینی را نیز می‌توان با توجه به تفاوت عمق حفره ماتریس و عمق نفوذ پین شرح داد. چون عمق نفوذ پین بیش از عمق قالب است، لایه بالایی برای ایجاد اتصال باید تغییر شکل بیشتری به خود بگیرد. در عمق نفوذهای بالاتر، این میزان تغییر شکل منجر به پارگی لایه بالایی در مرکز اتصال می‌شود.

برای بررسی استحکام نمونه‌های اتصال، این نمونه‌ها تحت آزمون‌های برشی و جدایش قرار گرفتند. برای بررسی تکرار پذیری اتصالات، هر حالت اتصال 3 بار تکرار شد. به طور کلی در حین آزمون برشی سه نوع مد شکست در اتصالات کلینچ شده مشاهده شد. مد شکست از گلوبی¹، مد جدایش از کف² و مد ترکیبی (شکست از گلوبی و جدایش از کف). شکل 16 این سه مد را نشان می‌دهد. در مد اول، اتصال از ناحیه گلوبی دچار شکست می‌شود که عموماً به دلیل کم بودن ضخامت گلوبی است. در مد دوم، کم بودن قفل مکانیکی باعث جدا شدن دو جزء اتصال از هم می‌شود. و در مد سوم، شکست زمانی اتفاق می‌افتد که همزمان با پارگی از ناحیه گلوبی، جدایش از کف اتصال نیز رخ می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از آزمون برشی نشان می‌دهد که حداکثر استحکام برشی نمونه‌ها و حداکثر انرژی

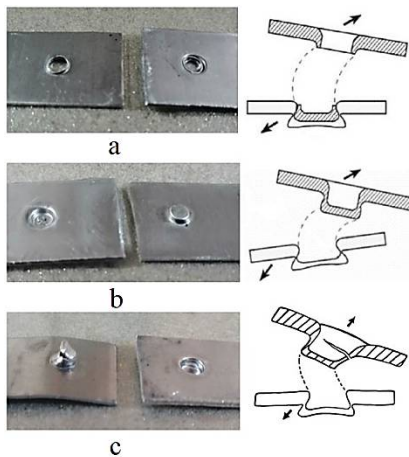


Fig. 16 failure modes of the clinched joint a) neck fracture, b) bottom separation and c) combined type

شکل 16 مدهای شکست اتصال کلینچینگ (a) پارگی گلوبی (b) جدایش از کف و (c) نوع ترکیبی

در شکل 17 نتایج حاصل از آزمون برشی نمونه‌های حاصله با پین استوانه‌ای در چهار عمق نفوذ مختلف نشان داده شده است. در جدول 5 و شکل 18 نیز داده‌های استخراج شده این آزمون‌ها جهت مقایسه ارائه شده است. با توجه به نمودارها ارائه شده و میزان انحراف معیار نشان داده شده در جدول 5 و شکل 19، تست‌ها از تکرار پذیری مناسبی برخوردار هستند. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نفوذ پین مقدار نیروی تحمل شده در تست نیرو-جابجایی افزایش پیدا کرده است.

¹ Neck fracture

² Bottom separation

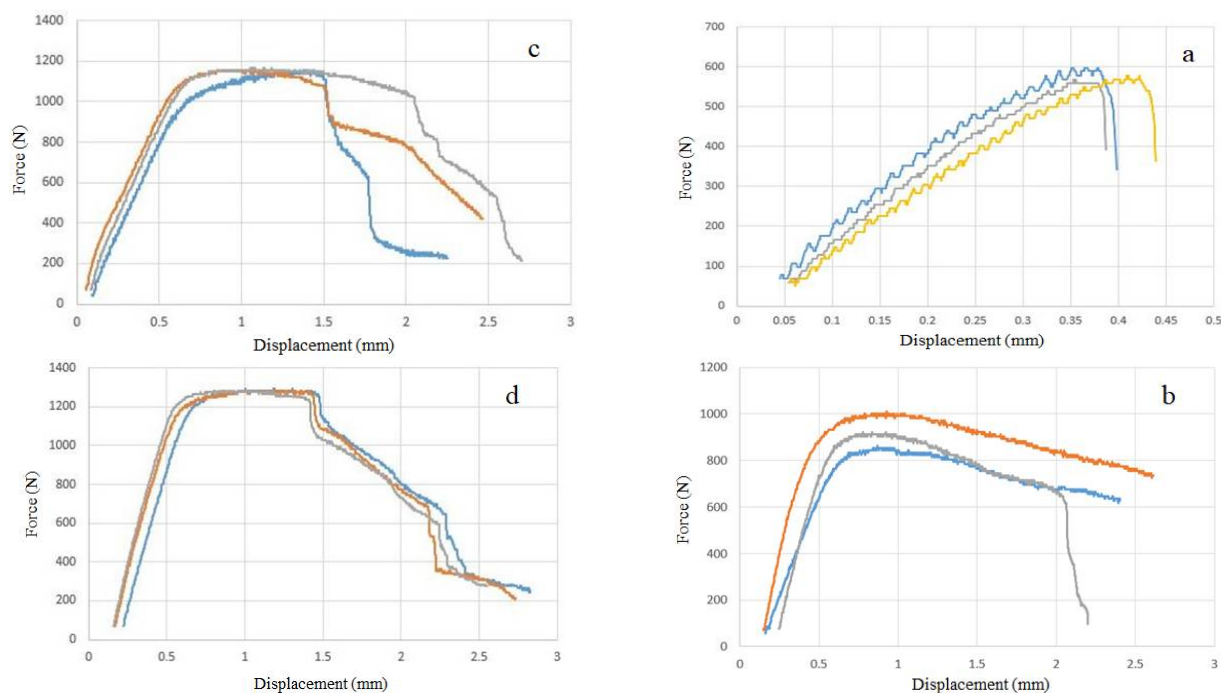


Fig. 17 Force-displacement diagrams to investigate the effect of penetration depth a) 2.2 b) 2.4 c) 2.6 and d) 2.8 mm

شکل 17 نمودارهای نیرو-جابجایی در بررسی اثر عمق نفوذ (a) 2/2 b) 2/4 c) 2/6 و d) 2/8 میلی‌متر

جدول 5 داده‌های حاصل از چهار شرط اتصال در بررسی اثر عمق نفوذ پین

Table 5 Data obtained from four joining conditions to investigate the effect of the pin penetration depth

پارامترهای ابزار mm					نیروی اتصال N		جذب انرژی J		مست
عمق نفوذ	عمق ماتریس	قطر ماتریس	زاویه پین	قطر پین	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	
2/2					523	11/5	0/13	0/01	خروج از کف
2/4					928/3	64/25	1/68	0/35	خروج از کف
2/6	0/6	7	0	5	1161	5/19	1/99	0/37	ترکیبی
2/8					1288/3	5/7	2/2	0/03	ترکیبی

شکست ترکیبی ایجاد شده و میزان جذب انرژی دارای مقداری بالاتری است. مد شکست ترکیبی در نمودار نیرو - جابجایی منجر به نمودار دو قله می شود، به طوری که قله اول مربوط به خروج از کف و قله دوم مربوط به شکست گلوبی است.

با توجه به روند نمودارها می‌توان پیش‌بینی کرد که اتصال با عمق نفوذ پین بالاتر از 2/8 میلی‌متر باعث کاهش بیشتر ضخامت گلوبی خواهد شده که به علت کشیدگی بیشتر ورق در این ناحیه است. با کاهش ضخامت گلوبی مد شکست از حالت شکست ترکیبی به مد شکست گلوبی تغییر می‌کند. به همین دلیل، با افزایش بیشتر عمق نفوذ پین در فرایند کلینچینگ، نمونه حاصله در آزمون برشی ورق از ناحیه گلوبی پاره خواهد شد. به عبارت دیگر عملاً اتصالی شکل نمی‌گیرد. همان‌طور که در عمق نفوذ کمتر از 2/2 میلی‌متر نیز هیچ‌گونه اتصالی صورت نگرفته است. برای بررسی اثر زاویه پین، هندسه مقطع حاصله از

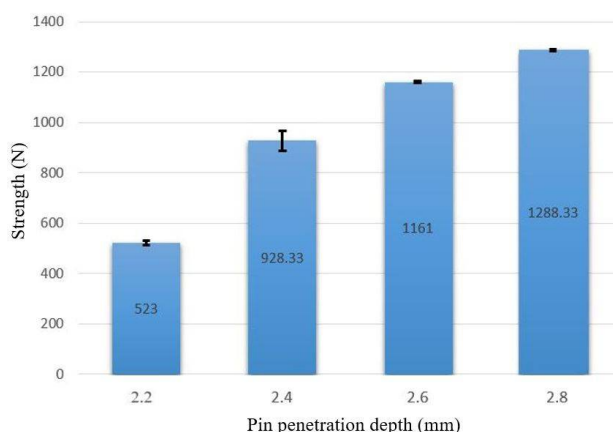


Fig. 18 The effect of the pin penetration depth on the clinched joint strength

شکل 18 اثر عمق نفوذ پین در استحکام اتصال کلینچ

در تست‌ها با عمق نفوذ 2/6 و 2/8 میلی‌متر به علت به دست آمدن بالاترین قفل مکانیکی و کاهش کم ضخامت گلوبی، مد

حاصل از دو شرایط اتصال که تفاوت آنها در زاویه مخروطی پین از صفر درجه به 3 درجه است، در جدول 6 ارائه شده است. همچنین در شکل 21 مقایسه نموداری از نیروی تحمل شده از هر تست مشاهده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه شد بیشترین نیروی تحمل شده در آزمون برشی، در اتصال با عمق نفوذ 2/8 میلی‌متر بدست آمد. بنابراین این اتصال تحت آزمون جدایش نیز قرار گرفت که نمودار نیرو-جابجایی مربوطه در شکل 22 مشاهده می‌شود. داده‌های حاصل از این شرایط اتصال تحت آزمون برشی و جدایش، در جدول 7 ارائه شده است. همچنین در شکل 23 مقایسه‌ای از مقدار نیروی تحمل شده در بهترین شرایط اتصال که در عمق نفوذ 2/8 بدست آمد، تحت آزمون برشی و آزمون جدایش ارائه می‌شود. مشاهده می‌شود که در آزمون برشی نیز استحکام این اتصال قابل قبول و در حد 40 درصد استحکام آن در آزمون برشی است. همچنین تکرار پذیری نتایج آزمون در آزمون جدایش کمتر از آزمون برشی است، اما همچنان تکرارپذیری قابل قبولی دارد.

پین مخروطی 3 درجه با پین استوانه‌ای مقایسه شد که نتایج آن در شکل 19 ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با مخروطی شدن پین در زاویه 3 درجه، میزان قفل مکانیکی بسیار کمتر از پین استوانه‌ای است. کاهش حرکت شعاعی ورق در ناحیه گلوبی به علت فشار عرضی کمتر اعمالی توسط پین مخروطی به این ناحیه بوده که منجر به کاهش قفل مکانیکی شده است. در اتصال با پین مخروطی، لایه بالایی در قسمت زیر پین، مشابه اتصال با پین استوانه‌ای کاملاً پاره شده است. در اتصال با پین مخروطی مواد پلیمری در لایه میانی رفتار مشابه‌ای با اتصال پین استوانه‌ای دارند به طوری که با اعمال تنش فشاری توسط پین، لایه میانی با حد تسلیم کمتر حرکت شعاعی داشته و ضخامت آن در خارج از ناحیه اتصال افزایش پیدا کرده است. استحکام اتصال با پین مخروطی در مقایسه با پین استوانه‌ای در عمق نفوذ برابر پین، مطابق با نمودارهای شکل 20 مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهد که به علت قفل مکانیکی کمتر آن است. مد شکست در اتصال با پین مخروطی از نوع خروج از کف و در اتصال با پین استوانه‌ای از نوع ترکیبی بوده است. داده‌های

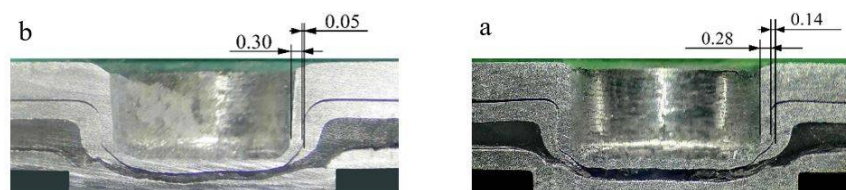


Fig. 19 Cross-sections of the joints created with pin angle of a) 0 and b) 3 degree

شکل 19 مقاطع برش خورده حاصل از اتصال با پین مخروطی (a) صفر و (b) 3 درجه

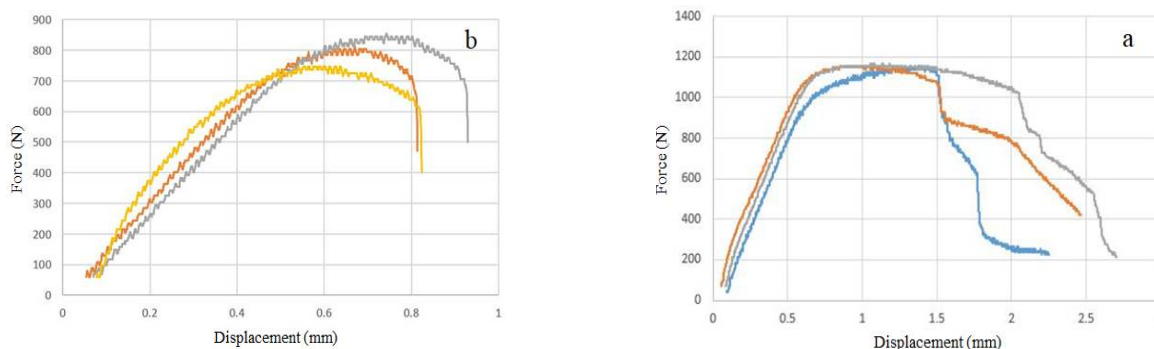


Fig. 20 The effect of the pin angle of a) 0, b) 3 on the Force-displacement curves

شکل 20 اثر زاویه پین (a) صفر (b) 3 بر نمودارهای نیرو-جابجایی

جدول 6 اثر زاویه پین بر خواص اتصال

Table 6 Effects of pin angle on joint characteristics

پارامترهای ابزار mm					نیروی اتصال N		جذب انرژی J		مد شکست
عمق نفوذ	عمق ماتریس قطر ماتریس	زاویه پین	قطر پین	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار		
2/6	0/6	3	5	804/3	54/15	0/45	0/04	خروج از کف ترکیبی	
2/6	0/6	0	5	1161	5/19	1/99	0/37		

جدول 7 داده‌های حاصل از آزمون برشی و جدایش در بررسی بهترین شرایط اتصال

Table 7 Data obtained from shear and peel test in the best joining conditions investigating

پارامترهای ابزار mm					نوع آزمون	نیروی اتصال N		جذب انرژی J		مد شکست
عمق نفوذ عمق ماتریس قطر ماتریس زاویه بین قطر بین						میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	
5	0	7	0/6	2/8	برشی	1288/3	5/7	2/2	30/0	ترکیبی
					جدایش	540	49	8/8	1	ترکیبی

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت اتصال ورق‌های کامپوزیتی سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم به ورق آلومینیومی 5754 به روش کلینچینگ توسط ابزار با دو نوع هندسه استوانه‌ای و مخروطی در عمق نفوذهای مختلف انجام شد که نتایج این پژوهش به این شرح می‌باشد.

- برای اتصال ورق سه‌لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم به ورق تک‌لایه آلومینیومی با ضخامت بیشتر از پوسته ورق سه‌لایه، اتصال زمانی صورت می‌گیرد که ورق سه‌لایه سمت ماتریس قرار گرفته باشد.

- مقدار کم عمق نفوذ بین موجب عدم شکل‌گیری قفل مکانیکی شده است. با افزایش عمق نفوذ بین تا یک مقدار بهینه میزان قفل مکانیکی افزایش می‌یابد زیرا افزایش بیشتر عمق بین موجب کاهش ضخامت گلوبی خواهد شد.

- مخروطی کردن بین با در نظر گرفتن عمق نفوذ برابر باعث کاهش قفل مکانیکی خواهد شد.

5- مراجع

- [1] J. Mucha, "Clinching technology in the automotive industry", *Archiwum Motoryzacji*, Vol. 76. pp. 75-94, 2017.
- [2] M. Salamati, M. Soltanpour, A. Fazli, and A. Zajkani, "Processing and tooling considerations in joining by forming technologies; part A—mechanical joining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 101, No. 1-4. pp. 261-315, 2019.
- [3] V. Zal, H. M. Naeni, A. R. Bahramian, and J. S. Karami, "Experimental investigation on the roll forming of PVC / aluminum / glass fabric FMLs into channel section profiles", *Vol. 16, No. 9*, pp. 207-215, 2016. (in Persian)
- [4] F. Lambiase, "Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 9-12. pp. 1995-2006, 2015.
- [5] M. Harhash, A. Carradò, and H. Palkowski, "Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays – Part 2: Stretching and deep

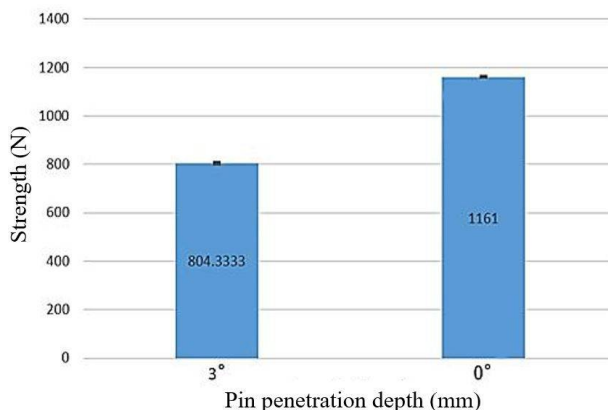


Fig.21 The effect of the pin angle on the joint strength

شکل 21 مقایسه اثر زاویه بین بر روی استحکام اتصال

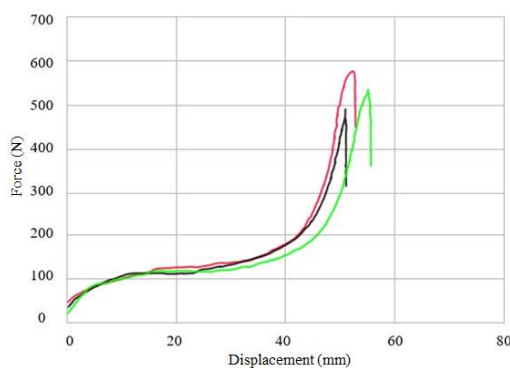


Fig. 22 Force-displacement curves under peel test for the joint created with the pin penetration depth of 2.8 mm

شکل 22 نمودارهای نیرو - جابجایی تحت آزمون جدایش در اتصال با عمق نفوذ 2/8 میلی‌متر بین

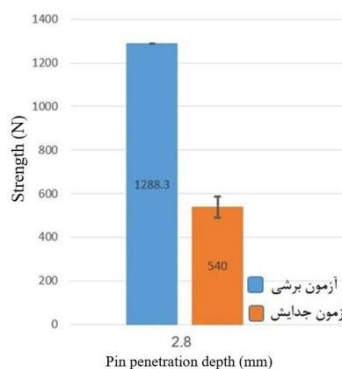


Fig. 23 The amount of joint strength in the shear and peel test at the join with a penetration depth of 2.8 mm

شکل 23 مقدار استحکام اتصال تحت آزمون برشی و جدایش در اتصال با عمق نفوذ 2/8 میلی‌متر

- spot welding of new lightweight sandwich material”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 80, No. 5–8, pp. 1137–1147, 2015.
- [11] C. G. Pickin, K. Young, and I. Tuersley, “Joining of lightweight sandwich sheets to aluminium using self-pierce riveting”, *Mater. Des.*, Vol. 28, No. 8, pp. 2361–2365, 2007.
- [12] K. Mori and Y. Abe, “A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation Punch Sheet Rivet holder Upper sheet Lower sheet Die (a) Start (b) Driving through upper sheet Interlock Flaring (c) Formation of interlock”, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 1, No. 1. pp. 1–11, 2018.
- [13] M. K. S. Atia and M. K. Jain, “Clinching of AA7075 Aluminum Sheets,” *McMaster University*. 2017.
- [14] T. Gerstmann and B. Awiszus, “Recent developments in flat-clinching”, *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 81, pp. 39–44, 2014.
- drawing”, *Composite Structures*, Vol. 160. pp. 1084–1094, 2017.
- [6] F. Ferrari, “Lightweight Metal / Polymer / Metal Sandwich Composites for Automotive Applications”, *Electronic Theses and Dissertations*. 7256. pp. 1–100, 2017.
- [7] H. Palkowski and L. Günther, “Association of Metallurgical Engineers Serbia and Montenegro”, *Metal*. 11, Vol. 3, pp. 215–224, 2005.
- [8] K. I. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, and A. E. Tekkaya, “Joining by plastic deformation”, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, Vol. 62, No. 2, pp. 673–694, Jan. 2013.
- [9] R. J. S. Batista, J. P. M. Pragana, I. M. F. Bragança, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “Invisible mechanical lap joints for metal–polymer laminates”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 2020.
- [10] J. S. Tanco, C. V. Nielsen, A. Chergui, W. Zhang, and N. Bay, “Weld nugget formation in resistance