

بررسی تجربی، عددی و تحلیلی استحکام سیستم اتصال فلز-کامپوزیت به روش "کاملد"

محمد معین سیف^۱، خداداد واحدی^{۲*}، عرفان قیاسی^۳، روح اله حسینی^۴

* نویسنده مسئول: khvahedi@ihu.ac.ir

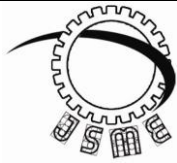
واژه‌های کلیدی	چکیده
کامپوزیت فلز سازه ترکیبی اتصال کاملد استحکام کششی	<p>"کاملد" یک روش نوین برای ایجاد اتصال مؤثر میان انواع کامپوزیت و فلزات با ایجاد آرایشی از بین‌ها یا برآمدگی‌ها بر روی قطعه فلزی و لایه چینی کامپوزیت بر روی این برآمدگی‌ها به منظور ایجاد یک اتصال چسبی و درعین حال درگیر است. هدف از این مقاله بررسی عددی و تجربی استحکام کششی اتصال ترکیبی فلز و کامپوزیت بانام کاملد و مقایسه استحکام آن با اتصال مرسوم چسبی و همچنین بررسی تحلیلی سختی کامپوزیت بعد از فرآیند کاملد و مقایسه آن با سختی کامپوزیت در حالت عادی است. تست تجربی با ساخت ۲۱ نمونه از اتصال کاملد و غیر کاملد با هندسه متفاوت پین که تحت بار کششی خالص قرار گرفتند، انجام گرفت. در بررسی عددی، شبیه‌سازی سه‌بعدی با مدل‌سازی رفتار چسب با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. بررسی تحلیلی سختی کامپوزیت نیز شامل کد نویسی روابط تعمیم داده‌شده برای دو هندسه استوانه‌ای و مخروطی پین در "متلب" و استخراج نتایج از آن بود.</p> <p>نتایج تست تجربی نشان‌دهنده استحکام کششی بالاتر اتصال کاملد نسبت به اتصال چسبی و همچنین تطابق مطلوب این نتایج با نتایج شبیه‌سازی عددی است. نتایج عددی حاصل شده از بررسی تحلیلی سختی کامپوزیت در حالت کاملد نیز نمایانگر قابلیت بالای فرآیند کاملد در بهبود مشخصات الاستیک چندلایه کامپوزیتی در گیر در یک اتصال با فلز است. در نهایت این بررسی‌ها نشان از پتانسیل بالای اتصال کاملد در بهبود کیفیت و کارایی اتصال بین انواع فلز و کامپوزیت‌هاست.</p>
تاریخ ارسال: ۹۵/۰۴/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۷/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۸	

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- عضو هیات علمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.



Journal of
Solid Mechanics in
Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Experimental, numerical and analytical investigation of the new metal/composite Comeld Joint

Mohammad Moein Seif¹, Khodadad Vahedi^{2*}, Erfan Ghiasi³, Rouhollah Hosseini⁴

* Corresponding Author: khvahedi@ihu.ac.ir

Abstract:

“Comeld” is a novel technology which can be applied in connecting composites and metals by manufacture of an array of metal pins on the metal part and layup the composite layers on the pins to make an adhesive and mechanical Joint at the same time. The aim of this paper is an experimental, numerical and analytical investigation on strength of comeld joint system and also to calculate the stiffness properties of composite after comeld process. Experimental test were carried out with fabrication of 21 specimens of comeld and uncomeld joints with different geometry and arrays of pins. Samples were tested under pure tensile loading. For the numerical simulation and investigation, the commercial software ABAQUS has been used and the tensile test were carried out to model a 3D Simulation of the joints considering adhesive behaviour. The analytical investigation was focused on the calculation of laminate stiffness properties after comeld process and the results were calculated using MATLAB capabilities. The results of experimental tests showed a good agreement with those of numerical results. The results show that the comeld joint system has a high potential for effective joining of metal and composite.

Key words:

Composite.
Metal
Hybrid Structure
Joint
Comeld
Tensile strength

1- Master of Engineering Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

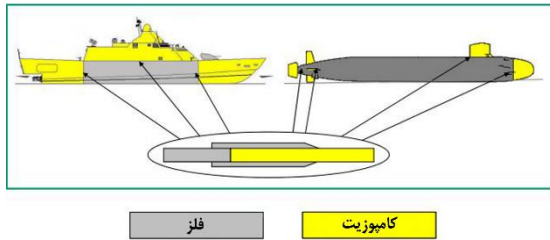
2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

3- Master of Engineering, Faculty of Computer Science and Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

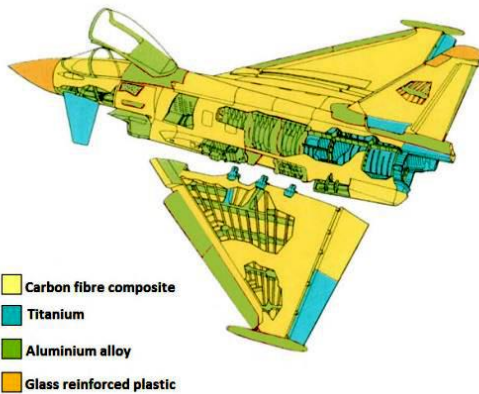
4- Tutor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

۱- مقدمه

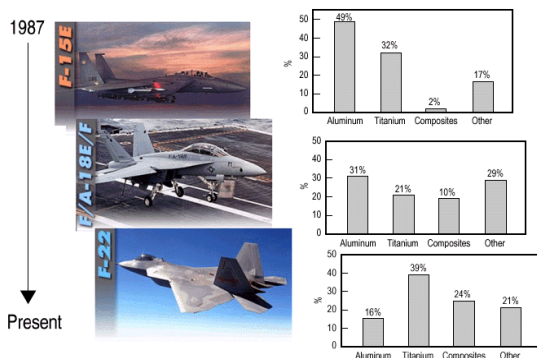
(۳) نیز گسترش کاربردی کامپوزیت در کنار فلز در ساختار هواپیماهای جنگی در طول زمان را نشان می‌دهد.



شکل (۱) اتصال فلز و کامپوزیت در کاربردهای دریایی [۳]



شکل (۲) اتصالات موجود بین فلز و کامپوزیت در طراحی ساختاری هواپیما [۴]



شکل (۳) گسترش کاربرد فلز در کنار کامپوزیت در ساختار هواپیماهای جنگی [۵]

۱-۲- روش‌های مرسوم اتصالات کامپوزیتی

هم‌اکنون سه روش عمده برای اتصال مواد کامپوزیتی به خودشان و سایر مواد از جمله فلز وجود دارد: اتصال چسبی، اتصال مکانیکی و ترکیب این دو روش (اتصال ترکیبی). شکل (۴) نشان‌دهنده شماتیکی از سه روش اتصال مرسوم

کاربرد مواد کامپوزیتی در صنعت به خاطر نسبت بالای مقاومت به وزن آن‌ها رو به افزایش است. از جمله کاربردهای عمده کامپوزیت‌ها می‌توان به صنایع هوافضا، دریایی، صنعت خودرو، نظامی و صنایع خاص مربوط به آن‌ها اشاره کرد. در بسیاری از شرایط ممکن است ایجاد یک سازه کاملاً ساخته شده از کامپوزیت میسر نباشد، از جمله به منظور تولید اندازه‌های فیزیکی بزرگ‌تر، اتصال دو ماده غیر هم‌جنس و یا ساخت هندسه‌های غیرقابل تولید به صورت یکپارچه. بنابراین اتصال بین کامپوزیت و مواد دیگر از جمله فلز مورد یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. از لحاظ تاریخی، اتصال فلز با کامپوزیت دارای چالش‌های بسیاری در طراحی بر اساس عملکرد بالای مکانیکی است. بنابراین طراحان نسبت به طراحی سازه‌های شامل اتصالات فلز و کامپوزیت بی‌میلی نشان می‌دهند، یا طراحی‌های محافظه‌کارانه‌ای را ارائه می‌دهند که دارای وزن بالا و در نتیجه سلب مزایای استفاده از کامپوزیت است. [۱]

۱-۱- تعریف سیستم ترکیبی^۱

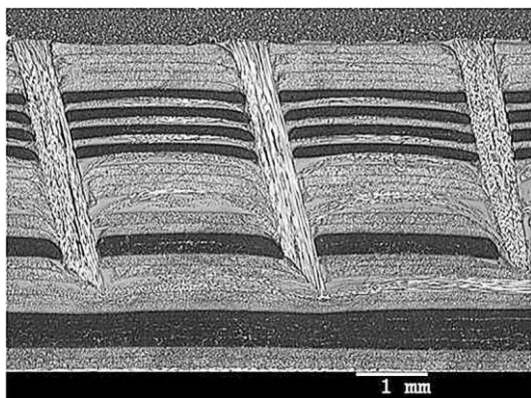
اتصال فلز و کامپوزیت جزئی از سیستم‌های ساختاری بانام سیستم ترکیبی است. یک سیستم ترکیبی شامل دو یا بیش از دو ماده تشکیل‌دهنده است که یک سیستم واحد را برای حاصل شدن مشخصات مکانیکی بهبودیافته و کارایی ساختاری بالاتر، تشکیل می‌دهند که ترکیب مواد تشکیل‌دهنده در سطح ماکروسکوپی است. عملکرد بهبودیافته سیستم‌های ترکیبی شامل بهبود در رفتار خستگی، ضربه، مقاومت خردگی، کاهش وزن و یا بهبود نسبت مقاومت به وزن است. [۲] شکل (۱) نشان‌دهنده یکی از کاربردهای فلز و کامپوزیت در کنار یکدیگر در صنعت دریایی و نظامی است. کاربرد گسترده فلز و کامپوزیت در هواپیماهای جنگی در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل

^۲ Hybrid Joint

^۱ Hybrid System

پرداختند؛ روش‌های در راستای ضخامت، شامل زدپینینگ^۳، استیچینگ^۴، تافتینگ^۵ و از این قبیل که شامل تقویت اتصال با درج میله‌هایی در راستای ضخامت اتصال است، می‌شود. استفاده توأمان از هر دو روش اتصال چسبی و مکانیکی در این تکنیک‌ها، در واقع مزایای هر دو روش را در برمی‌گیرد که این عملیات را می‌توان قبل از لایه چینی و یا پخت کامپوزیت انجام داد. [6]

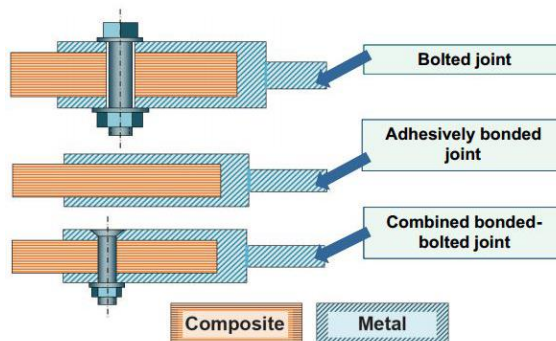
شکل (۵) الیاف تقویت‌کننده جاسازی شده در راستای ضخامت کامپوزیت را در مقیاس بزرگ نشان می‌دهد.



شکل (۵) بین‌های تقویت‌کننده از الیاف در فرآیند زدپینینگ [۷]

مشابه طراحی اتصالات زدپین، سیستم اتصال به‌منظور بهبود اتصال فلز-کامپوزیت طراحی شده است. اما تفاوت این دو به‌طور عمده در برآمدگی‌های ایجادشده بر روی سطح اتصال فلز است، که در مورد زدپینینگ یک فرآیند نصب وجود دارد، اما در اتصال کاملد با ایجاد یک آرایش از بین‌ها بر روی قطعه فلزی، عمل تقویت در راستای ضخامت انجام می‌شود. [۶] شکل (۶) نمایی از لایه‌چینی الیاف بر روی قطعه فلزی دارای بین را نشان می‌دهد.

است. اتصال ترکیبی شامل ترکیب دو روش اتصال مکانیکی و چسبی است که در دهه اخیر مورد توجه محققین و پژوهشگران قرار گرفته است. این روش‌ها عمدتاً شامل استفاده از پیچ یا پرچ در کنار پیوند چسبی است.



شکل (۴) انواع روش‌های اتصال مواد کامپوزیتی به فلز [۳]

۳-۱- معایب روش‌های اتصال مرسوم

با وجود اتکای صنعت به بست‌های مکانیکی^۱ و اتصال چسبی، معایب هر دو این روش‌ها در موقعیت کاربردی با کامپوزیت‌هایی با سختی بالا، قابل توجه است. این معایب در اتصال پیچی و پرچی شامل افزایش وزن در پی افزایش ضخامت کامپوزیت و تمرکز تنش است. در مورد اتصال چسبی، این معایب شامل ناتوانی در بازرسی کیفیت و آسیب‌پذیری این اتصال در مقابل شکست ناگهانی است. این معایب موجب توسعه یک روش جدید برای اتصال کامپوزیت با فلز با ترکیب مزایای دو روش مرسوم چسبی و مکانیکی شد که با مفهوم گیردار کردن به‌وسیله بین تحقق پیدا می‌کند. [۴]

۴-۱- معرفی اتصال کاملد

۴-۱-۱- تکنیک‌های در راستای ضخامت^۲

به‌منظور حل مشکلات مرسوم در اتصالات کامپوزیتی، محققین به ابداع و گسترش دسته خاصی از تکنیک‌های تقویت اتصال با عنوان تکنیک‌های در راستای ضخامت

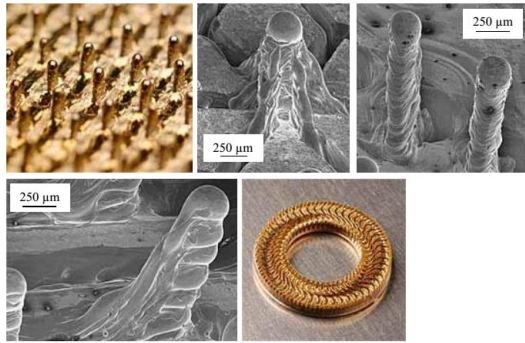
³ Z-pinning

⁴ Stitching

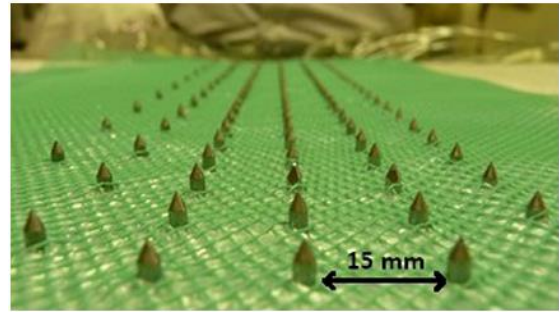
⁵ Tufting

¹ Mechanical Fasteners

² Through Thickness Techniques



شکل (۷) نمونه‌های حکاکی شده از مواد مختلف با روش حکاکی سطح [۷]



شکل (۶) مراحل لایه چینی الیاف بر روی سطح پین دار فلز در مقیاس بزرگ [۸]

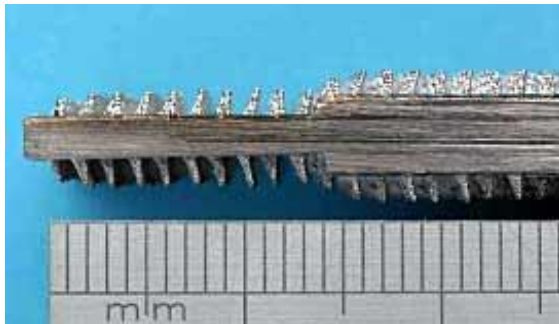
۱-۵-۰-۵- روش‌های ایجاد برآمدگی

با وجود توسعه روش حکاکی سطح به‌عنوان تکنیک اصلی ایجاد پین بر روی سطح فلز، روش‌های دیگری نیز به این منظور توسعه داده‌شده و مورد استفاده قرار گرفتند که در ادامه به تشریح ۳ روش اصلی ایجاد اتصال کاملد پرداخته می‌شود.

می‌توان آرایشی از پین‌ها را بر روی جزء فلزی با استفاده از روش حکاکی سطح با پرتو الکترونی^۱، تولید افزایشی^۲، انتقال فلز سرد^۳ و یا جوش قوسی تصادمی^۴ ایجاد کرد.

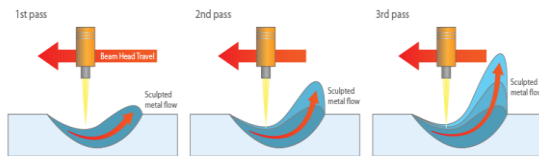
۱-۵-۰-۱- روش حکاکی سطح با پرتو الکترونی

تکنولوژی حکاکی سطح با پرتو الکترونی توسط موسسه جهانی جوش^۵ با استفاده از پرتو الکترونی به‌منظور ایجاد انواعی از بافت‌های سطحی از طریق کنترل پرتو الکترونی^۶ معرفی شده است، برخی از این بافت‌ها در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. [۶] شکل (۸) قسمت فلزی اتصال دوطرفه کاملد را نشان می‌دهد.



شکل (۸) پین‌های ساخته‌شده با روش حکاکی سطح [۹]

در این روش بیم الکترونی تولیدشده توسط تفنگ الکترونی با کنترل سیستم انحراف و تمرکز، به سطح فلز برخورد می‌کند. در همین حال، بیم الکترونی سطح فلز را اسکن کرده و ناحیه‌ای مشخص از آن را ذوب می‌کند. ماده ذوب‌شده به‌واسطه کشش سطحی و کشش بخار مذاب یک برآمدگی را ایجاد می‌کند. سپس مقداری از مذاب، منجمد شده و بعد از هر اسکن بیم الکترونی، این فرآیند تکرار می‌شود. برآمدگی‌های موردنظر را می‌توان با کنترل بیم، و انتخاب مناسب سرعت و انرژی آن ایجاد کرد. [۱۰] شکل (۹) نیز شماتیکی از فرآیند حکاکی سطح را نشان می‌دهد.



شکل (۹) شماتیکی از فرآیند حکاکی سطح با بیم الکترونی [۱۱]

۱-۵-۰-۲- روش تولید افزایشی

پرینت سه‌بعدی یا روش تولید افزایشی شامل هرگونه فرآیندی است که یک جسم ۳ بعدی را ایجاد کند. در این روش، فرآیندهای افزودنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که در طی آن لایه‌هایی از ماده با کنترل کامپیوتر، به‌تدریج

¹ Surfi-sculpt with electron beam

² Additional Manufacturing

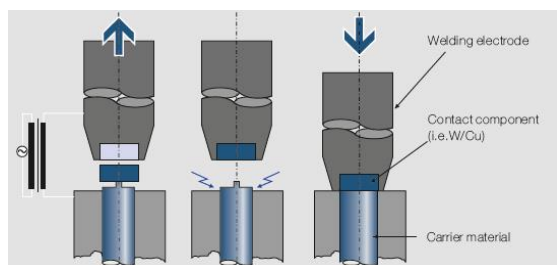
³ Cold Metal Transfer

⁴ Percussion Welding

⁵ The Welding Institution

⁶ Electron Beam

الکتریکی، با اعمال فشار، مواد به یکدیگر جوش می‌خورند. شکل (۱۲) مراحل فرآیند جوش تصادمی را نشان می‌دهد.



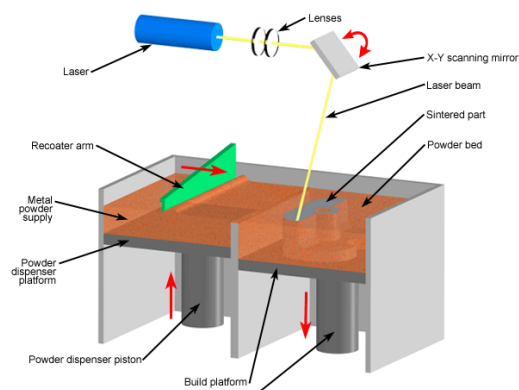
شکل (۱۲) شماتیکی از فرآیند جوش تصادمی [۱۶]

۱-۶- مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته

همان‌طور که اشاره شد اولین پژوهش صورت گرفته در مورد اتصال کاملد در سال ۲۰۰۴ با ابداع روش حکاکی سطح توسط موسسه جوش و آزمایش تجربی استحکام اتصال کاملد تحت کشش، توسط اسمیت^۱ و همکاران [۹] صورت گرفت. در سال ۲۰۱۰ یوزنیک^۲ و همکاران [۱۴]، با استفاده از روش انتقال فلز سرد بر روی سطح فلز، مدل‌های آزمایشی اتصال کاملد را ایجاد کردند. در تحقیق صورت گرفته، روش ساخت این نوع از اتصالات و همچنین نتایج تست کشش ساده برای دو هندسه پین استوانه‌ای و پین سر توپی^۳ مورد بحث قرار گرفت.

بررسی‌های عددی انجام گرفته نیز شامل شبیه‌سازی دوبعدی و بررسی پارامترهای هندسی پین توسط وی توو^۴ [۶] در سال ۲۰۱۱، و همچنین تحلیل اجزاء محدود اتصال و مقایسه آن با نتایج تست تجربی توسط نینگ لی^۵ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ بود. در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ نیز دو تحقیق مجزا به ترتیب توسط پیکین^۶ و همکاران [۱۸] و ژی چانگ وانگ^۷ و همکاران [۱۹] در مورد پارامترهای مؤثر در کارایی روش‌های انتقال فلز سرد و حکاکی سطح با بیم الکترونی صورت پذیرفت.

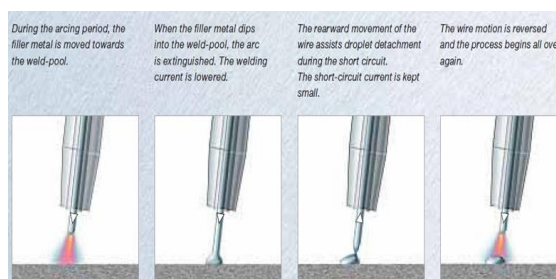
چینش می‌شوند. این اشیاء می‌تواند در هر شکل و هندسه‌ای تولید شود. پرینت سه‌بعدی در واقع فرآیندی است که در آن مواد به صورت پی‌درپی با نوک جاروبک پرینتر در بستری از پودر قرار می‌گیرند. [۱۲] شکل (۱۰) شمای کلی فرآیند تولید افزایشی با لیزر مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) شمای کلی فرآیند تولید افزایشی با لیزر مستقیم [۱۳]

۱-۵-۳- روش انتقال فلز سرد

انتقال فلز سرد، از یک روش جدید جدایش قطره‌ای بر پایه جوش اتصال کوتاه بهره می‌گیرد. زمانی که منبع قدرت، یک اتصال کوتاه را حس می‌کند، جریان جوش افت می‌کند. سیم جوش شروع به جمع شدن می‌کند. سیم فیلمر به‌طور مداوم این فرآیند را در فواصل بسیار کوتاه طی می‌کند. [۱۴] شکل (۱۱) روند فرآیند انتقال فلز سرد در ایجاد یک پین را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱) شمایی از فرآیند انتقال فلز سرد [۱۵]

۱-۵-۴- روش جوش تصادمی

جوش تصادمی یک نوع جوش مقاومتی است که برای اتصال فلزهای غیرهمجنس به یکدیگر استفاده می‌شود. در این روش یک قوس الکتریکی با دمای زیاد در اثر یکی تخلیه الکتریکی کوتاه، ایجاد می‌شود. بلافاصله بعد از تخلیه

¹ Smith

² Ucsnik

³ Ball Head

⁴ Wei Tu

⁵ Ning Li

⁶ Pickin

⁷ Xichang Wang

۱-۶-۲- خلأهای موجود در بررسی‌های صورت گرفته

باوجود تحقیقات متعددی که در چند سال اخیر بر روی این روش نوین در اتصال فلز و کامپوزیت صورت پذیرفته، می‌توان از دو مسئله به‌عنوان دو مورد از مهم‌ترین خلأهای موجود در بررسی‌ها نام برد: مطالعه تحلیلی جامع و شبیه‌سازی عددی^۳ بعدی به همراه مدل‌سازی رفتار چسب. بنابراین در این مقاله سعی بر پرداختن به این دو موضوع و بررسی نتایج به‌دست آمده از آن‌هاست.

۲- الگوسازی نظری و عملی

۲-۱- بررسی تحلیلی سختی کامپوزیت در اتصال

کاملد

۲-۱-۱- مقدمه

تحقیق صورت گرفته توسط ژانگ هونجیگان^[۱] و مطالعات تجربی نشان می‌دهند که میکرو ساختار ناحیه کاملد با کامپوزیت‌های معمول متفاوت است. و ویژگی‌های مکانیکی ناحیه کاملد در طول فرآیند کاملد تغییر کرده است. بنابراین، مشخصات سختی ناحیه کاملد در این اتصالات باید قبل از ایجاد مدل المان محدود و تحلیل تنش، محاسبه شوند.

شکل (۱۳) نشان‌دهنده میکرو ساختار درون صفحه‌ای کلی کامپوزیت بعد از فرآیند کاملد است. با توجه شکل (۱۳) میکرو ساختار کامپوزیت بعد از کاملد ویژگی‌های کلی زیر را داراست:

الف) آرایه الیاف در اطراف پین‌های روی فلز، به‌صورت موجی هستند که مانند یک چشم به نظر می‌رسند. با تغییر جهت الیاف، نواحی غنی از رزین بین الیاف موج‌دار و پین‌ها به وجود می‌آید. به دلیل تغییر جهت الیاف و تغییر غلظت رزین به‌صورت محلی، در طی فرآیند کاملد، مشخصات درون صفحه‌ای^۴ کامپوزیت در این نواحی با

آزمایش‌های تجربی، بیشترین سهم از تحقیقات صورت گرفته در مورد اتصال کاملد را شامل می‌شوند؛ پارکز^۱ و همکاران^[۱۲] در سال ۲۰۱۴ به بررسی مد شکست و استحکام نهایی اتصال با پین‌های ساخته‌شده به روش تولید افزایشی پرداختند. در همین سال گراهام^۲ و همکاران^[۲۰] اهمیت مشخصه‌های برتر اتصال کاملد شامل مقاومت، خستگی مکانیکی، تحمل آسیب و دوام اتصال را در قالب تست‌های تجربی مورد مطالعه و بحث قرار دادند. در این کار از روش انتقال فلز سرد برای ایجاد برآمدگی بر روی سطح سه قطعه فلز فولاد، آلومینیوم و تیتانیوم استفاده شد.

تنها مطالعه تحلیلی نیز در سال ۲۰۱۲ توسط ژانگ هونجیگان^۳ و همکاران^[۱] با ارائه یک مدل برای تخمین سختی کامپوزیت در اتصال کاملد انجام گرفت که این بررسی اختصاص به هندسه استوانه‌ای پین در اتصال داشت.

۱-۶-۱- خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در تحقیقات انجام گرفته

نتایج حاصله از آزمایش‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجه ویژگی‌های اتصال نسبت به اتصالات مرسوم یا نمونه‌های کنترل هستند، خلاصه این نتایج باوجود تفاوت در روش تولید و شرایط تست‌ها به شرح زیر است:

- افزایش استحکام نهایی اتصال از ۱۱٪ تا ۶۵٪ برابر
- بهبود کرنش در بار ماکزیمم از ۴۷۰٪ تا ۱۰۰۰٪
- بهبود ظرفیت جذب انرژی از ۲۷ برابر تا ۳۰ برابر
- افزایش بار حدی تا ۲۵٪
- بهبود قابل توجه در تحمل آسیب ضربه‌ای
- افزایش مقاومت خستگی با کند شدن رشد ترک با رسیدن به پین‌ها
- تغییر مطلوب در مد شکست و همچنین امکان کنترل آن
- تسهیل در انجام بازرسی اتصال

¹ Parkes

² Graham

³ Zhang Honjigan

⁴ In Plane Properties

آرایه‌های الیاف در امتداد محور x (محور اصلی) به صورت منحنی سینوسی و کسینوسی با فاز یکسان هستند و در امتداد محور y (عمود بر محور اصلی)، همگن می‌باشند.

درجه خمش الیاف به صورت تدریجی در امتداد جهت الیاف تغییر می‌کند. و با کاهش فاصله از پین، افزایش می‌یابد.

الیاف در طی فرآیند کاملد، آزاد هستند و این به این معنی است که می‌توان از کرنش اولیه و یا آسیب در الیاف چشم پوشید.

۲-۱-۲- روابط برای مدل‌سازی تحلیلی انحنای الیاف

با توجه به شبیه‌سازی الیاف مواج [۱] به صورت منحنی‌های سینوسی و کسینوسی، تابع جهت درون صفحه‌ای الیاف را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد [۱]:

$$\varphi(x, y) = \frac{R}{2} \left(1 - \frac{y}{\omega} \right) \sin \left(\frac{2\pi x}{l} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

که در آن:

φ : تابع یا تابع شکل الیاف

R : قطر پین (متر)

زاویه θ بین تانژانت هر نقطه‌ای از الیاف و محور x را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطه قبل به دست آورد [۱]:

$$\tan \theta = \frac{\pi R}{l} \left(1 - \frac{y}{\omega} \right) \cos \left(\frac{2\pi x}{l} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

بنابراین زاویه θ بر حسب λ این گونه تعریف می‌شود [۱]:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\lambda \left(1 - \frac{y}{\omega} \right) \cos \left(\frac{2\pi x}{l} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن:

λ : خمش الیاف، نسبت عدد پی در قطر بر روی l است.

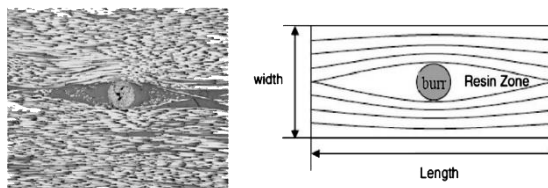
همان‌طور که از شکل ۱۴ پیداست، زاویه θ در موقعیت‌های مختلف، فرق می‌کند که با تحقیقات حقیقی تطابق دارد. و این دلیل تفاوت مقدار حجمی الیاف با تغییر مکان، تغییر می‌کند. با توجه به اینکه آرایه الیاف در امتداد محور y به صورت همگن قرار دارند، مقدار حجمی الیاف تنها به x وابسته است [۱]:

$$V_f(x) = \frac{V_f \omega}{\omega - \frac{R}{2} \sin \left(\frac{2\pi X}{L} - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{R}{2}} \quad (4)$$

که در آن:

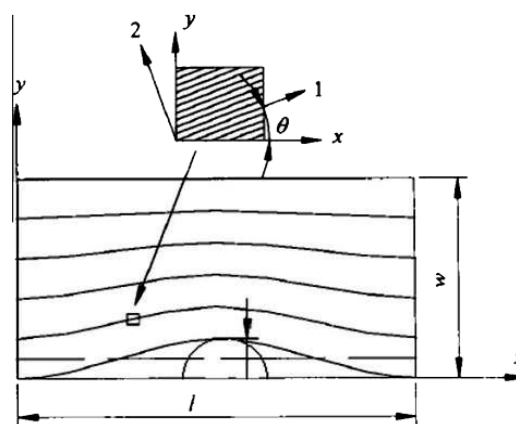
V_f : مقدار حجمی الیاف بعد از فرآیند کاملد

قسمت‌های عادی فرق دارد. و مشخصات درون صفحه‌ای تحت تأثیر پارامترهای پین (از جمله: قطر) قرار می‌گیرند.



شکل (۱۳) میکرو ساختار کامپوزیت بعد از فرآیند کاملد [۱]

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی میکرو ساختار عمومی کامپوزیت بعد از فرآیند کاملد، روشن است که در صورت توزیع پرئودیک پین‌ها بر روی جزء فلزی، آرایه الیاف نیز در جهت‌های مشخص به صورت پرئودیک قرار می‌گیرند؛ بنابراین الیاف موج‌دار را می‌توان با منحنی‌های سینوسی و کسینوسی شبیه‌سازی کرد. به خاطر تقارن موجود، نیمی از این مدل سلول واحد به عنوان المان حجمی نماینده^۱ انتخاب می‌شود. شکل (۱۴) نشان‌دهنده المان حجمی موردنظر است که در آن ω و l مشخص می‌باشند.



شکل (۱۴) شماتیکی از المان حجمی نماینده در تحلیل کامپوزیت در اتصال کاملد [۱]

با توجه به اینکه درجه خمش و میزان حجمی الیاف به موقعیت حساس است، فرض‌هایی برای توسعه مدل هندسی اتصال کاملد به شرح زیر پیشنهاد شد [۱]:

^۱ Representative Volume Element (RVE)

مشخصات الاستیک مؤثر چندلایه کامپوزیتی نیز به وسیله روابط زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱]:

$$E_x = A_{11}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})/h, E_y = A_{22}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})/h$$

$$\nu_{yx} = A_{12}/A_{11}, \nu_{xy} = A_{12}/A_{22}, G_{xy} = A_{66}/h \quad (۴)$$

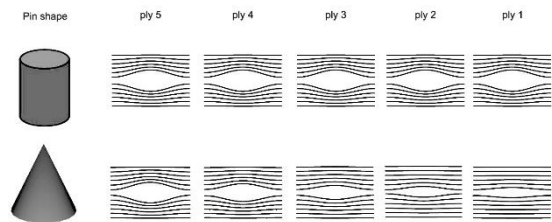
که در آن:

h: ضخامت تک لایه کامپوزیتی

A: ماتریس سختی کششی چندلایه کامپوزیتی

۲-۱-۳- تعمیم مدل تحلیلی برای حالت مخروطی شکل پین

با توجه به اینکه برآمدگی های ایجاد شده در روش حکاکی سطح با بیم الکترونی، در غالب اوقات به صورت مخروطی ایجاد می شوند، می توان روابط تحلیلی برای الیاف انحنادار را برای این حالت به شکل تقریبی، تعمیم داد. شکل (۱۵) نشان دهنده انحنای الیاف در لایه های مختلف و تغییر آن با ارتفاع در دو حالت پین استوانه ای و مخروطی است.



شکل (۱۵) روند کاهش انحنای الیاف و کنار ثابت ماندن آن با افزایش ارتفاع به ترتیب در اتصال کاملد با پین مخروطی و استوانه ای

تابع شکل الیاف در این حالت علاوه بر وابستگی در جهت x، در جهت محور z نیز متغیر است. به این معنی که شعاع مقطع پین با افزایش فاصله از ریشه پین، کاهش می یابد و در پی آن میزان انحنای الیاف کم می شود. بنابراین تابع شکل و مقدار حجمی الیاف در حالت جدید این گونه تعریف می شود:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{R(z)}{2} \left(1 - \frac{y}{\omega}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}z - \frac{\pi}{2}\right) \quad (۱۵)$$

$$V_f^*(x, z) = \frac{V_f^* \omega}{\omega - \frac{R(z)}{2} \sin\left(\frac{2\pi X}{L} - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{R(z)}{2}} \quad (۱۶)$$

با توجه به قاعده هوک برای تک لایه دوبعدی تک جهت [۲۱] وجود پارامتر z و وابستگی مشخصات در یک تک لایه کامپوزیتی به آن در روابط ذکر شده صحیح

V_f^* : مقدار حجمی الیاف قبل از فرآیند کاملد

بر اساس فرض کرنش یکسان و همچنین $V_f(x)$ که از معادله (۴) قابل محاسبه است، مشخصات الاستیک درون صفحه ای برای هر نقطه اتفاقی در المان حجمی به صورت زیر قابل محاسبه است [۱]:

$$E_1(x) = E_{f1}V_f(x) + E_m[1 - V_f(x)] \quad (۵)$$

$$E_2(x) = \frac{E_{f2}E_m}{(1 - V_f(x))E_{f2} + V_f(x)E_m} \quad (۶)$$

$$\nu_{21}(x) = \nu_f V_f(x) + \nu_m [1 - V_f(x)] \quad (۷)$$

$$G_{12}(x) = \frac{G_m G_f}{(1 - V_f(x))G_f + V_f(x)G_m} \quad (۸)$$

$$\nu_{12}(x) = \frac{E_1}{E_2} \nu_{21}(x) \quad (۹)$$

$$\varphi(x, y) = \frac{R}{2} \left(1 - \frac{y}{\omega}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}z - \frac{\pi}{2}\right) \quad (۱۰)$$

که در آن:

E : مدول الاستیک برای دو حالت طولی و عرضی و یا

الیاف و ماتریس

G : مدول الاستیک برشی

ν : ضریب پواسون

m : زیرنویس برای زمینه (ماتریس)

f : زیرنویس برای الیاف

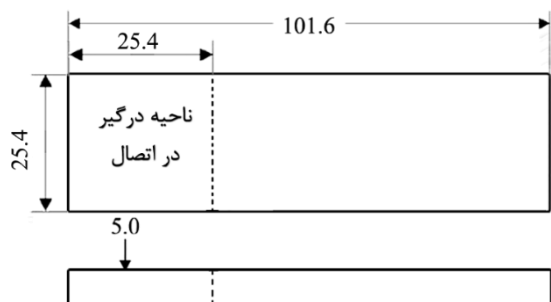
ماتریس سختی^۱ و سختی تغییر یافته^۲ نیز برای لایه ها با زوایای مختلف نیز با روابط زیر قابل محاسبه است، مقادیر عددی ماتریس سختی تغییر یافته، از انتگرال گیری از مقادیر وابسته به طول همین ماتریس به دست می آیند [۱]:

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{E_1(x)}{1 - \nu_{12}(x)\nu_{21}(x)}, & Q_{22} = \frac{E_2(x)}{1 - \nu_{12}(x)\nu_{21}(x)} \\ Q_{12} = \frac{\nu_{21}(x)E_2(x)}{1 - \nu_{12}(x)\nu_{21}(x)} = \frac{\nu_{12}(x)E_1(x)}{1 - \nu_{12}(x)\nu_{21}(x)}, & Q_{66} = G_{12} \\ C_{ij} = \frac{1}{wl} \int_A \bar{Q}_{ij} dA, (i, j = 1, 2, 6) \end{cases} \quad (۱۲)$$

¹ Stiffness

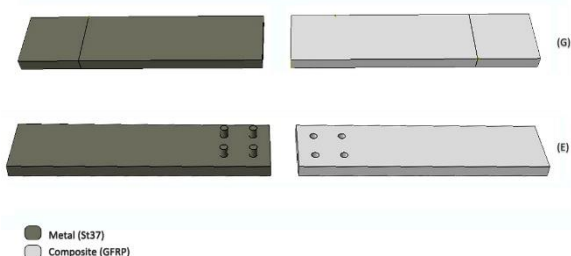
² Transformed Stiffness

آباکوس^۱ و مدل سازی رفتار چسب در آن استفاده شد. ابعاد اتصال مطابق استاندارد ASTM D5868 [۲۲] در نظر گرفته شد؛ هندسه طرفین اتصال شامل ضخامت، طول و عرض قطعات، برای دو قطعه فلزی و کامپوزیتی یکسان می باشد که اطلاعات مربوط به آن در شکل (۱۸) قابل مشاهده است.



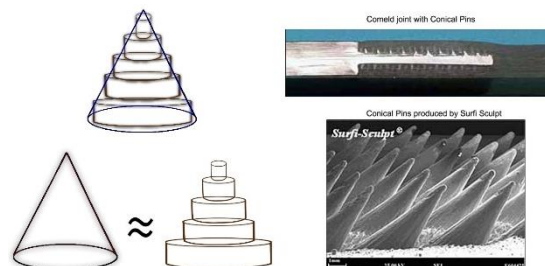
شکل (۱۸) هندسه طرفین اتصال مطابق استاندارد ASTM D5868

هندسه اتصال برای دو حالت شبیه سازی شده به همراه شرایط مرزی و بارگذاری در شکل های (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است. این آزمایش برای دو حالت اتصال چسبی و اتصال کاملد با ۴ پین، انجام گرفت. چند لایه کامپوزیتی به صورت سالیید^۲ و با ۱۰ لایه با آرایش $[45/-45/90/0/45]_s$ مدل سازی شد. به منظور مدل سازی قطعه کامپوزیتی و فلزی از المان ۸ گرهی خطی و سه بعدی C3D8R، و برای مدل سازی لایه چسب ناحیه چسبناک از المان ۸ گرهی و سه بعدی COH3D8 استفاده شد. همچنین بر اساس بررسی قاعده استقلال شبکه برای مش بندی اتصال، اندازه دانه ای معادل ۰,۵ میلی متر برای طرفین اتصال انتخاب شد.

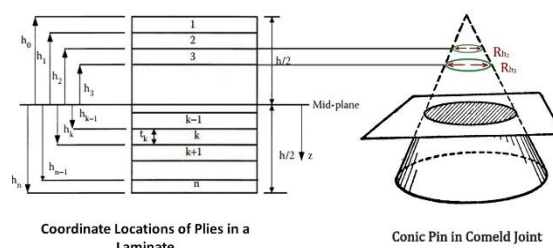


شکل (۱۹) دو حالت مورد آزمایش از اتصال کاملد و چسبی

نیست، بنابراین می بایست برای هر لایه از کامپوزیت در اتصال، یک قطر میانگین به خاطر وجود بین مخروطی شکل در نظر گرفته شود. شکل های (۱۶) و (۱۷) نحوه این مدل سازی تقریبی را نشان می دهند.



شکل (۱۶) بین های مخروطی در مقیاس بزرگ-نحوه مدل سازی بین مخروطی به شکل استوانه هایی با قطرهای متفاوت



شکل (۱۷) موقعیت قطر مؤثر هر لایه مطابق مختصات لایه چینی در کامپوزیت درگیر در اتصال با بین مخروطی

بنابراین با محاسبه یک قطر میانگین برای هر کدام از لایه های کامپوزیت با استفاده از رابطه (۱۷)، به رابطه تغییر یافته (۱۸) برای مقدار حجمی الیاف می رسمیم. این رابطه اساس محاسبه مشخصات سختی درون صفحه ای خواهد بود.

$$\bar{R}_k = \frac{R_{h_k} + R_{h_{k-1}}}{2} \quad (17)$$

$$V_f(x)_k = \frac{V_f^* \omega}{\omega - \frac{\bar{R}_k}{2} \sin\left(\frac{2\pi X}{L} - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{R(z)}{2}} \quad (18)$$

۲-۲- بررسی عددی استحکام کششی

در این بخش به منظور شبیه سازی و بررسی استحکام کششی اتصال کاملد و مقایسه آن با اتصال مرسوم چسبی، از نرم افزار

¹ ABAQUS

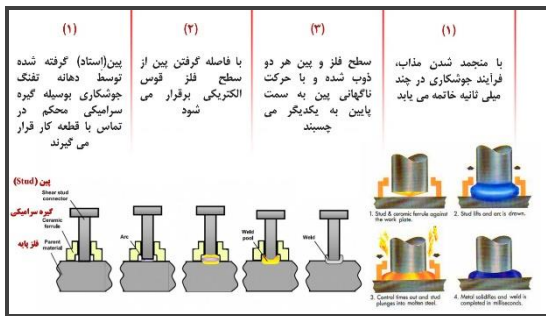
² Solid

۲-۳- تست تجربی کشش اتصال کاملد و چسبی

به منظور بررسی تجربی استحکام کششی اتصال کاملد و چسبی، ۳ نمونه از اتصال ۴ پینی کاملد به همراه ۳ نمونه از اتصال چسبی از جنس فولاد ساختمانی st37 و شیشه اپوکسی آماده شدند که به دلیل آسیب وارده به یکی از نمونه‌های چسبی، نتایج صرفاً برای ۲ عدد از اتصال چسبی ارائه خواهد شد. پین‌های اتصال کاملد نیز با روش استاد ولدینگ^۴ که مشابه روش جوش تصادمی است بر روی قطعه فلزی ایجاد شدند. شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نشان‌دهنده پین‌های ایجاد با این روش و شماتیکی از این فرآیند است.

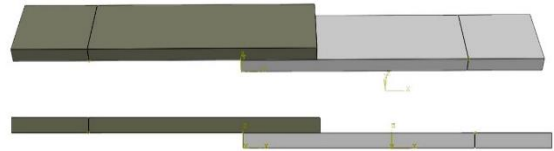


شکل (۲۴) تفنگ مخصوص فرآیند استاد ولدینگ و فرآیند جوشکاری

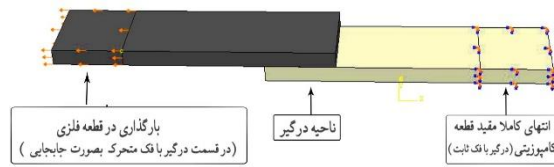


شکل (۲۵) شماتیکی از فرآیند استاد ولدینگ در ۴ مرحله

در فرآیند استاد ولدینگ پین یا پیچ‌ها تنها با قطرهایی متناسب با دهانه تفنگ آن قابل جوشکاری هستند، در کار حاضر به دلیل محدودیت در اندازه دهانه تفنگ جوشکاری از پین‌هایی با قطر ۳ میلی‌متر استفاده شد.

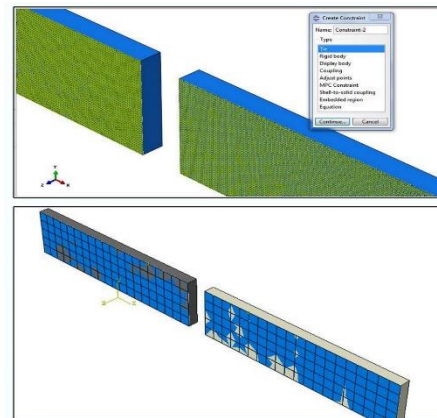


شکل (۲۰) نمای جانبی و سه‌بعدی از اتصال شبیه‌سازی شده

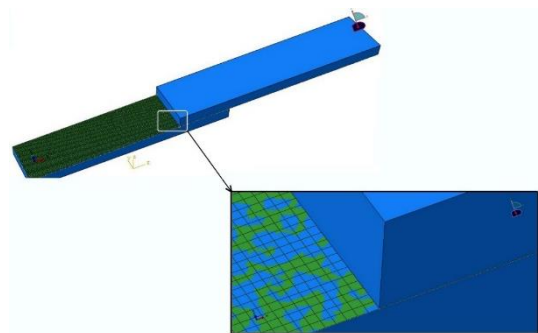


شکل (۲۱) شرایط مرزی و بارگذاری برای نمونه شبیه‌سازی شده

به منظور مدل‌سازی رفتار ناحیه چسبناک^۱، از روش المان پایه ۲ و المان‌هایی با ضخامت صفر^۲ استفاده شد. شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان‌دهنده سطح چسبناک مدل‌سازی شده است.



شکل (۲۲) سطح چسبناک در حال تماس



شکل (۲۳) المان‌های چسبناک با ضخامت صفر در سطح درگیر اتصال

⁴ Stud Welding

¹ Cohesive Zone Modeling

² Element Base Cohesive Behavior

³ Zero Thickness Cohesive Element



شکل (۲۸) نمونه اتصال آماده شده بعد از برش

مشخصات دودسته از نمونه‌های مورد آزمایش و مشخصات مواد مورداستفاده در ساخت اتصال نیز به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول (۱) دسته‌بندی و مشخصات نمونه اتصالات ساخته شده برای تست کشش

تعداد نمونه	تعداد پین	قطر پین (mm)	آرایش پین‌ها	فاصله	
				عرضی (mm)	طولی (mm)
۳	۴	۳	۲×۲	۱۱/۵	۱۱/۵
۳	-	-	-	-	-

جدول (۲) مشخصات مواد مورداستفاده در اتصال برای تست کشش

کامپوزیت		
مدول‌های الاستیسیته برحسب Gpa	فولاد st37	الیاف ۴۰۰ گرمی تک اپوکسی KER 828
مدول الاستیسیته طولی (E_1)	۲۰۵	۲۹
مدول الاستیسیته عرضی (E_2)	۲۰۵	۲۹
درصد حجمی (V_m و V_f)	-	۵۵% / ۴۵%
ضریب پواسون (ν)	۰/۳	۰/۲

به‌منظور قرارگیری مؤثر نمونه‌ها در فک دستگاه کشش و همچنین کاهش میزان گشاور ناشی از هندسه یک‌طرفه اتصال، تب‌هایی از جنس کامپوزیت به دو طرف دو انتهای نمونه‌ها چسبانده شدند و روی آن‌ها سمباده‌هایی با زبری بالا قرار گرفتند. این تب‌ها از جنس کامپوزیت با الیاف شیشه

نمونه‌های کاملد آماده شده بعد از فرآیند استادول‌دینگ در شکل (۲۶) قابل مشاهده هستند.



شکل (۲۶) نمونه قطعه فلزی با پین‌های ایجاد شده به روش استاد ولدینگ

به‌منظور لایه چینی بر روی قطعات فلزی از قالب‌های پلاستیکی استفاده شد و چند لایه کامپوزیتی با ۱۰ لایه با آرایش [45/-45/90/0/45]، به‌صورت لایه چینی دستی بر روی سطح فلز قرار گرفتند. در نمونه‌های کاملد الیاف به‌دقت از دور پین‌ها عبور داده شد. شکل (۲۷) قالب و نحوه جاگیری قطعه فلزی بر روی آن و همچنین ۳ نمونه آماده اتصال کاملد و شکل (۲۸) پین‌های موجود بعد از ایجاد اتصال را در نمونه کاملد را نشان می‌دهند.



عبور الیاف از دور پین در حین لایه چینی دستی
شکل (۲۷) قالب پلاستیکی، لایه چینی دستی و نمونه آماده کاملد

نمونه آماده از اتصال کاملد

مشخصات الاستیک تک لایه کامپوزیتی برای حالت بدون پین و نمونه کاملد با پین ۳ میلی متری بر اساس روابط ارائه شده برای هر یک از حالات، محاسبه شد که در جدول (۳) قابل مشاهده است. جدول (۴) نیز نمایش دهنده نسبت مشخصات سختی الاستیک نمونه کاملد به نمونه غیر کاملد است:

جدول (۳) مشخصات الاستیک تک لایه در حالت کاملد و غیر کاملد

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
غیر کاملد	۱۷/۳	۵/۹	۲/۶۱	۰/۲۵
کاملد	۱۶/۹۶۵۷	۷/۹۲۳۷	۳/۶۵۴۲	۰/۳۶۹۲۵

جدول (۴) نسبت مشخصات سختی الاستیک کاملد به غیر کاملد

	E_{1c}/E_1	E_{2c}/E_2	G_{12c}/G_{12}	ν_{12c}/ν_{12}
	۰/۹۸۰۶۸	۱/۳۴۳	۱/۴۰۰۱	۱/۴۷۷

مشخصات مؤثر الاستیک برای چندلایه کامپوزیتی در سه حالت بررسی شده نیز بر اساس روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه شد که نتایج آن در جداول (۵) و (۶) و (۷) قابل مشاهده است:

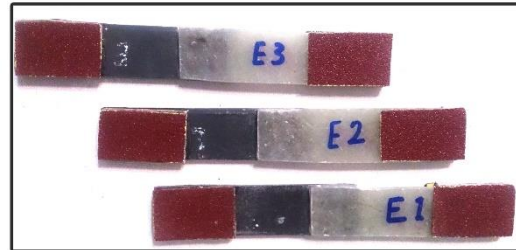
جدول (۵) مشخصات مؤثر سختی الاستیک برای چندلایه

	E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
بدون پین	۹۴/۱۶۱	۹۴/۱۶۱	۴۱/۴۷۶	۰/۲۹۵۲
پین	۱۱۱/۵۸۰	۱۱۱/۵۸۰	۴۵/۱۱۶	۰/۳۲
استوانه‌ای				
پین	۱۱۲/۱۶۰	۴۸۹۴	۴۰/۷۶۹۱	۰/۲۹۱۳
مخروطی		۱۰۱		

جدول (۶) نسبت مشخصات سختی مؤثر چندلایه کاملد با پین استوانه‌ای به غیر کاملد

	E_{1c}/E_1	E_{2c}/E_2	G_{12c}/G_{12}	ν_{12c}/ν_{12}
	۱/۱۸۵	۱/۱۸۵	۱/۰۸۷	۱/۰۸۴

تک جهته و رزین اپوکسی، مشابه طرف کامپوزیتی اتصال ساخته و با استفاده از چسب آهن به انتهای نمونه‌ها و در فاصله ۲۵ میلی متری از انتها، چسبانده شدند. نمونه‌های نهایی در شکل (۲۹) قابل مشاهده است.



نمونه کاملد



نمونه چسبی

شکل (۲۹) آماده‌سازی نهایی نمونه‌ها با چسباندن تب‌های کامپوزیتی

تست‌های کشش توسط ماشین تست یونیورسال WDW-300E انجام گرفت. طبق استانداردهای مرسوم مربوط به کشش اتصالات، نرخ کشش قطعات توسط این دستگاه ۲ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. سر فلزی نمونه‌ها به وسیله فکر ثابت دستگاه و سر کامپوزیتی توسط فک متحرک دستگاه کشش کاملاً درگیر و مهار شدند. شکل (۳۰) شرایط دستگاه تست و قطعه تحت آزمایش را نشان می‌دهد.



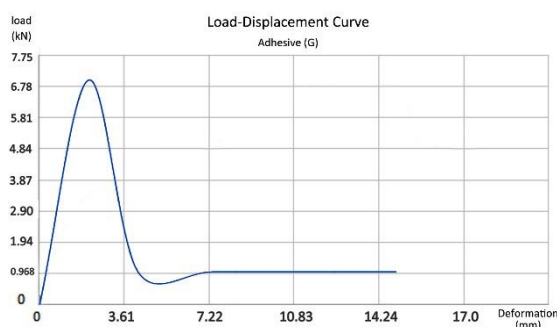
شکل (۳۰) دستگاه تست کشش یونیورسال WDW-300E

۳- بحث و بررسی نتایج

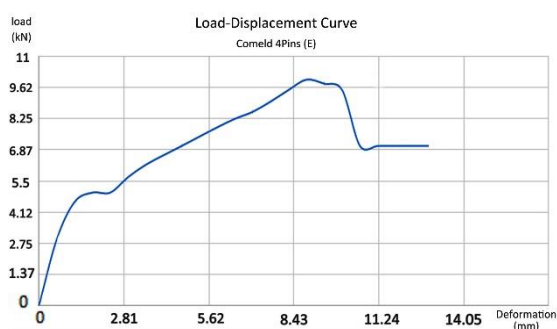
۳-۱- نتایج بررسی تحلیلی سختی کامپوزیت در اتصال کاملد

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی عددی اتصال کاملد و چسبی تحت کشش

این نتایج برای دو نمونه مورد آزمایش در شکل‌های (۳۱) و (۳۲) قابل مشاهده است. زمانی که اتصال کاملاً گسیخته می‌شود، نیروی انتقالی به صفر کاهش می‌یابد که این قسمت از نمودار در شکل‌ها نشان داده نشده است، چراکه با ایجاد اولین افت در گراف، کارایی اتصال، دچار نقص شده و عملاً اتصال، گسیخته در نظر گرفته می‌شود، بنابراین موقعیت دارای اهمیت در نمودارها، صرفاً نقاط بعد از افت نوسان نیرو است که به این ترتیب، نمودار بار-جابجایی در این مقاله، تا قبل از افت کامل نیرو نشان داده شده‌اند. جدول (۸) نیز نشان‌دهنده ماکزیمم بار تحمل شده در هر یک از اتصالات می‌باشد:



شکل (۳۱) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه G



شکل (۳۲) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه E

جدول (۸) استحکام نهایی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای دو نمونه مورد آزمایش

G	E
۷/۰۱	۹/۹۲۸

استحکام نهایی (kN)

بر اساس نتایج به دست آمده نمونه اتصال چسبی، استحکام نهایی معادل ۷,۰۱ کیلو نیوتن است که در مقایسه با

جدول (۷) نسبت مشخصات سختی مؤثر چندلایه کاملد با بین مخروطی به غیر کاملد

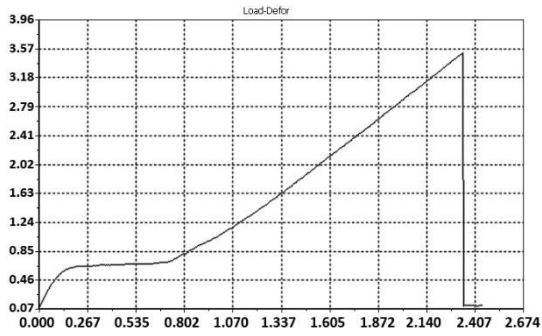
E_{1c}/E_1	E_{2c}/E_2	G_{12c}/G_{12}	ν_{12c}/ν_{12}
۱/۱۹۱	۱/۰۷۷	۰/۹۸۳	۰/۹۸۶

بر اساس نتایج به دست آمده برای مشخصات الاستیک تک لایه کامپوزیتی کاملد و غیر کاملد، مدول الاستیسیته بعد از فرآیند کاملد در جهت الیاف دارای کاهش معادل ۰,۰۲ درصد است، در حالی که در جهت عمود بر الیاف با افزایش ۳۴,۳ درصدی همراه است. مدول برشی و ضریب پواسون نیز به ترتیب افزایشی ۴۰ درصدی و ۴۷,۷ درصدی را نشان می‌دهند. این نتایج را می‌توان به اثر وجود پین و در نتیجه آن فشردگی الیاف در جهت عمود بر الیاف و همچنین کاهش سختی مؤثر در راستای الیاف نسبت داد.

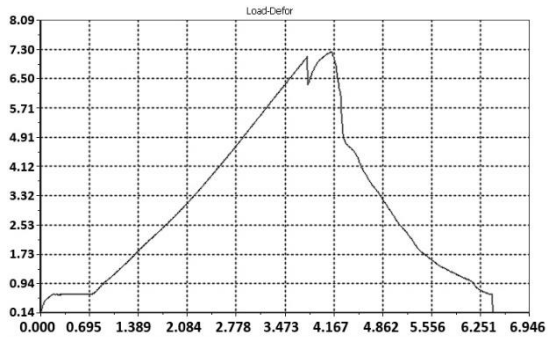
نتایج حاصله از سختی مؤثر چندلایه کامپوزیتی برای سه حالت مورد بررسی قرار گرفته نیز حاکی از تغییرات کمتر در حالت پین مخروطی نسبت به پین استوانه‌ای است. بر اساس این نتایج، تغییرات مدول الاستیسیته در جهت x و y برای حالت استوانه‌ای به صورت یکسان و معادل افزایش ۱۸,۵ درصدی است که این مسئله به علت برابری تعداد لایه‌های صفر درجه و ۹۰ درجه و تقارن در زوایای لایه چینی نسبت به مختصات خارج محوری است. مدول برشی و ضریب پواسون مؤثر نیز دارای افزایشی ناچیز در حالت پین استوانه‌ای است.

در حالت پین مخروطی شکل، سختی مؤثر در راستای x دارای افزایشی معادل ۱۹,۱ درصد و در راستای y با افزایشی ۷,۷ درصدی همراه است. در حالی که سختی برشی مؤثر و ضریب پواسون مؤثر با مقادیر ناچیز کاهش همراه بودند.

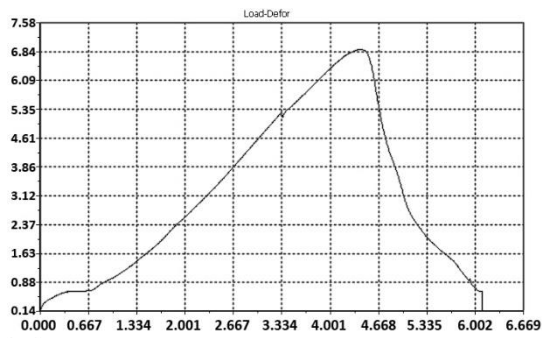
با توجه به نتایج به دست آمده برای سختی مؤثر چندلایه می‌توان نتیجه گرفت حالت پین مخروطی نسبت به پین استوانه‌ای به جز سختی مؤثر در راستای x دارای تغییرات کمتری است و به حالت بدون پین در اتصال غیر کاملد نزدیک‌تر است.



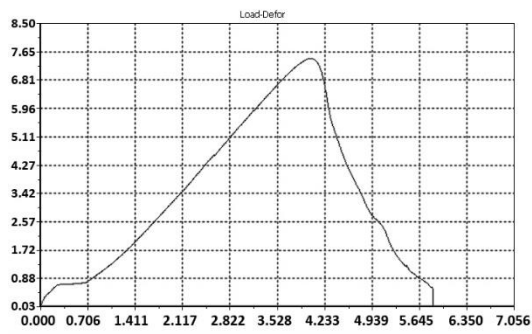
شکل (۳۴) منحنی به دست آمده از تست کشش برای نمونه G2



شکل (۳۵) منحنی به دست آمده از تست کشش برای نمونه E1



شکل (۳۶) منحنی به دست آمده از تست کشش برای نمونه E2



شکل (۳۷) منحنی به دست آمده از تست کشش برای نمونه E3

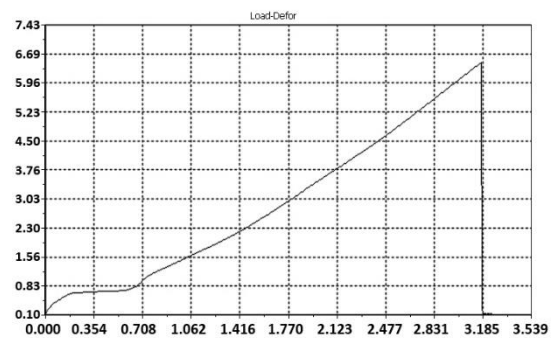
استحکام نهایی نمونه‌های کاملد به ترتیب به میزان ۴۱,۶۳ درصد کمتر است.

روند انتقال نیرو توسط اتصال و افزایش بار در نمونه کاملد شامل دو مرحله است، که مرحله اول شامل افزایش نیرو در چسب تا شروع آسیب در آن و مرحله دوم شامل افت تدریجی در سختی چسب و تحمل نیرو توسط پین‌ها می‌باشد. شیب نمودار نیرو-زمان و نیرو-جابجایی با شروع گسیختگی چسب کاهش یافته تا اینکه اتصال به ماکزیمم نیروی قابل تحمل نزدیک می‌شود.

گسیختگی اتصال در نمونه چسبی به صورت ناگهانی و با افت خطی نیرو همراه است، درحالی که نمونه‌های اتصال کاملد به دلیل درگیر بودن پین با کامپوزیت و گسیختگی تدریجی کامپوزیت تحت تنش لهیدگی، دارای یک افت غیر ناگهانی و چند مرحله است.

۳-۳- نتایج تست کشش تجربی برای دو حالت کاملد و چسبی

همان‌طور که اشاره شده ۳ نمونه از نمونه‌های اتصال کاملد و ۲ نمونه از اتصال چسبی هر کدام به منظور بررسی استحکام کششی مورد آزمایش قرار گرفتند. منحنی نیرو-جابجایی نتیجه شده از تست کشش برای دودسته نمونه در شکل‌های (۳۳) تا (۳۷) قابل مشاهده است، جداول (۹) تا (۱۰) نیز نشان‌دهنده مقادیر بیشینه و میانگین برای نیروی نهایی تحمل شده برای نمونه‌ها می‌باشند:



شکل (۳۳) نمودارهای به دست آمده از تست کشش برای نمونه G1

جدول (۹) نتایج به دست آمده از تست کشش برای نمونه‌های دسته G

G	مقدار ماکزیمم	مقدار میانگین
بار (kN)	۶/۴۴۲	۴/۹۴۶
جابجایی (mm)	۳/۱۸۴	۲/۷۶۲

۴- نتیجه گیری

۴-۱- بررسی تحلیلی

نتایج، نشان‌دهنده تغییر مشخصات سختی الاستیک تک لایه کامپوزیتی در اتصال کاملد نسبت به کامپوزیت در اتصال چسبی بود. بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل با نتایج تحقیق هونجیگان [۱] نیز نشان‌دهنده وابستگی شدید سختی مؤلفه‌های مختلف سختی چندلایه کامپوزیتی در اتصال کاملد به نحوه لایه چینی است، به این ترتیب که تغییر چینش و انتخاب زوایای لایه چینی می‌تواند باعث بهبود و یا تضعیف استحکام چندلایه کامپوزیتی نسبت به حالت غیر کاملد با همان نحوه لایه چینی شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با توجه به بهبود قابل توجه سختی کامپوزیت در راستای عمود بر الیاف و همچنین تضعیف سختی در راستای الیاف به مقدار ناچیز، انتظار می‌رود استفاده از لایه‌های با زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه با تعداد بیشتر نسبت به زوایای کوچک‌تر از ۴۵ درجه، منجر به بهبود استحکام چندلایه شود.

نتایج حاصل از سختی مؤثر چندلایه کامپوزیتی در اتصال کاملد با پین‌های استوانه‌ای و مخروطی نیز با نتایج مربوط به چندلایه کامپوزیتی بدون پین مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت این نتایج نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن مقادیر سختی در حالت پین مخروطی به حالت غیر کاملد، نسبت به حالت پین استوانه‌ای است.

به‌طور کلی با انتخاب مناسب زوایای لایه چینی فرآیند کاملد قابلیت بهبود قابل توجه سختی مؤثر چندلایه کامپوزیتی در دو جهت x و y و همچنین سختی برشی و ضریب پواسون را داراست.

۴-۲- بررسی استحکام کششی در تست تجربی و شبیه-

سازی عددی

نتایج عددی برای اتصال کاملد با ۴ پین نشان‌دهنده افزایش ۴۱،۶۳ درصدی در استحکام نهایی اتصال می‌باشند. این مورد در بررسی تجربی استحکام کششی اتصال دارای

جدول (۱۰) نتایج به‌دست‌آمده از تست کشش برای نمونه‌های دسته E

E	مقدار ماکزیمم	مقدار میانگین
بار (kN)	۷/۴۴۰	۷/۱۸۶
جابجایی (mm)	۴/۴۴۳	۴/۱۸۱

مد شکست غالب در نمونه‌های کاملد، لهیدگی کامپوزیت در ناحیه تماس با پین و جدایش از محل اتصال و خارج شدن پین‌ها از قطعه کامپوزیتی است. شکل (۳۸) نشان‌دهنده یکی از نمونه‌های گسیخته شده در دسته کاملد است. ناحیه سفیدرنگ ایجادشده در اطراف حفره قطعات کامپوزیتی در تمام نمونه‌های کاملد مشاهده می‌شود که نشانگر تنش تکیه‌گاهی و تحمل نیرو توسط پین‌هاست.



شکل (۳۸) نمونه اتصال گسیخته شده با مد شکست غالب

همان‌طور که منحنی‌های استخراج‌شده از تست کشش برای نمونه‌ها نشان می‌دهند، نمونه‌های کاملد دارای یک شکست تدریجی و چندمرحله‌ای هستند، درحالی‌که دو نمونه اتصال چسبی دارای یک شکست ناگهانی هستند که این نوع گسیختگی را گسیختگی مصیبت‌بار^۱ می‌نامند.

مقدار بیشینه مقاومت کششی نهایی در نمونه E نسبت به نمونه‌های اتصال چسبی در دسته G، بیشتر است. این بهبود در مقاومت کششی E به ۱۵،۴۲٪ می‌رسد.

^۱ Catastrophic Failure

وجود دارد، می‌بایست از اتصال ترکیبی برای اتصال فلز به فلز استفاده شود.

۵- فهرست علائم

A	ماتریس سختی چندلایه-سطح انتگرال گیری
C	ماتریس سختی تغییر یافته تک لایه کامپوزیتی
E	مدول الاستیسیته نرمال
f	الیاف
k	شماره لایه
l	طول المان حجمی نماینده
m	ماتریس-زمینه
R	قطر بین
V	مقدار حجمی الیاف
w	عرض المان حجمی نماینده
علائم یونانی	
φ	تابع شکل الیاف
λ	خمش الیاف
θ	زاویه هر نقطه از الیاف در المان حجمی نماینده
v	ضریب پواسون

مراجع

- [1] H. Zhang, W. Wen, and H. Cui, "Study on the strength prediction model of Comeld composites joints," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3310-3317, Dec. 2012.
- [2] E. Nwankwo, "Dynamic Behaviour of Blast Loaded Hybrid Structural Systems," no. March, 2014.
- [3] J. Khodorkovsky and V. Shkolnikov, "Advanced Hybrid Joining Technology Phase I STTR Results," vol. 25, no. 3, 2009.
- [4] V. Di Giandomenico, "Surface structured bonded composite-metal joint," *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1-5, 2014.

مقدار کمتری معادل افزایش ۱۵,۴۲ درصدی است؛ این مسئله را می‌توان به اثر شدید نواحی غنی از رزین در تست تجربی و همچنین دیگر عوامل دخیل در کیفیت اتصال در مراحل ساخت به صورت لایه چینی دستی نسبت داد.

رفتار اتصال چسبی و کاملد نیز در بررسی تجربی و عددی مشابه می‌باشد؛ بر اساس نتایج ذکر شده در هر دو بررسی عددی و تجربی، افت و خیز بار در اتصال چسبی G، تک مرحله‌ای، بدون نوسان و ناگهانی است، در حالی که اتصال کاملد دارای یک روند چندپله‌ای در تحمل و افت بار می‌باشد.

۴-۳- جمع‌بندی و پیشنهادها

در این مقاله بر اساس محدودیت‌های موجود در منابع و امکانات، اتصال کاملد با حداکثر ۴ بین و با قطر ۳ و ۴ میلی‌متر و با "نسبت بین به سطح درگیر" معادل ۴,۵ درصد ایجاد شد و به منظور بررسی موارد مشخص مورد بررسی قرار گرفت. این نسبت از تعداد و قطر بین نسبت به سطح فلز پایه، در مقایسه با تحقیقات صورت گرفته بر روی اتصال کاملد، دارای اختلافی فاحش است. چراکه در تحقیقات تجربی و عددی صورت گرفته بر روی این روش اتصال، با نسبت بین به سطح درگیر مشابه، از بین‌هایی با قطر ۰,۱ تا ۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود برای ایجاد این اتصال از بین‌هایی با قطر کوچک‌تر و تعداد بیشتر استفاده شود.

در نهایت طبق نتایج بدست آمده، و تطابق خوب نتایج تجربی و عددی و همچنین بر اساس نتایج حل تحلیلی، روش کاملد دارای پتانسیل بسیار بالا در اتصال مؤثر انواع فلز و کامپوزیت‌های صنعتی می‌باشد.

تا زمانی که نیازی به دمونتاز سازه وجود نداشته باشد، اتصال کاملد، نسبت به اتصالات مکانیکی، بیشتر مورد توجه خواهد بود. اتصالات ترکیبی کاملد، توانایی خوبی در کاهش وزن در مقایسه با اتصالات پیوندی را نیز دارا هستند. چراکه افزایش کارایی یک اتصال، می‌تواند امکان کاهش اندازه اتصال را فراهم کند. اما در مواقعی که نیاز به دمونتاز سازه

- [15] I. SMENCO, "Aluminium Welding," pp. 1–13, 2014.
- [16] D. Redaktion, "Attachment of Single Contact Parts," *Percuss. Weld.*, vol. 68, pp. 121–132, 2014.
- [17] N. Li, P. H. Chen, X. Y. Liu, W. Ma, and X. C. Wang, "A micro-macro finite element model for failure prediction of Comeld™ joints," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 117, pp. 334–341, 2015.
- [18] C. G. Pickin, S. W. Williams, and M. Lunt, "Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 3, pp. 496–502, 2011.
- [19] X. Wang, J. Ahn, Q. Bai, W. Lu, and J. Lin, "Effect of forming parameters on electron beam Surf-i-Sculpt protrusion for Ti–6Al–4V," *Mater. Des.*, vol. 76, pp. 202–206, 2015.
- [20] D. P. Graham, a. Rezai, D. Baker, P. a. Smith, and J. F. Watts, "The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 64, pp. 11–24, 2014.
- [21] A. K. Kaw and F. Group, *Mechanics of Composite Materials*. 2006.
- [22] Astm D 5868, "Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding," *Standards*, vol. 01, no. Reapproved 2014, pp. 1–2, 2001.
- [5] D. E. Rick Martin, "Reducing Costs in Aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium," *JOM*, 52 (2000), pp. 24-28, 2000.
- [6] W. Tu, "Comeld TM Joints : Optimisation of Geometric Parameters of the Protrusions By," 2011.
- [7] W. Tu, P. H. Wen, P. J. Hogg, and F. J. Guild, "Optimisation of the protrusion geometry in Comeld™ joints," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, pp. 868–876, 2011.
- [8] D. P. Graham, a. Rezai, D. Baker, P. a. Smith, and J. F. Watts, "The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite–metal structures," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 64, pp. 11–24, Sep. 2014.
- [9] F. Smith, "An innovation in composite to metal joining," 2004. [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-an-innovation-in-composite-to-metal-joining/>. [Accessed: 21-Jan-2015].
- [10] W. Xiong, B. Blackman, J. P. Dear, and X. Wang, "The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surf-i-sculpt," *Compos. Struct.*, 2015.
- [11] I. Heatsculptor.eu, "Manufacture of complex surfaces for heat exchange," 2013.
- [12] P. N. Parkes, R. Butler, J. Meyer, and a. de Oliveira, "Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement," *Compos. Struct.*, vol. 118, pp. 250–256, Dec. 2014.
- [13] I. Custompart, "3D Printing, CustomPart," *Nature*, 2008.
- [14] S. Ucsnik, M. Scheerer, S. Zaremba, and D. H. Pahr, "Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 3, pp. 369–374, Mar. 2010.