جلد ۲، شماره ۱، خرداد ۹۴، ص‌ص ۲۳- ۳۲

نشریه علوم و فناوری

کامپوزیـــت

http://jstc.iust.ac.ir

مطالعه پالتروژن گرمانرم برای تولید محصول لوله‌ای با استفاده از پیش‌آغشته‌ها

مهرداد توتونچی [۱]، محمد گلزار [۲*]، امیرحسین بهروش [۲]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳، m.golzar@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: آبان ۹۳

پذیرش: اسفند ۹۳

کلیدواژگان:

پالتروژن

قالب پالتروژن گرمانرم

آغشتگی

پیش‌آغشته‌ها

چکیده

پالتروژن یک فرآیند تولید پیوسته برای ساخت قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف ممتد و با مقطع ثابت است. این فرآیند معمولا برای ساخت کامپوزیت‌های با پایه پلیمری گرماسخت به‌کار می‌رود. در سال‌های اخیر پالتروژن کامپوزیت‌های گرمانرم نیز توسعه یافته و سهم بالایی از قطعات پالترود شده را به‌خود اختصاص داده‌اند. ویژگی گرمانرم‌های پالترود شده، چقرمگی و ضربه‌پذیری بالا، قابلیت بازیافت، استحکام کششی بالا به‌دلیل استفاده از الیاف ممتد و مقاومت خمشی بالا می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی پارامترها و انتخاب مقادیر مناسب پارامترها برای طراحی و ساخت قالب پالتروژن برای تولید پروفیل لوله‌ای پالترود شده کامپوزیتی و دستیابی به محصولی پیوسته، با ویژگی‌هایی هم‌چون صافی سطح قابل قبول، هندسه یکنواخت، آغشتگی مناسب الیاف تقویت‌کننده و زمینه پلیمری می‌باشد. بدین منظور ابتدا پیش‌آغشته‌های مفتولی از الیاف پیوسته شیشه و پلی‌اتیلن با چگالی بالا با شرایط مختلف تولید شده است. کسر حجمی الیاف، کسر حجمی حباب اندازه‌گیری شده و عکس‌های میکروسکوپی برای بررسی کیفی آغشتگی تهیه شده‌اند. در نهایت با انتخاب بهترین پیش‌آغشته، پروفیل لوله‌ای به‌کمک قالب طراحی شده خاص که امکان تولید لوله با پیش آغشته‌های مفتولی را فراهم می‌کند، تولید شده است. همچنین از نمونه‌های تولید شده آزمایش مکانیکی خمش سه نقطه‌ای نیز گرفته شد.

Investigation of Thermoplastic Pultrusion for Tubular Product Production Using Prepregs

Mehrdad Tutunchi, Mohammad Golzar*, Amir Hossein Behravesh

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

Keywords

Pultrusion
Thermoplastic pultrusion die
Impregnation
Prepregs

Abstract

Pultrusion is the continues process for production of composite constant cross section profiles that reinforced by continues unidirectional fibers or fabrics. Usually this process is used for production of thermoplastic composites. Recently pultruded thermoplastic composites are considered. Pultruded Thermoplastic composites are considered because high resistance to impact, high tensile strength, Recyclability and high strength of bending. Objective of this paper is the investigation of production parameters and determine of these Parameter values to die design and production of tubular pultruded composite and achieving to valid product with Acceptable surface roughness, uniform geometry and good impregnation between thermoplastic resin and glass fiber. For this purpose, first wire prepreg has been produced from Glass fiber continuous roving and high density polyethylene (HDPE) granules in deferent production parameters. Volume fraction of voids and glass contents measured in each prepreg and impregnation was investigated from microscopic photos qualitatively. Finally, choosing the best prepreg, tubular profile produced using pultrusion die that designed specifically to help production of tubular profile from Prepared prepreg. Also, the three point bending mechanical test was performed from the samples produced.

۱- مقدمه

در طول دهه‌های گذشته گرمانرم‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته و بلند شناخته شده است [۱-۴]. خواص کششی و ضربه را می‌توان با الیاف تقویت کننده افزایش داد. با الیاف پیوسته و بلند تقویت کننده اثر این خواص، قویتر و زیادتر می‌شود [۵-۸]. در فرایند پالتروژن گرمانرم، الیاف آمیخته شده[1] و

1. Commingled

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Tutunchi, M. Golzar, M. and Behravesh, A. H. "Investigation of Thermoplastic Pultrusion for Tubular Product Production Using Prepregs" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 2, No. 1, pp. 23-32, 2015.

Archive of SID

www.SID.ir

پیش‌آغشته گرمانرم از میان قالب کشیده می‌شود تا محصول نهایی به‌دست آید [۹-۱۲].

قالب، قلب فرایند پالتروژن محسوب می‌شود. اعمال حرارت و فشار در قالب موجب شکل‌گیری قطعه می‌گردد [۱۳]. فرایند پالتروژن گرمانرم شبیه پالتروژن گرماسخت می‌باشد. مهمترین تفاوت آشکار میان رزین گرماسخت و گرمانرم در این نکته نهفته است که اولی واکنش شیمیایی دارد، ولی در دومی فرآیند ذوب و کریستالیزه شدن صورت می‌گیرد و فرآیند تنها با گرما و فشار و به سرعت انجام می‌شود [۹-۱۲].

در فرایند پالتروژن گرمانرم، طول قالب برعکس گرماسخت خیلی کمتر است، چرا که زمان تولید قطعه در این فرایند کوتاه‌تر می‌باشد [۱۴،۱۵]. در طراحی قالب‌های گرماسخت قسمت‌های مخروطی معمولا ۲ تا ۵ درصد طول کل قالب است، در حالی که در مواد گرمانرم طول قسمت مخروطی به خاطر اینکه مواد بتوانند به تراکم و تثبیت لازم برسند بیشتر است، چرا که عمل چسبیدن پیش‌آغشته‌ها با رسیدن ماده به مقطع مخروط قالب شروع شده و تا هنگامی که محصول از قالب خارج شود عمل به هم پیوستن و شکل‌گیری محصول ادامه پیدا می‌کند [۱۴].

در این تحقیق، به بررسی عوامل موثر بر طراحی مناسب قالب پالتروژنی، ساخت پیش‌آغشته‌های الیاف شیشه و پلیمر گرمانرم و نیز استفاده از پیش‌آغشته‌ها در تولید محصول لوله‌ای، مطالعه شده است. یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی فرایند پالتروژن گرمانرم، آغشتگی پایین الیاف به واسطه بالا بودن گرانروی[1] مواد گرمانرم می‌باشد. برای حل این مشکل ابتدا الیاف شیشه در فرایند جداگانه‌ای با زمینه پلیمری آغشته شده و یک محصول پیش‌آغشته با قطر کم تولید می‌شود و سپس، از پیش‌آغشته‌های گرمانرم تولید شده برای ساخت محصول لوله‌ای به کمک قالب پالتروژن استفاده شد. بنابراین مقاله در دو قسمت، شامل: ۱) ساخت پیش‌آغشته‌ها و ۲) پارامترهای مهم در طراحی قالب پالتروژن لوله‌ای و اثر آنها بر روی محصول تولیدی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱- تولید محصول پیش‌آغشته

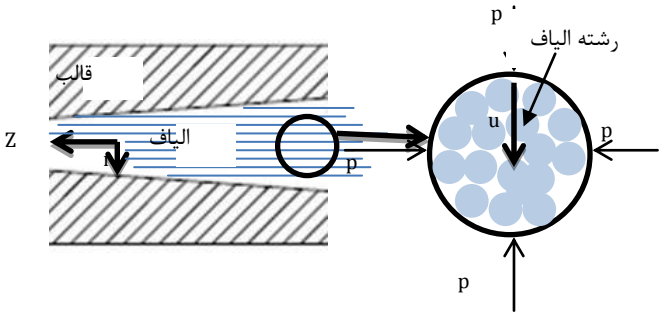
آغشته‌سازی می‌تواند به عنوان عبور جریان مایع از طریق یک ساختار متخلخل در نظر گرفته شود. سرعت جریان، u، با قانون دارسی داده می‌شود (رابطه ۱) [۷].

$$u = \frac{dZ}{dt} = \frac{K}{\eta}\frac{dP}{dZ} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، k ضریب نفوذپذیری رووینگ، η مقدار گرانروی، $\frac{dP}{dZ}$ تغییر فشار در طول Z است. ضریب نفوذپذیری تابعی از قطر الیاف، کسر حجمی الیاف و جهت جریان است که می‌توان از معادله کارمن- کازنی[2] محاسبه کرد (رابطه ۲) [۷].

$$K_{ii} = \frac{{r_f}^2}{4k_{ii}}\frac{(1-V_f)^3}{{V_f}^2} \qquad (۲)$$

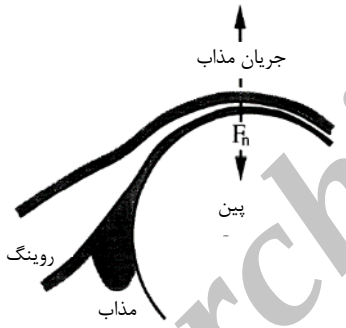
در این رابطه r_f شعاع الیاف، V_f کسر حجمی الیاف، K_{xx} ثابت کارمن- کازنی در جهت طولی و K_{zz} در جهت شعاعی است [۷]. شکل ۱ شماتیکی از حرکت الیاف درون قالب و نحوه نفوذ پلیمر در قالب را نشان می‌دهد. جهت حرکت الیاف در این شکل در راستای z، و نفوذ و فشار در راستای r، می‌باشد. حرکت در راستای r، باعث فشارهای وارده P، از طرف قالب به الیاف و زمینه پلیمری شده و این عمل باعث بالا رفتن سرعت جریان u، و نفوذ پلیمر در الیاف می‌شود.



شکل ۱ شماتیک حرکت الیاف و نحوه نفوذ پلیمر

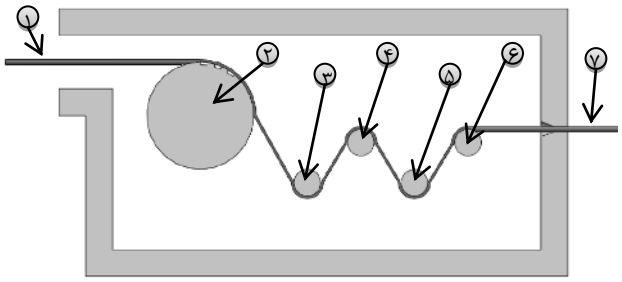
عوامل موثر بر آغشته‌سازی مناسب الیاف پیوسته با مذاب گرمانرم به عواملی چون، کسر حجمی حباب، قطر رشته‌ها و جهت‌گیری الیاف، رفتار رئولوژیکی سیال و نیروها و فشارهای وارده به سیال و الیاف پیوسته وابسته می‌باشد [۱۶].

یک راه آغشته‌سازی خوب برای دسته الیاف پیوسته به کمک پین شناخته شده است [۵-۸]. با توجه به شکل ۲ نیروهای اصطکاک یا پیش کشش وارده بر رووینگ، موجب ایجاد تنش نرمال در پین شده، و همین مساله باعث جریان یافتن مذاب بین رووینگ و پین می‌شود که دارای اثر مثبت بر روی آغشته‌سازی می‌باشد [۷، ۸، ۱۷، ۱۸].



شکل ۲ شماتیک وضعیت الیاف بر روی یک پین [۷،۱۸]

شماتیک قالب استفاده شده برای آغشته کردن پیش‌آغشته‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

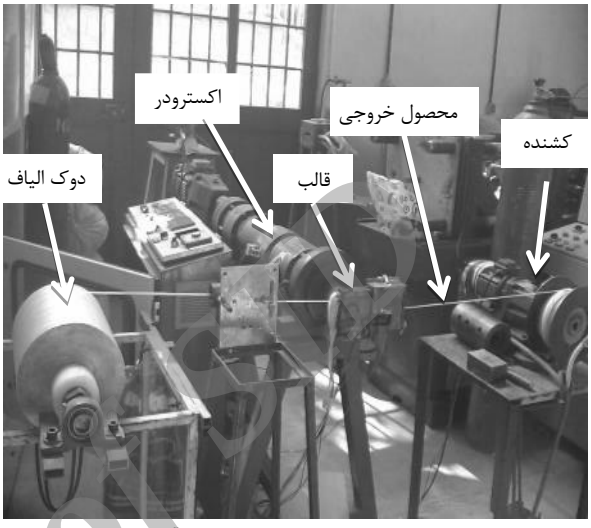


شکل ۳ شماتیک قالب استفاده شده (۱: الیاف ورودی، ۲،۳،۴،۵ و ۶: پین‌ها، ۷: محصول خروجی)

1 .Viscosity
2. Carman -Kozeny

Archive of SID
www.SID.ir

محل ورود مذاب در شکل ۳ از روی شیارهای موجود در روی پین بزرگ (پین شماره ۲) است که دارای سه شیار می‌باشد. الیاف بعد از ورود به قالب، ابتدا با پین بزرگ برخورد می‌کند و پس از آن از روی چهار پین (۵،۴،۳ و ۶)، به قطر ۱۰ میلیمتر که به صورت یک در میان نسبت به هم قرار دارند عبور می‌کند و سپس از قسمت اصلی قالب به قطر ۲ میلیمتر که اندازه کننده اصلی پیش‌آغشته می‌باشد عبور کرده و خارج می‌شود. در شکل ۴ همه اجزاء مربوط به تولید محصول پیش‌آغشته نشان داده شده است.



شکل ۴ اجزاء مربوط به تولید محصول پیش‌آغشته

۱-۲- مواد استفاده شده برای تولید پیش‌آغشته‌ها و آزمایش‌های انجام شده روی پیش‌آغشته‌ها

مواد استفاده شده در این تحقیق پلی‌اتیلن با چگالی بالا، گرید ۵۶۲۰ محصول شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب[1] $13\frac{gr}{10min}$، و الیاف شیشه ۲۴۰۰ تکس (گرم بر کیلومتر)، که هر دسته الیاف شامل ۴۲۰۰ رشته الیاف با قطر ۱۷ میکرون می‌باشد. پارامترهایی که بر حسب آنها آغشته‌سازی بررسی و اندازه‌گیری شده است عبارتند از:

۱- دمای قالب
۲- سرعت کشش الیاف روینگ
۳- استفاده و عدم استفاده از دمنده برای خنک کاری

برای بررسی آغشته‌سازی روش‌های مستقیم و غیر مستقیم توصیه شده است [۱۶]. در این تحقیق [۱۹] به دو روش مستقیم، یعنی درصد حجمی حباب و عکس‌های میکروسکوپی، آغشتگی پیش‌آغشته‌ها بررسی شده است. طراحی آزمایش به صورت همه حالت‌ها[2] انجام شد. آزمایش‌ها با سه دمای قالب، دو سرعت کششی و در حالت وجود و عدم وجود خنک‌کاری، در ۱۲ حالت مختلف بررسی شدند (جدول ۱).

در این آزمایش‌ها هدف تولید محصولی با حداقل درصد حجمی حباب می‌باشد. درصد حجمی حباب یکی از عوامل مهم در آغشتگی مناسب الیاف می‌باشد. آغشتگی خوب محصول، در خواص مکانیکی تاثیر مستقیمی دارد. به طوری که با ۱ درصد حباب، خواص کامپوزیت ساخته شده ۲ تا ۱۰ درصد کاهش پیدا می‌کند [۲۰].

1 . Melt flow index
2 . Full factorial

اندازه‌گیری حباب طبق استاندارد ASTM D2734 محاسبه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های گرفته شده، آزمایش شماره ۱۰ بهترین آزمایش از نظر درصد حجمی حباب انتخاب و برای تولید محصول لوله‌ای شکل استفاده شد.

جدول ۱ آزمایش‌های انجام شده و درصد حجمی حباب محاسبه شده

شماره نمونه	دمای قالب (°C)	سرعت کشش (mm/s)	خنک کننده	V_v (%)
۱	۱۶۰	۵،۰۲	ندارد	۸،۵۱ ±۰،۰۱
۲	۱۶۰	۵،۰۲	دارد	۱۵،۲۹ ±۰،۰۱
۳	۱۶۰	۱۰،۰۵	ندارد	۸،۱۷ ±۰،۰۵
۴	۱۶۰	۱۰،۰۵	دارد	۱۲،۰۵ ±۰،۰۷
۵	۱۷۵	۵،۰۲	ندارد	۴،۸۶ ±۰،۰۴
۶	۱۷۵	۵،۰۲	دارد	۲۰،۱۲ ±۰،۰۴
۷	۱۷۵	۱۰،۰۵	ندارد	۶،۹ ±۰،۰۷
۸	۱۷۵	۱۰،۰۵	دارد	۱۷،۲۵ ±۰،۰۱
۹	۱۹۰	۵،۰۲	ندارد	۱۰،۱۱ ±۰،۰۹
۱۰	۱۹۰	۵،۰۲	دارد	۱،۷۷ ±۰،۰۲
۱۱	۱۹۰	۱۰،۰۵	ندارد	۱۹،۲۱ ±۰،۱۷
۱۲	۱۹۰	۱۰،۰۵	دارد	۱۶،۶۵ ±۰،۰۶

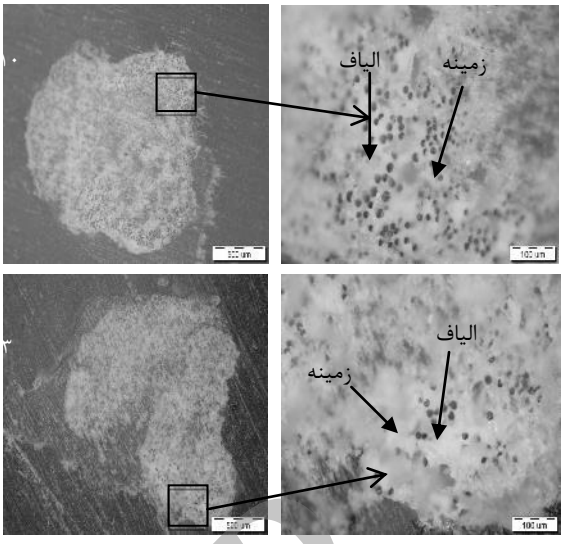
در این آزمایش، دمای قالب ۱۹۰ درجه سانتیگراد و سرعت کششی ۵،۰۲ میلیمتر بر ثانیه در حالت استفاده از دمنده برای خنک‌کاری می‌باشد. یعنی بیشترین دمای انتخابی با کمترین سرعت کششی منجر به تولید محصولی با کمترین درصد حجمی حباب شد.

افزایش دما باعث کاهش گرانروی مذاب می‌شود که این موضوع با توجه به حداقل سرعت استفاده شده، منجر به نفوذ بیشتر زمینه پلیمری و آغشتگی بهتر و حباب کمتر در محصول تولیدی می‌شود. این موضوع در گزارش‌های قبلی[۷،۸،۱۷،۱۸] برای محصول پیش‌آغشته گزارش شده بود، و در اینجا نیز مشاهدات مشابهی به‌دست آمد.

علاوه از محاسبه درصد حجمی حباب، عکس‌های میکروسکوپی نیز برای بررسی آغشتگی و نحوه پراکندگی الیاف داخل زمینه تهیه شد. عکس میکروسکوپی آزمایش شماره ۳ و ۱۰ در حالت مقایسه‌ای، در شکل ۵ نشان داده شده است. از نظر پخش‌شدگی الیاف، هر چقدر محصول آغشته شده دارای پراکندگی یکسان بین رشته‌های الیاف باشد بر روی خواص مکانیکی محصول نهایی تاثیر مثبت و مستقیمی دارد. چرا که محصول دارای زمینه کافی و فصل مشترک مناسب با رشته‌های الیاف خواهد شد. در این شکل الیاف و زمینه در هر نمونه نشان داده شده است.

همچنان‌که از تصویر نیز مشخص است، نمونه شماره ۱۰ نسبت به شماره ۳ دارای توزیع خوب الیاف و همچنین نفوذ پلیمر داخل توده الیاف را نشان می‌دهد. همچنین درصد حجمی الیاف برای نمونه‌های پیش‌آغشته در حدود ۴۰ درصد محاسبه شد.

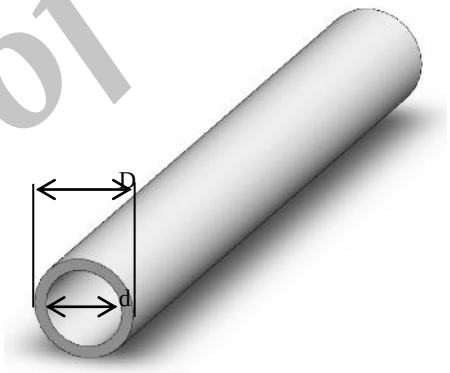
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۵ مقایسه عکس‌های میکروسکوپی نمونه شماره ۳ و ۱۰ با بزرگنمایی ۵۰۰ و ۱۰۰ برابر

۲- قالب و طراحی آن برای محصول لوله‌ای

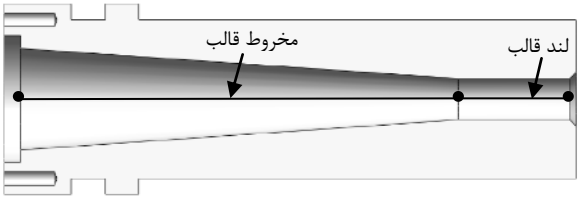
قالب پالتروژن، برای محصولی با هندسه لوله‌ای شکل، با قطر داخلی (d) ۱۰ میلیمتر و قطر خارجی (D) ۱۳ میلیمتر طراحی شد (شکل ۶).



شکل ۶ محصول لوله‌ای شکل (D=13mm و d=10mm)

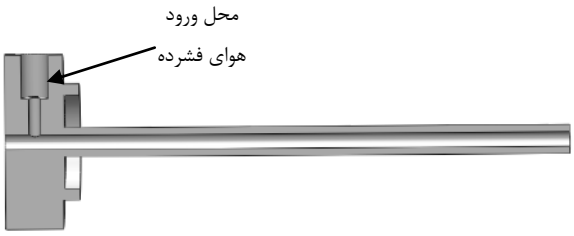
قالب‌های گرمانرم استفاده شده برای تولید محصولات پالتروژنی گرمانرم باید مخروطی بلندتر از لند قالب داشته، و همچنین با زاویه کم باشد. مخروط بلند و زاویه کم مخروط برای نفوذ بهتر رونینگ‌های پیش‌آغشته و همچنین تشکیل فصل مشترک مناسب، در نظر گرفته می‌شود. برای طراحی قالب پالتروژن، طول مخروط در حدود ۴ برابر لند قالب و در حدود ۱۳۰ میلیمتر و زاویه مخروط نیز تقریبا ۴ درجه در نظر گرفته شد.

قالب در دو بخش مجزا، نری و مادگی طراحی شد. نری و مادگی در داخل هم قرار گرفتند و با پیچ و راهنمای موجود روی قالب نسبت به یکدیگر هم‌مرکز شدند. در شکل ۷ بخش مادگی قالب نشان داده شده است.



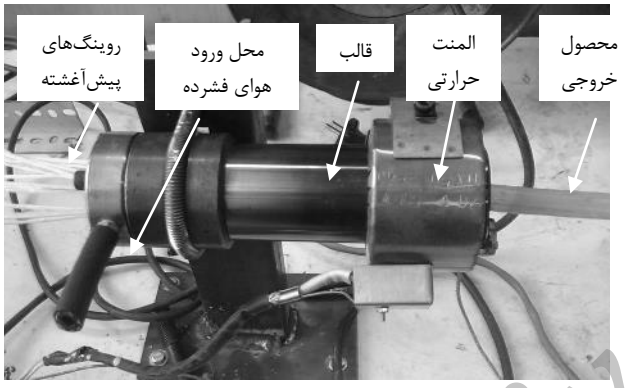
شکل ۷ بخش مادگی قالب [۲۱]

شکل ۸ نیز قسمت نری قالب می‌باشد.



شکل ۸ بخش نری قالب [۲۱]

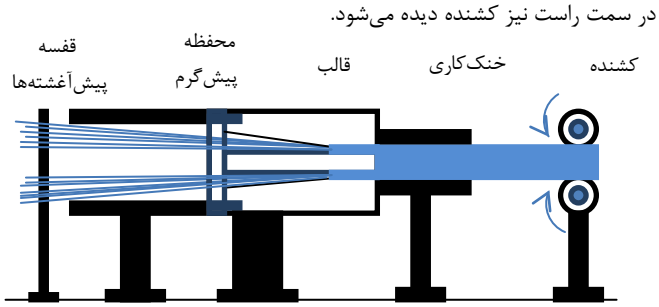
عمل اندازه کردن و خنک‌کاری داخل محصول همچنانکه از شکل ۸ نیز مشخص است بعد از خروج محصول از قالب تا وقتی که تولید به صورت مستمر ادامه دارد، می‌باشد. یعنی بدین منظور می‌باشد که محصولی را که در حالت خمیری از قالب خارج می‌شود را به اندازه مورد نظر رسیده و خنک‌کاری کند. در شکل ۹ قالب مونتاژ شده به همراه اجزاء مربوط به آن نشان داده شده است.



شکل ۹ قالب و اجزا مربوط به آن

۳- پارامترهای در نظرگرفته شده برای طراحی قالب و اثر آنها بر روی فرایند

برای تولید نمونه‌های لوله‌ای پارامترهای، دما، پیش‌گرم‌کردن محصول پیش‌آغشته، دمنده[1]، هوای فشرده و اضافه کردن فیلم پلیمری در نظر گرفته شده و بررسی شدند. شکل ۱۰ شماتیک اجزا استفاده شده برای تولید محصول لوله‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از تصویر نیز مشخص می‌باشد، پیش‌آغشته‌ها از سمت چپ از قفسه پیش‌آغشته‌ها وارد می‌شوند و پس از عبور از محفظه پیش‌گرم به سمت قالب هدایت می‌شوند. در ابتدای قالب و با حرارت، مواد گرمانرم پیش‌آغشته‌ها ذوب و در انتهای قالب شکل لوله در اثر فشار و دما کامل می‌شود. پس از خروج از قالب نیز خنک‌کننده و در سمت راست نیز کشنده دیده می‌شود.



شکل ۱۰ شماتیک اجزا استفاده شده

1 . Blower

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۱- پارامترها

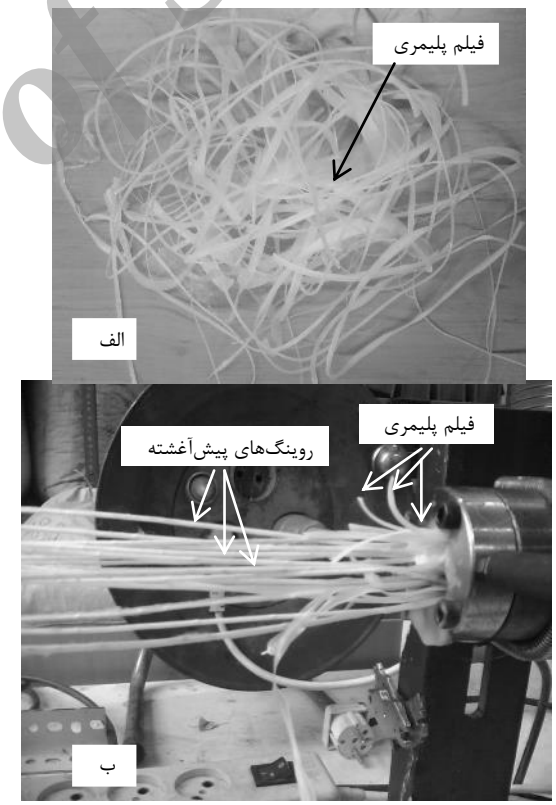
طبق رابطه ۱، بالا بودن دمای کاری موجب کاهش گرانروی شده و در نتیجه زمینه پلیمری با سرعت نفوذ بیشتر و بهتر به داخل الیاف حرکت می‌کند. البته گرانروی بیشتر نیاز به فشار بیشتری برای نفوذ زمینه به الیاف دارد.

پلیمری که روی محصول پیش‌آغشته شده وجود دارد باید با حرارت دهی دوباره به حالت سیلان درآید، تا بتواند با زمینه رویینگ‌های دیگری که به مرور وارد قالب می‌شوند، دارای چسبندگی مناسب و فصل مشترک خوبی باشند. پیش‌گرم کردن پیش‌آغشته‌ها جزء الزامات مواد گرمانرم می‌باشد. در غیر این صورت محصول تولیدی معیوب خواهد بود.

پس از شکل‌گیری محصول لوله‌ای در قالب پالتروژنی و هنگام خروج محصول کامپوزیتی با زمینه گرمانرم از سیستم‌های خنک‌کاری مختلف استفاده می‌شود، که عبارتند از:

۱- خنک‌کاری توسط دمیدن هوا
۲- استفاده از آب با استفاده از کالیبراتور به صورت تماس غیر مستقیم

برای تولید محصول مورد نظر از دمنده هوا برای خنک‌کاری بیرون محصول استفاده شد. در شکل ۱۱ فیلم پلیمری تولید شده و اضافه کردن فیلم پلیمری در قالب نشان داده شده است.



شکل ۱۱ الف: فیلم پلیمری تولید شده و ب: اضافه کردن فیلم پلیمری در قالب

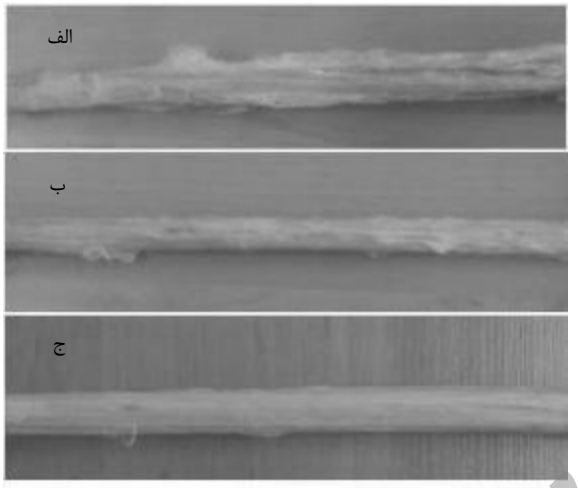
هوای فشرده، یا مکش[1] برای تولید محصولات لوله‌ای شکل یک نیاز مبرم می‌باشد، چرا که عدم استفاده از هوای فشرده یا مکش، باعث جمع‌شدگی و تغییر شکل محصول می‌شود. در این تحقیق از هوای فشرده، به دو منظور، ۱) اندازه کردن قطر خارجی و ۲) خنک‌کاری قطر داخلی محصول استفاده گردید.

1 . Vacuum

با اضافه کردن فیلم پلیمری به قالب چسبندگی الیاف بیشتر می‌شود، و همچنین باعث پرشدن فضاهای خالی قالب و افزایش کیفیت سطح نیز می‌شود. پس در نتیجه، اضافه کردن فیلم پلیمری به دلیل چسبیدن مناسب الیاف آغشته‌شده و ایجاد فصل مشترک مناسب بین زمینه و الیاف به عنوان نیاز در حین کار تشخیص داده شد، که تولید شده و مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۱).

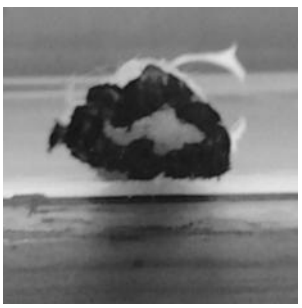
۳-۲- بررسی تاثیر پارامترهای در نظر گرفته شده بر روی محصول لوله‌ای

برای نشان دادن استفاده مناسب از پارامترها، و اینکه هر کدام از پارامترهای در نظر گرفته شده برای طراحی مناسب قالب چه تاثیری روی محصول تولید شده کامپوزیتی داشت، در شکل ۱۲ سه تصویر (شکل ۱۲–الف، ب، ج) برای مقایسه کیفی و ظاهری در کنار هم می‌باشد.



شکل ۱۲ استفاده از الف) دمنده و دمای ۲۰۰ °C، ب) دمنده، دمای ۲۰۰ °C و پیش‌گرم ج) دمنده، دمای ۲۰۰ °C ، پیش‌گرم و فیلم پلیمری

در شکل ۱۲- الف، محصول کامپوزیتی، با استفاده از دمنده و دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد ساخته شده است. همانطوری که مشخص است، محصول چسبندگی و فصل مشترک مناسبی ندارد، و دارای کیفیت سطح مناسبی نیز نمی‌باشد. در تصویر ۱۲- ب، با اضافه شدن پیش‌گرم به پارامترهای قبلی محصولی بهتر نسبت به مرحله قبل به دست آمد، ولی همچنان محصول دارای کیفیت و ظاهری قابل قبول نبود. در شکل ۱۲- ج، با در نظر گرفتن چهار پارامتر از پارامترهای انتخاب شده برای ساخت کامپوزیت لوله‌ای، محصولی مناسبتر با سطح مشترک و چسبندگی مناسب به دست آمد. ولی به علت عدم خنک‌کاری محصول از داخل حالت دفرمه شدن یا جمع شدن مشاهده می‌شد (شکل ۱۳). برای رفع این مشکل از هوای فشرده استفاده گردید، که از بخش نری قالب به داخل لوله تولیدی دمیده می‌شد.



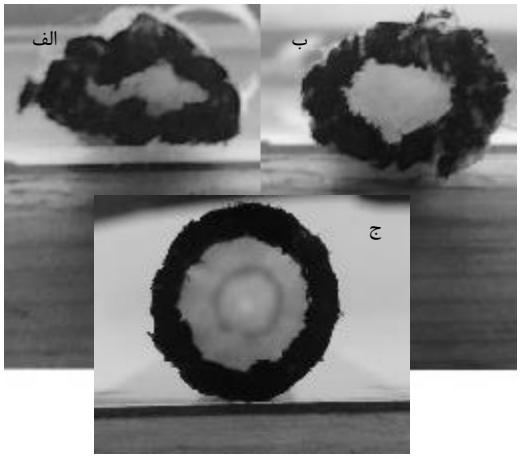
شکل ۱۳ نمایش مقطع برش خورده محصول در حالت جمع شدگی

Archive of SID
www.SID.ir

در شکل ۱۴ محصول سالم تولید شده از نظر ظاهری و هندسی دیده می‌شود که با توجه به پارامترهای دمنده، دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، پیش‌گرم و فیلم پلیمری و هوای فشرده تهیه شده است. یعنی محصولی است که با استفاده از همه پارامترهای در نظر گرفته شده برای طراحی قالب و ساخت محصول لوله‌ای در نظر گرفته شده بود، تهیه شد.

شکل ۱۴ محصول سالم تولید شده، الف) نمای بالا ب) نمای جانبی

برای درک بهتر تاثیر استفاده از هوای محیط، دمنده و هوای فشرده، برای خنک‌کاری، در شکل ۱۵ با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۵- الف، خنک‌کاری محصول فقط با هوای محیط می‌باشد. همانطوری که از شکل ۱۵- الف نیز مشاهده می‌شود حالت جمع‌شدگی محصول کاملا مشخص می‌باشد. برای خنک‌کاری و جبران این نقص، از دمنده در قسمت خروجی قالب استفاده شد. در شکل ۱۵- ب، با اضافه شدن دمنده برای خنک‌کاری قطر خارجی محصول کمی بهبود پیدا کرد، اما برای خنک‌کاری محصول کافی نبود و محصول از نظر شکل ظاهری و هندسی هنوز دچار مشکل بود. در شکل ۱۵- ج، علاوه از دمنده، از هوای فشرده نیز استفاده شد.



شکل ۱۵ مقایسه شکل‌ها (الف: هوای محیط، ب: هوای محیط و دمنده و ج: هوای محیط، دمنده و هوای فشرده)

با توجه به شکل ۱۵- ج، مشاهده شد که استفاده از دمنده و هوای فشرده باعث سالم تولید شدن محصول لوله‌ای می‌شود. زیرا خنک‌کاری محصول از داخل و خارج آن، موجب سفت و جامد شدن زمینه پلیمری تولیدی می‌شود که در حالت خمیری از قالب خارج می‌شود.

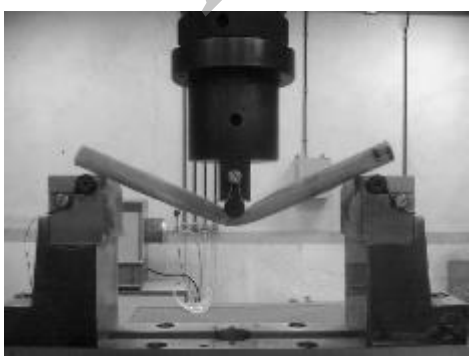
۴- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

آزمایش خمش بر روی نمونه‌های تولید شده، انجام شد. در کل نمونه‌های ۱۸R۱، ۱۸R۲، ۲۰R۱، ۲۰R۲ و ۲۲R قابل آزمایش‌گیری بودند، یعنی از نظر ظاهری و هندسی مطابق با کیفیت مورد انتظار برای تولید نمونه‌ها بودند. برای مشخص شدن شماره نمونه از دو عدد و یک حرف انگلیسی استفاده شده است. مثلا در نمونه ۱۸R۱، عدد ۱۸، نشان دهنده تعداد روینگ پیش‌آغشته استفاده شده، R، نشان دهنده روینگ و ۱ نشان دهنده شماره نمونه تولیدی در بین نمونه‌هایی است، که از ۱۸ روینگ پیش‌آغشته برای تولید محصول استفاده شده است. جدول ۲ نمونه‌های تولید شده و پارامترهای مورد ارزیابی را نشان می‌دهد. سرعت کششی برای همه نمونه‌های تولید شده ۳,۲ میلیمتر بر ثانیه می‌باشد. تفاوت نمونه‌های تولید شده در جدول ۲، در تعداد روینگ پیش‌آغشته استفاده شده، دمای نمونه و جابجایی هیتر می‌باشد.

جدول ۲ نمونه‌های لوله‌ای

شماره نمونه	دمای قالب (°C)	پیش گرم	دمنده	کمپرسور	فیلم پلیمری	فاصله هیتر از سر قالب ۱,۵ (cm)	فاصله هیتر از سر قالب ۶ (cm)
۱۸R۱	۲۰۰	√	√	√	√	√	-
۱۸R۲	۲۴۰	√	√	√	√	√	-
۲۰R۱	۲۰۰	√	√	√	√	√	-
۲۰R۲	۲۰۰	√	√	√	√	-	√
۲۲R	۲۴۰	√	√	√	√	√	-

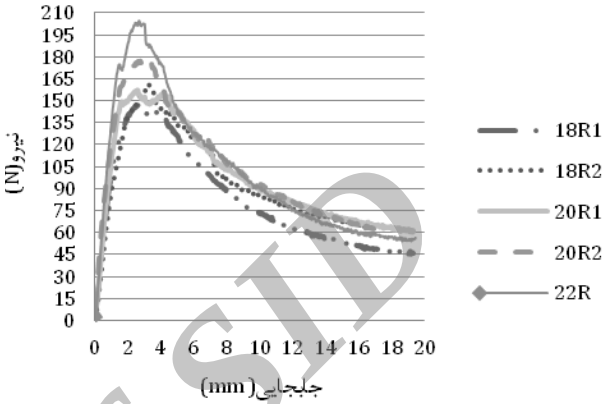
آزمایش خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790 روی نمونه‌ها انجام شد. فاصله بین دوفک برای انجام آزمایش ۱۵۰ میلیمتر و سرعت حرکت فک ۲ میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. شکل ۱۶ تصویری از آزمایش خمش، نمونه ۲۰R۲ را نشان می‌دهد. حداکثر جابجایی در وسط این نمونه برابر با ۴۰ میلیمتر و حداکثر نیروی قبل از شکست، ۱۸۰ نیوتن می‌باشد.



شکل ۱۶ نمونه ۲۰R۲ تحت آزمایش خمش

Archive of SID
www.SID.ir

مکانیزم و نوع شکست در استفاده از الیاف پیوسته به این صورت می‌باشد که لایه‌های بالای تار خنثی در حالت فشاری، و لایه‌های زیر تار خنثی در حالت کششی می‌باشند. الیاف پیوسته برای تحمل بار کششی مناسب می‌باشند و در بار خمشی محصول دچار شکست می‌شود، که برای نمونه‌های مورد آزمایش نیز این امر صادق بود. یعنی رووینگ‌های بالای تار خنثی محصول کامپوزیتی دچار شکست شدند. شکل ۱۷ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمایش گرفته شده می‌باشد.



شکل ۱۷ نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های مورد آزمایش

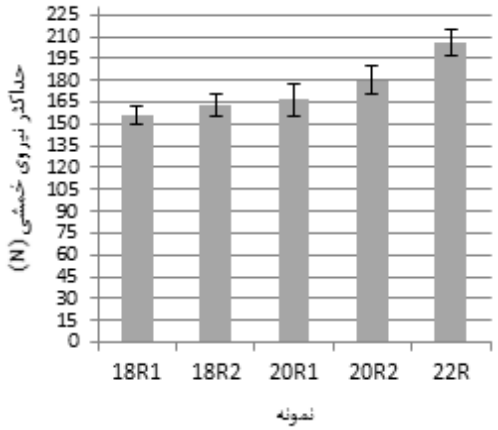
همانطوری که از شکل ۱۷ نیز مشخص می‌باشد با افزایش تعداد رووینگ مورد استفاده، محصول کامپوزیتی نیروی بیشتری را برای شکست متحمل شده است. بیشترین نیرو، مربوط به محصول ۲۲R، در حدود ۲۰۵ نیوتن و کمترین نیرو مربوط به نمونه ۱۸R۱ با نیروی ۱۵۵ نیوتن می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

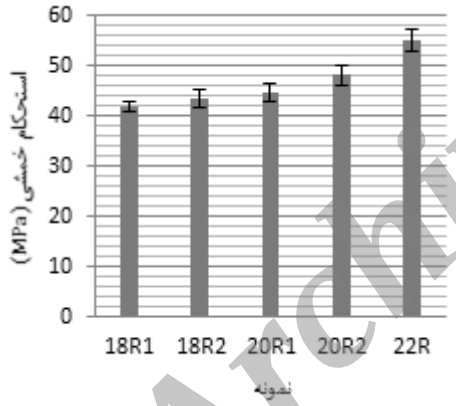
نتایج به دست آمده در این مقاله در دو بخش محصول پیش‌آغشته و محصول لوله‌ای با توجه به طراحی قالب تقسیم می‌شود.

نتایج به دست آمده از محصول پیش‌آغشته بیان‌گر این مطلب هستند که افزایش دما و کاهش سرعت کششی کشنده باعث کم شدن حباب و آغشته‌سازی بهتر محصول می‌شود. آغشتگی محصولات تولید شده با توجه به اعداد به دست آمده از نظر محاسبه درصد حجمی حباب و بررسی عکس‌های میکروسکوپی تهیه شده، برای محصول‌های پیش‌آغشته انجام شد. بهترین نمونه پیش‌آغشته تولید شده مربوط به آزمایش شماره ۱۰ با ۱,۷۷ درصد حجمی حباب، در حالت استفاده از بیشترین دمای قالب (۱۹۰ درجه سانتیگراد) و کمترین سرعت کششی (۵,۰۲ میلیمتر بر ثانیه) در حالت استفاده از دمنده برای خنک‌کاری در این آزمایش می‌باشد.

برای محصول لوله‌ای نیز با توجه به پارامترهایی که برای طراحی قالب در نظر گرفته شد، محصول لوله‌ای به روش پالتروژن تولید شد. پارامترهای مهم برای تولید محصول لوله‌ای محصولات گرمانرم به روش پالتروژن باید در طراحی قالب، لحاظ شود. انتخاب دمایی مناسب برای کار، تا بتوان گرانروی مذاب را کاهش داده و نفوذ زمینه به الیاف و همچنین تشکیل فصل مشترک مناسب را افزایش داد. پیش‌گرم کردن محصول پیش‌آغشته، استفاده از دمنده و هوای فشرده برای خنک‌کاری مناسب محصول و در صورت لزوم استفاده از فیلم پلیمری می‌باشد. نتایج آزمایش مکانیکی خمش حاصل از خمش سه نقطه‌ای، در شکل ۱۸ و ۱۹، به ترتیب از نظر حداکثر نیروی خمشی بر حسب نیوتن و استحکام خمشی بر حسب مگاپاسکال نشان داده شده است. همچنانکه از نمودار مربوط به حداکثر نیروی خمشی (شکل ۱۸) و استحکام خمشی (شکل ۱۹) نیز مشخص است حداکثر نیروی قابل تحمل مربوط به نمونه ۲۲R می‌باشد. نیروی قابل تحمل این نمونه در حدود ۲۰۵ نیوتن و استحکام خمشی را که می‌تواند تحمل کند در حدود ۵۵ مگاپاسکال می‌باشد. این نمونه دارای بیشترین تعداد رووینگ پیش‌آغشته استفاده شده و دمای قالب ۲۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.



شکل ۱۸ نمودار مربوط به حداکثر نیروی خمشی



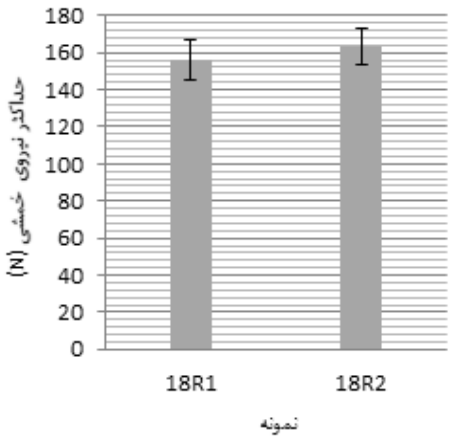
شکل ۱۹ نمودار مربوط به استحکام خمشی

نکته قابل بررسی در بین نمونه‌های تولید شده مربوط به نمونه ۱۸R۱ و ۱۸R۲ و همچنین نمونه‌های ۲۰R۱ و ۲۰R۲ می‌باشد. نقش پارامتر دما چه در پیش‌گرم کردن و چه در عملیات ساخت پیوسته محصول برای آغشتگی خوب و تشکیل فصل مشترک مناسب با توجه به نتایج به دست آمده از این نمونه‌ها ضروری و مهم می‌باشد.

تنها تفاوت نمونه‌های ۱۸R۱ و ۱۸R۲ اختلاف دمایی در حدود ۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و سایر شرایط در تولید این دو نمونه کاملاً یکسان است. دما در نمونه‌های ۱۸R۱ و ۱۸R۲ به ترتیب ۲۰۰ و ۲۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. نمونه ۱۸R۲، حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی بیشتری را نسبت به ۱۸R۱ تحمل کرده است. تفاوت حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی به ترتیب در این نمونه‌ها، در حدود ۱۰ نیوتن و ۴ مگاپاسکال می‌باشد شکل ۲۰ مربوط به حداکثر نیروی خمشی و شکل ۲۱ مربوط به استحکام خمشی نمونه‌های گرفته شده می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir



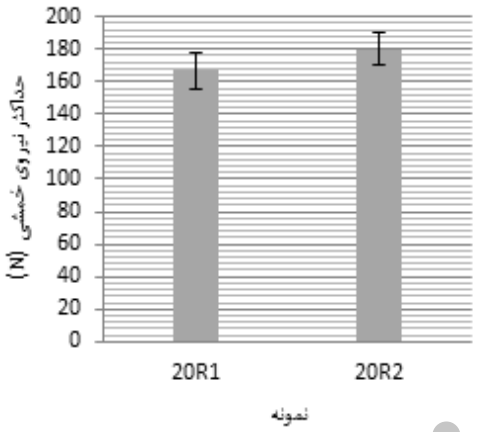
شکل ۲۰ مقایسه نمونه‌های ۱۸R۱ و ۱۸R۲ از نظر حداکثر نیروی خمشی

شکل ۲۱ مقایسه نمونه‌های ۱۸R۱ و ۱۸R۲ از نظر استحکام خمشی

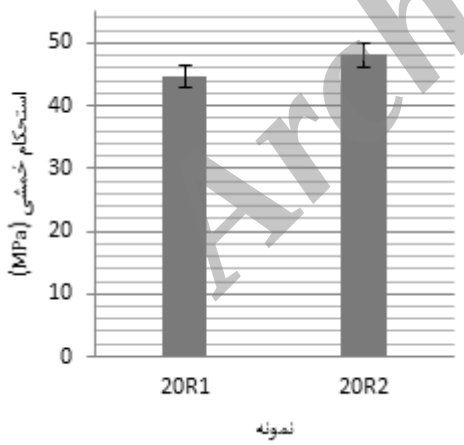
در نمونه‌های ۲۰R۱ و ۲۰R۲ نیز که تحت شرایط یکسان ولی با تغییر جابجایی هیتر از ۱،۵ سانتی‌متری قالب به حدود ۶ سانتی‌متری از سر قالب می‌باشد، حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی افزایش یافته است. برای نمونه تولید شده، ۲۰R۲ حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی بیشتر از نمونه ۲۰R۱ ، به ترتیب برابر ۱۲ نیوتن و ۳ مگاپاسکال می‌باشد. در هر دو مورد ذکر شده دمای بالاتر از نقطه ذوب (تفاوت دمایی نمونه ۱۸ تایی و پیش‌گرم کردن زیاد در نمونه ۲۰ تایی) باعث کم شدن ویسکوزیته و در نتیجه افزایش چسبندگی الیاف روینگ به همدیگر و نیز تشکیل فصل مشترک مناسب بین الیاف روینگ و زمینه پلیمری شده است. شکل ۲۲ و ۲۳ به ترتیب مقایسه حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی نمونه‌های گرفته شده می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به پارامترهای بررسی شده در این مقاله برای محصول پیش‌آغشته، مشاهده شد که افزایش دما و کاهش سرعت کششی کشنده باعث کم شدن حباب و آغشته‌سازی بهتر محصول می‌شود. در ضمن افزایش دما به عنوان پارامتر موثر برای آغشته‌سازی محصول پیش‌آغشته شناخته شد. برای محصول لوله‌ای نیز پارامترهای دمای مناسب، استفاده از دمنده و هوای فشرده، پیش‌گرم کردن محصول جز الزامات مهم در طراحی قالب و تولید محصول لوله‌ای تشخیص داده شد. با توجه به نتایج آزمایش مکانیکی حاصل از خمش سه نقطه‌ای، مشاهده شد که حداکثر نیروی قابل تحمل مربوط به نمونه ۲۲R می‌باشد. نیروی قابل تحمل این نمونه در حدود ۲۰۵ نیوتن و استحکام خمشی را که می‌تواند تحمل کند در حدود ۵۵ مگاپاسکال می‌باشد. این نمونه دارای بیشترین تعداد روینگ پیش‌آغشته استفاده شده و دمای قالب ۲۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. با توجه به نتایج نمونه‌های ۱۸R۱ و ۲۲R، با افزایش تعداد روینگ پیش‌آغشته استفاده شده از ۱۸ به ۲۲ روینگ پیش‌آغشته، حداکثر نیروی خمشی و استحکام خمشی در حدود ۳۱ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین پارامتر دما برای آغشتگی خوب و تشکیل فصل مشترک مناسب همچنانکه در نمونه‌های ۱۸R۱ و ۱۸R۲ (از نظر تغییر دمایی ۲۰۰ به ۲۴۰ درجه سانتیگراد) و همچنین نمونه‌های ۲۰R۱ و ۲۰R۲ (از نظر پیش‌گرم و جابجایی هیتر) بیان شد، ضروری و مهم برای تولید می‌باشد.



شکل ۲۲ مقایسه نمونه‌های ۲۰R۱ و ۲۰R۲ از نظر حداکثر نیروی خمشی



شکل ۲۳ مقایسه نمونه‌های ۲۰R۱ و ۲۰R۲ از نظر استحکام خمشی

۷- مراجع

[1] McMahon, P.E., "Thermoplastic carbon fibre composites", Developments in Reinforced Plastics 4, pp. 1-30, 1984.
[2] Cogswell, F.N., "Continuous fibre reinforced thermoplastics. in Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics edited by D.W", Clegg and A.A. Collyer. Elsevier Applied Science Publishers, London, 1986.
[3] Cattanach, J.B. Cuff, G. and Cogswell, F.N., "The processing of thermoplastics containing high loadings of long and continuous reinforcing fibres", J Polym Engng ,Vol. 6, pp. 345-362, 1986.

Archive of SID

www.SID.ir

[4] Leach, D.C., "Continuous fibre reinforced thermoplastics matrix composites. in Aduanced Composites edited by I.K. Partridge", Elsevier Applied Science Publishers, London, 1989.
[5] Quinn, J.A., Pultrusion: an economic manufacturing technique. Metals and Materials, Vol. 5, pp 270-273, 1989.
[6] Chandler, H.W. Devlin, B.J. and Gibson, A.G.: A model for the continuous impregnation of fibre tows in a resin bath with pins. Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, pp 215-220, 1992.
[7] Bijsterbosch, H. and Gaymans, R.J., "Impregnation of glass rovings with a polyamide melt. Part 1: Impregnation bath", Composites Manufacturing, Vol. 2, 1993.
[8] Bijsterbosch, H. and Gaymans, R.J., "Impregnation of glass rovings with a polyamide melt. Part 2: Wipe-off die", Composites Manufacturing, Vol. 3, 1993.
[9] Beever, W.H. and O'Connor, J.E., "Pultruded Thermoplastic Composite Structures", Int.SAMPE Symp. Proc, Vol. 32, 1309,1987.
[10] FANUCCI, J.P. and NOLET, S.C., "Fiber Reinforced Nylon-6 Composites Produced by the Reaction Injection Pultrusion Process", Polimer Composite, Vol. 77, no. 5, OCTOBER 1996.
[11] Kulshreshtha, A.K. Vasile, C., "Handbook of Polymer Blends and Composites", Rapra technology limited. Vol. 2, 2001.
[12] Michaeli, W. and Jürss, D., "Composites Part A: Applied Science and Manufacturing", 1996.
[13] Akovali, G., "Handbook of Composite Fabrication", Ankara , pp134-136, 5 June 2001.
[14]Mazumdar, S.K.: "Composites Manufacturing", Crc Press, pp 223 and 224, 2001.
[15] Wilson, M.L. and Buckley, J.D., Journal of Reinforced Plastics and Composites,1994.
[16] Bates, P. J., "Melt impregnation of glass roving in a thermoplastic", Chemical Engineering Department McGill University, Montréal, March, pp. 15, 1993.
[17] Gibson, A.G. and Manson, J.A., "Impregnation technology for thermoplastic matrix composites", Composites Manufacturing, Vol. 3, No. 4, pp. 223–233, 1992.
[18] Gaymans, R. J. and Wevers, E., "Impregnation of a glass fibre roving with a polypropylene melt in a pin assisted process", Elsevier Science Limited, Composites Part A 29A, pp 633-670, 1998.
[19] Tutunchi, M. golzar, M. and behravesh, A.H., Study of parameters, involved in the production of impregnated glass fiber composite and high-density polyethylene to Pultrusion method, 7th student conferrence on mechanical engineering, University of tehran, 2013, (In Persian).
[20] Kaw, K., "Mechanics of composite materials", 2nd ed, pp 212, 2006.
[21] Tutunchi, M., "Design and manufacture of circular pultrusion section HDPE/GF(Roving)", MSc thesis, Tarbiat Modares University. Tir 1392, (In Persian).

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir