

Welding Methods for Joining Polymer Nanocomposites in Automobile Applications

Amir Mostafapour¹, Ghasem Naderi^{2*}, Mohammad Reza Nakhaei¹

1. Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 9 June 2016, Accepted: 18 July 2016

Abstract

In recent years, one of the advances made in plastic and composite industries has been the development and commodification of polymer base nanocomposites. Nanocomposites due to their better mechanical, electrical and thermal properties compared to conventional polymers, metals and ceramics have been welcomed by many industries including automobile, ship and aerospace manufacturers. The morphology of polymer and polymer nanocomposites and the optimization of their mechanical, thermal and electrical properties have been investigated by many researchers. Investigation on their weldability is necessary to achieve successful welding process in order to increase their application in industry. This article reviews the methods used for bonding and joining polymers and polymer nanocomposites. Since welding is the best method for joining polymer and polymer nanocomposites, the review, in particular, is focused on various welding methods such as laser process which is currently used in this field. Laser welding processes offer many advantages such as high speed, high density power, easy control and automation, non-contact operation, non-contamination and therefore no subsequent operations, and low heat energy input into the work-piece which causes thin heat affected zone. With all the advantages mentioned above, laser welding is the best process for joining polymer and polymer nanocomposite used in automotive industry.

Keywords

polymer,
nanocomposite,
joining,
laser welding,
automobile

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: g.naderi@ippi.ac.ir

روش‌های جوشکاری برای اتصال نانوکامپوزیت‌های پلیمری به کار رفته در خودرو

بسیارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هفتم، شماره ۱

صفحه ۱۲-۳، ۱۳۹۶

ISSN: 2252-0449

امیر مصطفی پور^۱، قاسم نادری^{۲*}، محمدرضا نخعی^۱

۱- تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مکانیک

۲- تهران، پژوهشگاه پتروشیمی و پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۲۸

چکیده



امیر مصطفی پور



قاسم نادری



محمدرضا نخعی

واژگان کلیدی

پلیمر،
نانوکامپوزیت،
اتصال،
جوشکاری لیزری،
خودرو

از پیشرفت‌های انجام شده در صنعت پلاستیک و کامپوزیت در سال‌های اخیر، توسعه و تجاری‌سازی ساخت نانوکامپوزیت‌های برپایه پلیمر است. نانوکامپوزیت‌ها به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی، الکتریکی و گرمایی مناسب در مقایسه با پلیمرهای معمولی، فلزات و سرامیک‌ها اخیراً بسیار مورد توجه صنایعی چون خودروسازی، کشتی‌سازی و هوافضا قرار گرفته‌اند. در اغلب پژوهش‌های پیشین درباره پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری، شکل‌شناسی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی بررسی شده است. برای افزایش کاربردهای این مواد، بررسی جوش‌پذیری و جوشکاری مناسب آن‌ها لازم است. در مقاله پیش رو، روش‌های اتصال پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری مرور شده و انواع مختلف روش‌های جوشکاری، با توجه به مناسب بودن آن‌ها، بررسی می‌شود. جوشکاری لیزری به دلیل برخورداری از مزایای بسیار به‌عنوان بهترین روش جوشکاری پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری، در صنایع خودروسازی به‌کار برده می‌شود. این مزایا عبارت از سرعت زیاد فرایند، قدرت زیاد، انعطاف‌پذیری فرایند با قابلیت خودکاری و کنترل آسان، غیرتماسی بودن، ناآلودگی و در نتیجه بی‌نیازی از عملیات بعدی و نیز کوچک بودن منطقه متأثر از گرما به علت گرمای اندک وارد شده به قطعه کار است.

مقدمه

نیاز اقتصادی و رو به افزایش سوخت در عرصه‌های مختلف، تقاضا را برای استفاده از مواد جدید سبک‌وزنی مانند پلیمرها افزایش داده است. از طرفی، باتوجه به کم‌تر بودن استحکام پلیمرها در مقایسه با فلزات، تقویت آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. تقویت پلیمرها با مواد متداول سبب لطمه‌خوردن به دو ویژگی اصلی سبکی و آسانی فرایندپذیری آن‌ها می‌شود. از پیشرفت‌های انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه پلاستیک‌ها و مواد کامپوزیتی برپایه پلیمر، دست‌یابی به نانوکامپوزیت‌هایی است که در اثر به‌کاربردن تقویت‌کننده‌های با ابعاد نانومتر (بین ۱۰۰-۱۱۰۰ nm) در ماده پلیمری، بهبود خواص نشان دهند [۱-۳]. نانوکامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده‌اند. فاز اول که در حقیقت پایه یا ماتریس نانوکامپوزیت به شمار می‌رود. این فاز ساختار بلوری دارد و از جنس پلیمر، فلز یا سرامیک است. فاز دوم نیز شامل نانوذراتی است که به‌عنوان تقویت‌کننده (مواد پرکننده) با اهداف خاصی مانند بهبود استحکام، مقاومت، رسانایی الکتریکی و خواص مغناطیسی درون فاز اول (ماده پایه) توزیع می‌شوند [۲-۴]. نایلون ۶ اولین پلیمری بود که شرکت تویوتا در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها به‌کار برد [۵]. اما، امروزه از پلیمرهای گرماسخت مانند اپوکسی، پلی‌آمید و پلیمرهای گرماترم نظیر پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن به‌عنوان ماتریس در نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [۲، ۳-۵].

در بحث نانومواد، نانوکامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. وجود ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولاً باعث ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. در حقیقت، هنگامی که ذرات یا الیاف در ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمالی به کامپوزیت به‌طور یکنواخت به ذرات یا الیاف منتقل می‌شوند. توزیع مواد پرکننده در ماده پایه ویژگی‌هایی را چون استحکام، سختی، خواص سطحی و تخلخل تغییر می‌دهد [۴-۶]. در میان نانوکامپوزیت‌ها، بیشترین توجه به انواع برپایه پلیمر معطوف شده است. زیرا این مواد از خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی برخوردارند. به‌طور کلی، نانوکامپوزیت‌های پلیمری دارای استحکام، پایداری گرمایی، رسانایی الکتریکی و مقاومت شیمیایی زیاد و وزن کم هستند. کاربرد این دسته از کامپوزیت‌ها به‌دلیل برخورداری از خواص منحصر به‌فرد در صنایع خودرو، هوا-فضا و بسته‌بندی مواد غذایی گسترش یافته است [۶، ۷].

استفاده از کامپوزیت‌ها به‌جای فلزات افزون بر ۱۰٪ کاهش وزن خودرو، حدود ۵/۵٪ از مصرف سوخت را نیز کاهش می‌دهد. به‌کاربردن مقدار اندکی نانوذرات (کمتر از ۵٪ وزنی) به‌عنوان

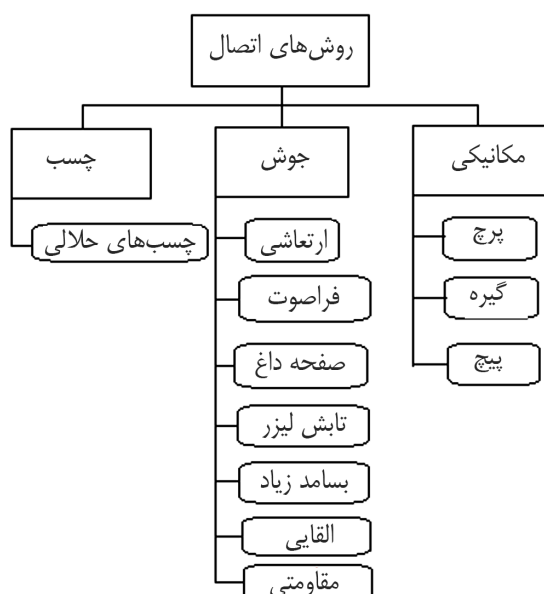
پرکننده در پلیمرها موجب بهبود درخور توجه خواص آن‌ها می‌شود. در پلیمرهایی مانند نایلون ۶، استفاده از پرکننده با این مقدار کم، موجب افزایش ۱۰۰٪ در ضریب یانگ و قابلیت کشسانی و ۱۴۶٪ مقاومت در برابر تغییر شکل بر اثر گرما می‌شود [۷-۹].

از دیگر کاربردهای نانوکامپوزیت‌ها در صنایع خودروسازی می‌توان به استفاده از نانوکامپوزیت خاک رس-نایلون ۶ به‌عنوان روکش نوار زمان‌سنج در ماشین‌های تویوتا اشاره کرد. همچنین، نانوکامپوزیت نایلون ۶ به‌عنوان محافظ در موتورهای شرکت میتسوبیشی نیز استفاده می‌شود. با افزودن نانوذرات خاک رس به لاستیک، خواصی مانند مقاومت سایشی، استحکام مکانیکی و مقاومت گرمایی بهبود می‌یابند و اشتعال‌پذیری و وزن لاستیک کاهش نشان می‌دهند. باتوجه به استفاده روزافزون از قطعات و نانوکامپوزیت‌های پلیمری در خودروسازی و سایر صنایع، نیاز به شناسایی و استفاده از روش‌های اتصال این مواد نیز هرچه بیشتر احساس می‌شود [۷-۱۰].

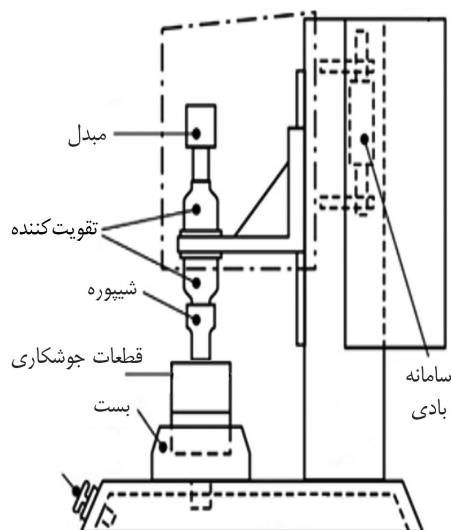
روش‌های مختلف اتصال نانوکامپوزیت‌ها

قطعات مختلف پلیمری را می‌توان با شیوه‌های مختلف به‌هم متصل کرد. به‌طور کلی، این روش‌ها در سه گروه چسباندن نانوکامپوزیت‌ها، اتصال قطعات نانوکامپوزیتی به‌شیوه مکانیکی و جوشکاری و اتصال گرمایی قرار می‌گیرند (شکل ۱) [۱۱، ۱۲].

در روش چسباندن قطعات، پس از پوشاندن سطوح چسباندنی با لایه‌ای از چسب، قطعات روی هم گذاشته می‌شوند و با اعمال



شکل ۱- روش‌های مختلف اتصال پلیمرها و نانوکامپوزیت‌ها [۱۱، ۱۲].



شکل ۲- نمایی از دستگاه جوش فراصوتی پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری [۱۴].

شکل ۲- نمایی از دستگاه جوش فراصوتی پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری [۱۴].
 ۲۰-۴۰ kHz قرار می‌گیرند (شکل ۲). موفقیت جوش به طراحی مناسب اجزا و مناسب بودن موادی بستگی دارد که جوش داده می‌شوند. در شکل ۳، طراحی‌های مختلف قطعات برای جوشکاری فراصوتی نشان داده شده است. در این حالت، گرما از راه اصطکاک سطحی و بین مولکولی در مواد تولید می‌شود. زائده‌هایی که هادی یا گیرنده انرژی نامیده می‌شوند، از قبل روی قطعه قرار می‌گیرند تا هنگامی که انرژی ارتعاشی در این سطوح زائده‌دار متمرکز شد، گرمای اولیه در سطح مشترک ایجاد شود [۱۶-۱۳].

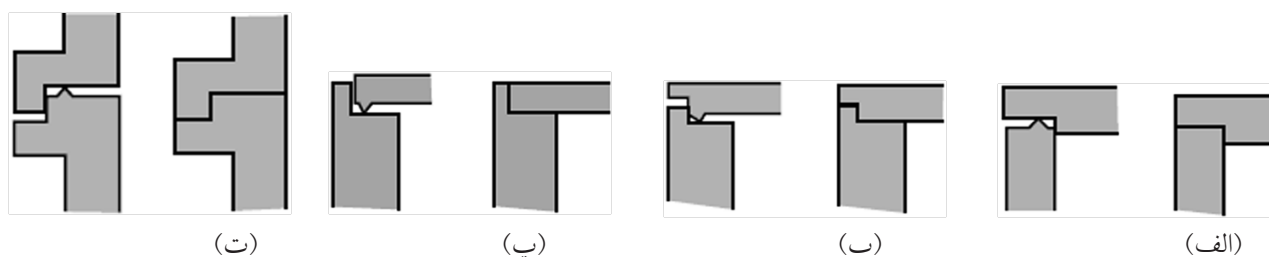
از آنجاکه جوشکاری فراصوتی فرایندی بسیار سریع (در کمتر از ۱ s) با قابلیت خودکاری است، به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. در این روش، برای تضمین سلامت جوش، طراحی مناسب اجزای فرایند، به‌ویژه بست‌ها، لازم است. با طراحی مناسب اجزا، می‌توان از این روش در تولید انبوه استفاده کرد. از مزایای جوشکاری فراصوتی، می‌توان به بازده زیاد، تولید فراوان با قیمت کم، آسانی خودکاری، سرعت زیاد جوش‌دادن و تمیز بودن آن اشاره کرد. مهم‌ترین محدودیت این روش، محدود بودن انرژی به‌کار رفته و

فشار متوسطی آن‌ها را به یکدیگر می‌چسبانند. در هر حالت، نوع چسب به نوع مواد تشکیل‌دهنده قطعات چسبانندنی بستگی دارد. پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های برپایه پلیمر را نیز می‌توان با استفاده از اتصالات مکانیکی مانند پیچ، پرچ، بست، مهره، مفصل و چفت فنری روی هم سوار کرد. مزیت اصلی استفاده از اتصالات مکانیکی در این قطعات آن است که امکان اتصال قطعات ناهم‌جنس وجود دارد. همچنین، افزودن بر مواد گرمانرم، اتصال قطعات ساخته شده از مواد برپایه گرماسخت نیز امکان‌پذیر است. جوشکاری، روش ساده‌ای برای اتصال اغلب مواد از جمله نانوکامپوزیت‌هاست. در این حالت، روش انجام کار مشابه روش جوشکاری فلزات است. اما، استحکام جوش بسته به نوع ماده پایه نانوکامپوزیت‌ها تغییر می‌کند. در نانوکامپوزیت‌هایی که اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها تمایل به تبخیر دارند، نمی‌توان جوش سالمی را به‌دست آورد. زیرا در مدت جوشکاری، به‌واسطه تبخیر این اجزا حباب‌هایی به‌وجود می‌آید که به استحکام جوش لطمه می‌زنند و ظاهر جوش را خراب می‌کنند [۱۴-۱۱]. اتصال گرمایی نانوکامپوزیت‌ها شامل روش‌هایی است که در آن با استفاده از اعمال گرما و فشار می‌توان دو جزء مدنظر را به یکدیگر متصل کرد. تشابه انواع جوشکاری نانوکامپوزیت‌ها در این نکته است که همه از یک بست مشخص برای نگه‌داری قطعات و اعمال فشار به آن‌ها استفاده می‌کنند.

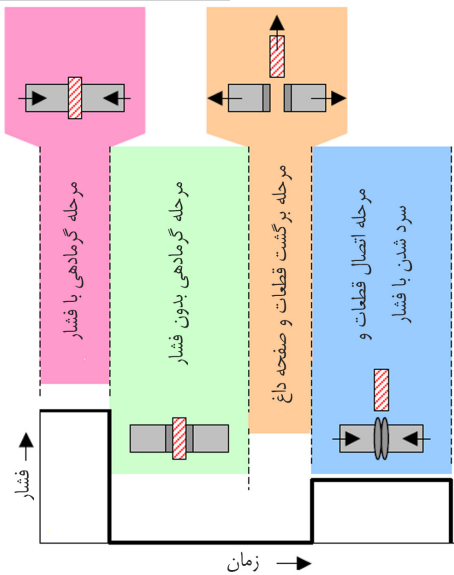
انواع روش‌های جوشکاری نانوکامپوزیت‌های پلیمری

جوشکاری فراصوتی

جوشکاری فراصوتی شامل استفاده از انرژی صوتی با بسامد زیاد برای نرم کردن و ذوب کردن پلیمرها و نانوکامپوزیت‌ها در محل جوش است. براین اساس، قسمت‌های جوش‌دادنی زیر فشار روی هم نگه‌داشته می‌شوند و زیر ارتعاش‌های فراصوتی با بسامد



شکل ۳- طراحی‌های مختلف برای جوش فراصوتی: (الف) با زائده پایینی و لبه رویی، (ب) با زائده رویی و دو لبه، (پ) با زائده رویی و لبه پایینی و (ت) با زائده رویی و دولبه موازی [۱۶].



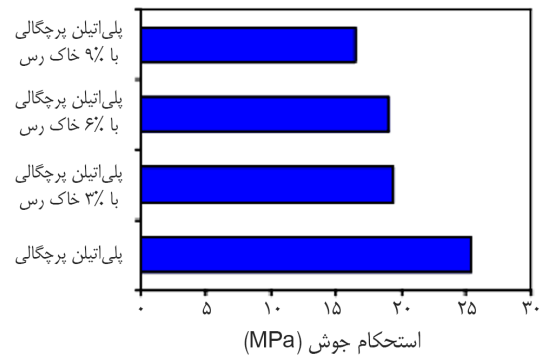
شکل ۵- مراحل جوشکاری با ابزار داغ [۱۹].

وجود آلودگی و گریس روی سطح دو قطعه جوش‌دادنی، بر کیفیت جوش اثر می‌گذارد [۱۳، ۱۸].

در مرحله اول جوشکاری، که دو قطعه در تماس با ابزار داغ قرار می‌گیرند، فشار به‌کار رفته بسیار زیاد است. برای اطمینان از ایجاد تماس کامل میان ابزار و قطعه، سعی می‌شود تا زمانی که قطعات به‌حالت خمیری برسند، با فشار در کنار ابزار داغ قرار گیرند. در مرحله دوم از فشار پشت قطعات کم شده و اجازه داده می‌شود تا لایه‌ای از ماده ذوب شده تشکیل شود. بدین ترتیب، با افزایش زمان تماس، که ۶-۱۰ s است، ضخامت لایه بیشتر می‌شود. در مرحله سوم و پس از ایجاد لایه مذاب، قطعات از صفحه داغ جدا شده و ابزار از بین دو قطعه خارج می‌شود. این زمان نباید خیلی طولانی باشد ($3s <$)، زیرا موجب سرد شدن لایه مذاب می‌شود که بر کیفیت جوش اثر می‌گذارد. در مرحله چهارم، قطعات با فشاری که پشت آن‌ها وجود دارد در کنار هم قرار می‌گیرند تا نفوذ مولکولی در قطعات انجام شده و پس از سرد شدن ناحیه مذاب، اتصال میان آن‌ها ایجاد شود. به‌دلیل ساختار مولکولی پایانی و امکان ایجاد تنش‌های شعاعی در مدت سرد شدن، لازم است تا در این مدت پشت قطعات فشار ثابت باشد. ریزساختار اتصال نیز که بر مقاومت شیمیایی و خواص مکانیکی اثر می‌گذارد، در این مرحله بهبود می‌یابد [۱۵، ۱۸، ۱۹]. مراحل جوشکاری با ابزار داغ در شکل ۵ نشان داده شده است.

پارامترها و کاربردهای جوشکاری با صفحه داغ

از مهم‌ترین پارامترهای جوشکاری با صفحه داغ، دماهای مراحل



شکل ۴- استحکام جوش فراصوتی نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن پرچگالی - خاک رس [۱۷].

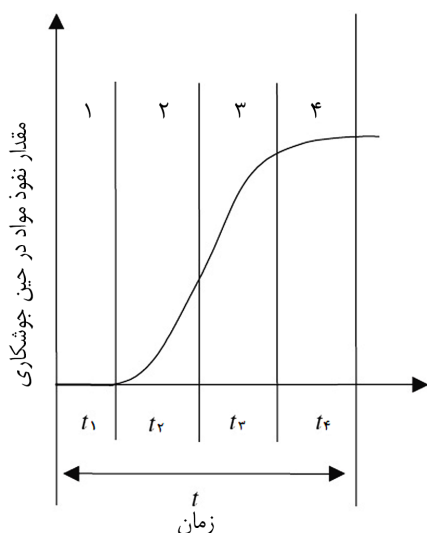
کوچک بودن عرض شیپوره (کمتر از ۲۵۰ mm) است که در نتیجه آن طول جوش به‌وجود آمده کوچک است [۱۳-۱۶].

کاربردهای جوشکاری فراصوتی

از کاربردهای جوشکاری فراصوتی، جوشکاری ساده اتصال‌ها، جاسازی قطعه در قطعه‌ای دیگر همراه با ایجاد اتصال میان آن دو و جوش نقطه‌ای ورق‌ها و صفحه‌های پلاستیکی است. این نوع جوشکاری در صنایعی چون بسته‌بندی، خودروسازی، پزشکی و اسباب‌بازی کاربرد دارد [۱۵، ۱۶]. در جوشکاری فراصوتی نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن پرچگالی-خاک رس، نانوکامپوزیت‌هایی با ۰، ۳، ۶ و ۹٪ خاک رس به‌کار رفت. مشاهده شد، با افزایش درصد خاک رس استحکام جوش کاهش می‌یابد. بدین معنی که استحکام جوش ماده اولیه $25/4 \text{ MPa}$ بوده که با افزایش درصد خاک رس با ترتیب پیش‌گفته، این مقدار به ترتیب به $19/39$ ، $17/65$ و $16/35 \text{ MPa}$ رسیده است (شکل ۴). این نتایج در شرایط ثابت جوشکاری با دامنه نوسان $24/7 \text{ } \mu\text{m}$ ، نیروی جوشکاری $578/2 \text{ N}$ و فروپاشی جوش $0/381 \text{ mm}$ به‌دست آمده است [۱۷].

جوشکاری با ابزار داغ

در جوشکاری با ابزار داغ از صفحه داغ برای ذوب سطح اتصال دو قطعه نانوکامپوزیتی استفاده می‌شود. سپس، صفحه داغ از میان آن‌ها برداشته می‌شود و قطعات با فشار کمی روی هم قرار می‌گیرند تا پیوند مولکولی و دائمی میان دو قطعه ایجاد شود. از صفحه داغ برای اتصال سطوح صاف استفاده می‌شود. درحالی‌که برای سطوح منحنی و پیچیده ابزارهایی به‌کار برده می‌شود که با شکل سطح مطابقت داشته باشند. سطوح اتصال در تماس با ابزار داغ، باید تمیز بوده و از صافی سطح زیادی برخوردار باشند. بدین منظور، تمیزکاری با روش‌های مکانیکی یا شیمیایی انجام می‌شود.



شکل ۷- مراحل انجام فرایند جوشکاری ارتعاشی [۲۱].

هم‌راستا می‌شوند و پلیمر ذوب شده در مدت جوشکاری در اثر فشار به کار رفته، منجمد می‌شود [۱۳]. شکل ۷ مراحل انجام فرایند جوشکاری ارتعاشی را نشان می‌دهد.

در فاز ۱ که در زمان t_1 انجام می‌شود، وجود اصطکاک در سطح مشترک قطعات موجب تولید گرما می‌شود. گرمای تولیدی باعث افزایش دمای پلیمر نانوکامپوزیت تا دمای تغییر به جریان گرانی می‌شود. طی این فاز، نفوذ جوشکاری صفر باقی می‌ماند. در فاز ۲ پلیمر نانوکامپوزیت شروع به ذوب شدن می‌کند و سازوکار تولید گرما نیز افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که پلیمرهای نانوکامپوزیت در جهت‌های جانبی جریان می‌یابند. این موضوع موجب افزایش نفوذ می‌شود. در فاز ۳ ذوب شدن و سرعت جریان به حالت پایا می‌رسد. با این شرایط، جوشی با کیفیت مطلوب می‌تواند ایجاد شود. در فاز چهار حرکت ارتعاشی متوقف می‌شود. اما، به دلیل وجود فشار، نفوذ همچنان ادامه دارد. فشار جوشکاری موجب می‌شود، فیلم مذاب تا زمانی که انجماد اتفاق می‌افتد، جریان داشته باشد [۱۳، ۲۰، ۲۱].

اکثر فرایندهای جوشکاری ارتعاشی در بسامد ۱۴۰-۱۲۰ Hz عمل می‌کنند. اگرچه، از بسامدهای بیشتر نیز می‌توان استفاده کرد. به‌طور معمول، دامنه ارتعاش کمتر از ۵ mm است. البته بسامد و دامنه به کار برده شده به هندسه قطعه کاری جوش‌دانی وابسته است. کل مدت جوشکاری در محدوده زمانی ۱۵-۶ s و فشار لازم ۰/۵-۲۰ MPa انجام می‌شود.

زمان جوشکاری و فشار اعمال شده به نوع ماده جوش‌دانی بستگی دارد. همچنین، این دو عامل بر یکدیگر نیز اثر می‌گذارند. بدین معنی که با افزایش فشار، زمان جوشکاری کاهش می‌یابد. بیشترین استحکام در حالتی به وجود می‌آید که کمترین فشار اعمال

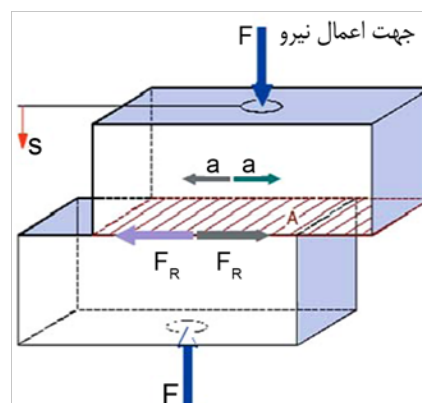
جدول ۱- استحکام نانوکامپوزیت‌های پایه و جوش یافته پلی‌پروپیلن- خاک رس با صفحه داغ [۱۹].

نوع استحکام (MPa)	خاک رس (%wt)		
	۰	۳	۶
استحکام ماده پایه	۲۴/۲	۲۵/۱	۲۶/۱
حداکثر استحکام جوش	۲۲/۶	۱۹/۹	۱۶/۲

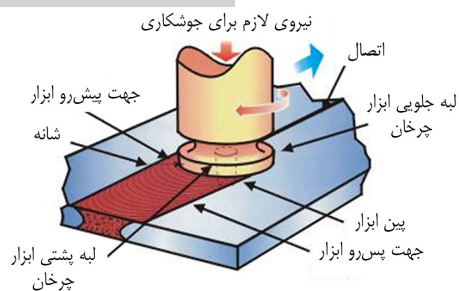
اول و دوم، فشار مرحله اول، زمان‌های گرمادهی و خارج کردن صفحه داغ و فشار در مراحل سوم و چهارم است. در روش جوشکاری با صفحه داغ که روی ماده نانوکامپوزیتی پلی‌پروپیلن- خاک رس انجام شد، از نانوکامپوزیت‌های با ۰، ۳ و ۶٪ خاک رس استفاده شده است. بدین ترتیب مشاهده شد، با افزایش درصد خاک رس استحکام جوش کاهش یافته است. بر اساس جدول ۱، استحکام جوش ماده اولیه ۲۲/۶ MPa بوده است که با افزایش ۳ و ۶٪ خاک رس، استحکام جوش به ۱۹/۹ و ۱۶/۲ MPa تغییر می‌کند. این نتایج در شرایط ثابت جوشکاری با دمای صفحه داغ ۲۲۰°C، زمان گرمادهی ۱۲/۵ s و فشار جوشکاری در مرحله آخر ۱۳۸ kPa به دست آمده است [۱۹].

جوشکاری ارتعاشی

از جوشکاری ارتعاشی نیز برای اتصال قطعات نانوکامپوزیتی استفاده می‌شود. در این روش، دو قطعه اتصال‌یابنده با فشار در تماس با هم قرار می‌گیرند. یکی از قطعات ثابت است و دیگری به موازات سطح مشترک دو قطعه با بسامد مناسب ارتعاش می‌یابد. بدین ترتیب، گرمای کافی در اثر اصطکاک مکانیکی و تنش برشی در سطح مشترک دو قطعه تولید می‌شود و ذوب و ترکیب پلیمرها اتفاق می‌افتد (شکل ۶). پس از توقف حرکت ارتعاشی، قطعات



شکل ۶- نمایی از فرایند جوش ارتعاشی نانوکامپوزیت‌های پلیمری [۲۰].



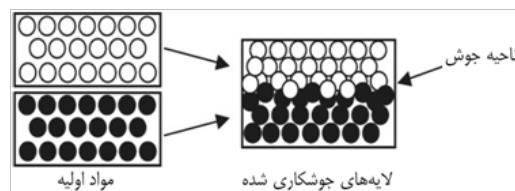
شکل ۹- نمایی از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی [۲۴].

جامد نیز نام برده می‌شود، زیرا در آغاز کار سوراخی ایجاد شده و در ادامه پر می‌شود که در انتها اثر آن باقی می‌ماند. در شکل ۹ نمونه و ابزار این نوع جوشکاری نشان داده شده است [۱۵، ۲۳، ۲۴].

از مزایای جوشکاری مزبور می‌توان واپیچش کم حتی در جوش‌های با طول زیاد، خواص مکانیکی بسیار مناسب در آزمون‌های کشش، خستگی و خمش، نداشتن خلل و فرج، انقباض اندک، امکان انجام در اکثر وضعیت‌های جوشکاری، بازده انرژی زیاد، استفاده از ابزار غیرمصرفی و بی‌نیاز بودن از سیم پرکننده و گاز محافظ را نام برد. از کاربردهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی می‌توان به صنایع کشتی‌سازی و دریایی، هوایی، راه‌آهن و حمل‌ونقل زمینی اشاره کرد [۲۳-۲۶]. در سال ۲۰۰۴، یوسف‌پور و همکاران پژوهش‌هایی درباره جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی انجام دادند و انواع روش‌های جوشکاری کامپوزیت‌های گرمانرم را بررسی کردند. این گروه در سال ۲۰۱۴، قابلیت کاربرد جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی را در نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن-اتیلن پلی‌پروپیلن دی‌مونومر با نانوذرات خاک رس بررسی کردند و آزمون‌هایی را با هدف تعیین اثر پارامترهایی چون سرعت دورانی، خطی و دمای شانه بر استحکام اتصال، انجام دادند. نتایج آزمون‌ها نشان داد، همه پارامترهای فرایند بر استحکام جوش اثرگذارند. افزایش مقدار خاک‌رس در مواد پایه، استحکام کششی این مواد را افزایش می‌دهد. اما، موجب کاهش استحکام کششی جوش آن‌ها می‌شود، به طوری که در نمونه‌های با ۰، ۳ و ۶٪ خاک رس، استحکام کششی جوش به ترتیب ۹۴، ۸۰ و ۶۱٪ مواد پایه است [۱۳، ۲۴-۲۶].

جوشکاری لیزری

جوشکاری لیزری از روش‌های نوین جوشکاری است که برای اولین بار در دهه ۱۹۷۰ با جوش لیزری کربن دی‌اکسید ابداع شد. در سال ۱۹۸۸، Nakamata جوشکاری لیزری عبوری را ارائه داد که امروزه به سبب کیفیت، سرعت و قابلیت کنترل آن به‌طور



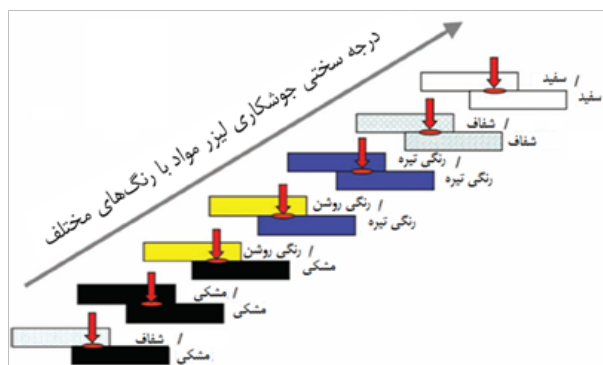
شکل ۸- نمایی از فشردگی پلیمر در ناحیه جوش جوشکاری ارتعاشی [۲۲].

شود و ضخامت لایه مذاب بیشتر باشد. در جوشکاری ارتعاشی نانوکامپوزیت‌ها، بهبود استحکام جوش می‌تواند به سبب افزایش فشردگی نانوذرات تقویت‌کننده در ناحیه جوش باشد که به ایجاد کسر حجمی زیاد ذرات در این منطقه منجر شده است (شکل ۸) [۲۰، ۲۲].

از مهم‌ترین مزایای جوشکاری ارتعاشی می‌توان قابلیت استفاده از آن را برای اتصال انواع گرمانرم‌ها و کامپوزیت‌ها برشمرد. سرعت زیاد تولید، چرخه زمانی به نسبت کوتاه، قابلیت جوشکاری چند قطعه به‌طور هم‌زمان، مناسب بودن برای اتصال قطعات با ابعاد کوچک تا متوسط و سادگی کنترل فرایند از دیگر ویژگی‌های این روش است. با وجود این، جوشکاری ارتعاشی برای اتصال قطعات نامسطح مناسب نیست و موجب جابه‌جایی و واپیچش در سطح مشترک می‌شود. همچنین ابزارهایی با قابلیت کنترل مناسب محدوده وسیعی از بسامد، دامنه و فشار، گران قیمت هستند. بیشترین کاربرد جوشکاری ارتعاشی در صنایع خودروسازی و لوازم خانگی است [۲۰، ۲۲].

جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی

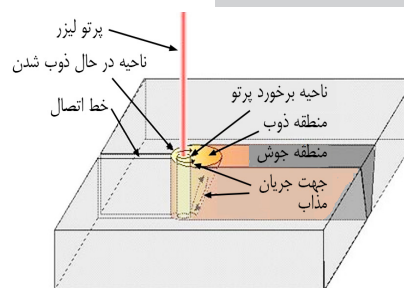
انجمن جوشکاری انگلستان فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی را در سال ۱۹۹۱ به عنوان روش جدید جوشکاری به ثبت رساند. این روش در حالت جامد و بدون ذوب کامل انجام می‌شود. امروزه این روش برای جوشکاری بسیاری از مواد، به ویژه آلیاژهای آلومینیم، به کار می‌رود. در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی از ابزار چرخان استفاده می‌شود. بدین منظور، دو قطعه محکم در کنار هم قرار داده شده و ابزار چرخان به درون قطعه نفوذ می‌کند. مواد درون قطعه در اثر حرکت دورانی و خطی ابزار و وجود اصطکاک میان سوزن و شانه ابزار با قطعه، گرم می‌شوند و جریان مذاب بدون رسیدن به دمای ذوب، شکل می‌گیرد. در اثر حرکت خطی و دورانی ابزار در حوضچه مذاب، اغتشاش نیز ایجاد می‌شود. پس از خارج شدن ابزار، جریان مذاب منجمد شده و دو قطعه به هم جوش می‌خورند. از این روش، به عنوان روش جوشکاری سوراخ کلیدی در حالت



شکل ۱۲- درجه بندی سختی جوشکاری لیزری پلیمرها [۲۸].

جوشکاری لیزری به دو روش جوشکاری با کربن دی اکسید و جوشکاری لیزری عبوری (transmission laser welding) انجام می شود. در جوشکاری لیزری عبوری از لیزرهای دیود مستقیم یا لیزر ضربه ای نیوبیم یا قوت استفاده می شود. از آنجا که در این روش، بخش زیادی از انرژی مصرف شده در سامانه به گرما تبدیل می شود، باید به سامانه خنک کننده مجهز باشد. پلاستیک ها لیزر کربن دی اکسید را به دلیل داشتن طول موج بیشتر ($10/6 \mu m$) نسبت به لیزر نیوبیم یا قوت ($1/06 \mu m$) سریع تر جذب می کنند. بدین ترتیب، اتصالات به سرعت ایجاد می شود. پرتو هایی که با لیزر نیوبیم یا قوت و لیزر دیود تولید می شوند، سرعت جذب کمتری دارند، اما برای جوش لیزر عبوری مناسب هستند [۲۷-۲۹]. در این روش، لازم است یکی از قطعات، نور لیزر را عبور داده و دیگری آن را جذب کند تا انرژی پرتو به طور دقیق روی اتصال تمرکز یابد. همچنین، می توان پوشش ماتی را در سطح ایجاد کرد تا انرژی لیزر را جذب کند.

جوشکاری لیزری عبوری در مقایسه با جوشکاری کربن دی اکسید، امکان جوشکاری قطعات ضخیم تر را نیز دارد. همچنین، از آنجا که منطقه گرم شده به منطقه اتصال محدود است، هیچ اثری روی سطح قطعه برجا نمی ماند. پارامترهای مؤثر در جوشکاری لیزری عبارت از توان یا قدرت لیزر، سرعت لیزر، نسبت جریان گاز خنثی، مقدار فاصله کانونی و فشار جوشکاری هستند. در جوشکاری لب به لب با لیزر کربن دی اکسید، گرما نرم هایی مانند پلی پروپیلن و پلی اتیلن پرچگالی با ضخامت $6/25 \text{ mm}$ ، توان لیزر، سرعت جوشکاری و نیز جریان گاز خنثی اثری بر استحکام جوش ندارند. در حالی که، افزایش اندازه فاصله کانونی از روی قطعات، موجب افزایش استحکام جوش می شود تا جایی که جوشی با استحکام ماده اولیه را می توان به دست آورد. با ازدیاد فاصله نقطه کانونی، محدوده تمرکز لیزر افزایش می یابد. این موضوع موجب



شکل ۱۰- نمایی از جوشکاری لب به لب با لیزر [۲۷].

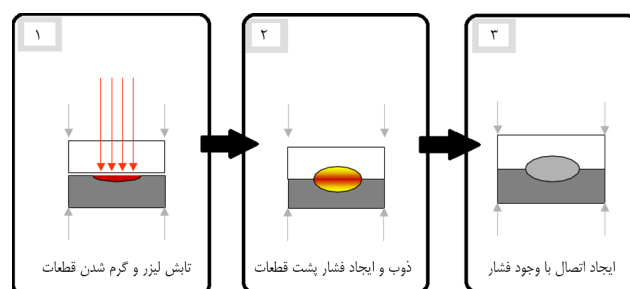
گسترده در صنعت به کار گرفته می شود [۲۷].

جوشکاری لیزری نانوکامپوزیت های پلیمری

جوشکاری لیزری، فرایند اتصال قطعات با کمک انرژی گرمایی ناشی از تقویت موج تک فام لیزر است. لیزر با برخورد به سطح اتصال، موجب ذوب پلیمر در ناحیه اتصال می شود. به دلیل وجود فشار پشت قطعات در ناحیه ذوب، قطعات درهم فرو رفته و اتصال ایجاد می شود.

چگالی قدرت لیزر ورودی و درصد گرمای سطحی جذب شده به وسیله پلیمر پایه، تعیین کننده قابلیت برش یا انجام عملیات جوشکاری روی پلیمر است. برای انجام فرایند، پس از جفت شدن قطعات در کنار هم، پرتو لیزر غیرمتمرکزی خط اتصال را جارو می کند. شدت این پرتو به اندازه ای است که پلیمر را در خط جوش دچار گسستگی می کند. پلیمر متلاشی شده در فصل مشترک دو قطعه وارد می شود. در این لحظه، اعمال فشار بر موضع جوشکاری فرایند را کامل می کند. فشار می تواند به طور پیوسته در مدت فرایند یا پس از ذوب قطعات اعمال شود (شکل ۱۰) [۱۳، ۲۷].

در جوش لب روی هم، لازم است قطعه اولیه (روی) را شفاف و قطعه ثانویه (زیرین) را مات انتخاب کرد تا انرژی لازم برای گرمایش سطح مشترک از پرتو لیزر دریافت شود (شکل ۱۱). شکل ۱۲ درجه بندی سختی جوشکاری لب روی هم گرما نرم ها- نانوکامپوزیت های پلیمری را نشان می دهد [۲۷، ۲۸].



شکل ۱۱- مراحل جوش لیزری لب روی هم نانوکامپوزیت های پلیمری [۲۷].



شکل ۱۳- نمونه قطعات جوش داده شده خودرو [۸،۱۳،۲۷].

نتیجه‌گیری

جوشکاری لیزری از روش‌های جوشکاری است که به دلیل مزایای متعدد مانند سرعت زیاد، بهره‌وری افزوده، انعطاف‌پذیری مناسب، هزینه تعمیر و نگهداری کم و داشتن جوشی با کیفیت و استحکام زیاد کاربرد درخور توجهی در صنعت خودروسازی دارد. برای نمونه در موتور، چرخ‌دنده‌ها، صندلی‌ها، کلید و بسیاری قسمت‌های دیگر از این روش برای اتصال قطعات استفاده می‌شود. بنابراین، امروزه وسیله نقلیه‌ای را نمی‌توان یافت که در آن از جوش لیزر استفاده نشده باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از مواد پلیمری، به‌ویژه نانوکامپوزیت‌ها، در صنایع خودروسازی افزایش یافته است، به‌گونه‌ای که بسیاری از صنایع خودروسازی در پی ساخت خودروهای نانوکامپوزیتی بازیافت‌پذیر هستند. در نتیجه برای اتصال قطعاتی از خودرو که از گرمانرم‌ها، کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری تشکیل شده‌اند، جوش لیزری روش مناسبی است. در این راستا، می‌توان از جوش لیزری عبوری، دیودی یا کربن دی‌اکسید استفاده کرد.

ذوب بیشتر پلیمر و تخریب آن در ناحیه جوش می‌شود. در نتیجه، استحکام جوش افزایش می‌یابد. در حالی که، برای به‌کاربردن فشار روی قطعات حالت بهینه وجود دارد و اعمال فشار بیشتر و کمتر از آن مقدار موجب کاهش استحکام جوش می‌شود [۲۸،۳۰]. در جوشکاری لیزری عبوری لب روی هم پلی‌اتر اترکتون، افزایش توان سبب افزایش استحکام می‌شود. ولی در اثر افزایش سرعت تا محدوده مشخصی، استحکام ثابت باقی می‌ماند و پس از آن کاهش پیدا می‌کند. در این نوع جوشکاری اثر فاصله کانونی به شکل حالت بهینه است، بدین معنی که با فاصله کانونی بیشتر و کمتر از این مقدار از استحکام جوش کاسته می‌شود. افزایش عامل فشار روی قطعات اثر چندانی بر استحکام قطعات ایجاد نمی‌کند. از مزایای جوشکاری لیزری می‌توان به سرعت زیاد این فرایند، انجام‌پذیر بودن در مکان‌های دسترسی‌ناپذیر، قابلیت زیاد ماشین‌شدن، بی‌نیاز بودن از گاز محافظ و جریان قوی برق در هنگام جوشکاری، باریک‌بودن منطقه متأثر از جوشکاری و بی‌نیاز بودن از تمیزکاری پیش و پس از فرایند اشاره کرد [۲۹،۳۰]. شکل ۱۳ نمونه قطعات خودرو را نشان می‌دهد که با روش‌های مختلف جوشکاری به هم متصل شده‌اند.

مراجع

- Hidayah I.N., Mariatti M., Ismail H., and Kamarol M., Evaluation of PP/EPDM Nanocomposites Filled with SiO_2 , TiO_2 and ZnO Nanofillers as Thermoplastic Elastomeric Insulators, *Plast. Rubber Compos.*, **44**, 259-264, 2015.
- Firouzbakht M., Ghoreishy M., and Naderi G., Parameter Determination and Experimental Verification of Bergström-Boyce Hysteresis Model for Rubber Compounds Reinforced By Carbon Black Blends, *Mater. Des.*, **53**, 457-465, 2014.
- Kharazmkia M., Naderi G., Ghoreishy M.H.R., and Shokoohi S., An Investigation into Elastomer Nanocomposites Based on BR/EPDM/Organoclay, *Rubber Chem. Technol.*, **86**, 299-312, 2013.
- Esmizadeh E., Naderi G., Ghoreishy M., and Bakhshandeh G., Optimal Parameter Design By Using Taguchi Method for Mechanical Properties of NBR/PVC Nanocomposites, *Iran. Polym. J.*, **20**, 587-596, 2011.
- Taghizadeh E., Naderi G., and Dubois C., Rheological and Morphological Properties of PA6/ECO Nanocomposites, *Rheol. Acta*, **49**, 1015-1027, 2010.
- Naderi G., Lafleur P.G., and Dubois C., The Influence of Matrix Viscosity and Composition on the Morphology, Rheology,

- and Mechanical Properties of Thermoplastic Elastomer Nanocomposites Based on EPDM/PP, *Polym. Compos.*, **29**, 1301-1309, 2008.
7. Pandey J.K., Reddy K.R., Mohanty A.K., and Misra M., *Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application*, Vol. A: Layered Silicates., Springer, Berlin, 511-537, 2014.
8. Daneshpayeh S., Ashenai Ghasemi F., Ghasemi I., and Ayaz M., Predicting of Mechanical Properties of PP/LLDPE/TiO₂ Nanocomposites by Response Surface Methodology, *Composites Part B*, **84**, 109-120, 2016.
9. Abdel-Goad M., Rheological Characterization of Melt Compounded Polypropylene/Clay Nanocomposites, *Composites Part B*, **42**, 1044-1047, 2011.
10. Andideh M., Naderi G., Ghoreishy M.H.R., and Soltani S., Nanocomposites Based on NR/SBR: Effects of Nanoclay and Short Nylon Fiber on the Cure Characteristics and Thermal Properties, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **52**, 1016-1024, 2013.
11. Tavakoli S.M., Pullen D.A., and Dunkerton S.B., A Review of Adhesive Bonding Techniques for Joining Medical Materials, *Assembly Autom.*, **25**, 100-105, 2005.
12. Reitz W.E. and Oman R.M., How to Join Plastics, *Adv. Mater. Process.*, **158**, 49-52, 2000.
13. Yousefpour A., Hojjati M., and Immarigeon J.P., Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **17**, 303-341, 2004.
14. Villegas I.F. and Palardy G., Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composite Coupons for Mechanical Characterization of Welded Joints Through Single Lap Shear Testing, *J. Visualized Exp.*, **108**, 2016, Doi:10.3791/53592.
15. Amancio S.T. and dos Santos J.F., Joining of Polymers and Polymer-Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1461-1476, 2009.
16. Vendan S.A., Chinnadurai T., Senthil Kumar K., and Prakash N., Investigations on Mechanical and Structural Aspects of Ultrasonic Hybrid Polymer Mixture Welding for Industrial Applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, Doi: 10.1007/s00170-015-7773-z.
17. Flowers S., Thomas J., Mokhtarzadeh A., and Benatar A., Study of Ultrasonic Welding of HDPE - Based Nanoclay Composite, *Annual Technical Conference*, North Carolina, 7-11 May, 2189 - 2193, 2006.
18. Taskiran E., Sayer S., Ozes C., Yeni C., and Ulker A., Effect of Process Parameters and Talc Ratio on Hot Plate Welding of Polypropylene, *Materialwiss. Werkstofftech.*, **46**, 860-872, 2015.
19. Mokhtarzadeh A. and Benatar A., Experiments in Hot Plate Welding of Polypropylene Nanocomposite, *Annual Technical Conference*, Chicago's Navy Pier, 16-20 May, 1168-1172, 2004.
20. Pal K., Panwar V., Friedrich S., and Gehde M., An Investigation on Vibration Welding of Amorphous and Semicrystalline Polymers, *Mater. Manuf. Process.*, **31**, 2016, DOI: 10.1080/10426914.2015.1019111.
21. Chung Y.M. and Kamal M.R., Morphology of PA-6 Vibration Welded Joints and its Effects on Weld Strength, *Polym. Eng. Sci.*, **48**, 240-248, 2008.
22. Bates P.J., Braybrook C., Kisway T., Tucker B., Gopakumar T.G., and Pagé D.J.Y.S., Vibration Welding Polypropylene based Nanocomposites, *Annual Technical Conference*, Chicago's Navy Pier, 16 - 20 May, 1128- 1131, 2004.
23. Azarsa E. and Mostafapour A., Experimental Investigation on Flexural Behavior of Friction Stir Welded High Density Polyethylene Sheets, *J. Manuf. Process.*, **16**, 149-155, 2014.
24. Elangovan K. and Balasubramanian V., Influences of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA6061 Aluminium Alloy, *Mater. Design*, **29**, 362-373, 2008.
25. Mishra R.S. and Mab Z.Y., Friction Stir Welding and Processing, *Mater. Sci. Eng., R*, **50**, 1-78, 2005.
26. Rezaei G.R. and Mostafa Arab N.B., Investigation on Tensile Strength of Friction Stir Welded Joints in PP/EPDM/Clay Nanocomposites, *Int. J. Eng. Trans. B*, **28**, 1382-1391, 2015.
27. Acherjee B., Misra D., Bose D., and Venkadeshwaran K., Prediction of Weld Strength and Seam Width for Laser Transmission Welding of Thermoplastic using Response Surface Methodology, *Opt. Laser Technol.*, **41**, 956-967, 2009.
28. Casalinoa G. and Ghorbelb E., Numerical Model of CO₂ Laser Welding of Thermoplastic Polymers, *J. Mater. Process. Technol.*, **207**, 63-71, 2008.
29. Nakhaei M.R., Mostafa Arab N.B., and Naderi G., Application of Response Surface Methodology for Weld Strength Prediction in Laser Welding of Polypropylene/Clay Nanocomposite, *Iran. Polym. J.*, **22**, 351-360, 2013.
30. Nakhaei M.R., Mostafa Arab N.B., Naderi G., and Hoseinpour M., Experimental Study on Optimization of CO₂ Laser Welding Parameters for Polypropylene-Clay Nanocomposite Welds, *J. Mech. Sci. Technol*, **27**, 843-848, 2013.