

Polymerization
Quarterly, 2019
Volume 9, Number 3
Pages 39-49
ISSN: 2252-0449

Tack Property of Prepregs: Effective Parameters, Methods of Measurement and Failure Mechanisms

Amirreza Pouladvand and Mehrzad Mortezaei*

Polymer Group, Faculty of Materials and Manufacturing Processes, Malek-E-Ashtar
University of Technology, P.O. Box 15875-1774, Tehran, Iran

Received: 20 February 2019, Accepted: 1 June 2019

Abstract

Nowadays, due to the development of automated composite manufacturing processes on prepregs, it is necessary to recognize the main properties and factors affecting prepregs. After the precuring stage, the tack is one of the main characteristics of the prepregs, and this parameter is the viscoelastic properties of the prepreg bulk. The tack is the ability of prepreg to stick to itself or to other surfaces. Factors affecting premature tack can be divided into two general categories of structural and process factors. The most important structural factors is the type of resin, resin formulation, molecular weight, viscosity, degree of cure, fabric type, fabric architecture, temperature, volume of cavities and volatile content are mentioned. Also, the most important process factors are humidity content, aging, contact time, contact force, separation force, lay-up speed and angle. The cohesive failure and interfacial failure of two mechanisms of failure have been proven in tack of prepreg and these two mechanisms are capable of interchanging under different conditions. Also, due to the lack of a standard test, several different methods, such as floating roller, probe, rolling ball, peel, lap shear and loop tack test, are used to measure the amount of tack. In this paper, the factors affecting the prepreg tack, different measuring methods and different failure modes have been investigated.

Key Words

prepreg,
tack,
effective factor,
flow ability,
failure mechanism

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mortezaei@mut.ac.ir & mhrmorteza@gmail.com

چسبناکی پیش آغشته: عوامل مؤثر، روش‌های اندازه‌گیری و سازوکارهای وادادگی

امیررضا پولادوند، مهرزاد مرتضایی*

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، گروه مهندسی پلیمر،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱، پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۱

امروزه با توجه به توسعه فرایندهای ساخت خودکار کامپوزیت از پیش‌آغشته‌ها نیاز به شناخت خواص اصلی پیش‌آغشته‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها افزایش یافته است. چسبناکی پس از مرحله پیش‌پخت از اصلی‌ترین مشخصه‌های پیش‌آغشته‌ها بوده و این پارامتر از خواص گرانش‌شناسی توده پیش‌آغشته است. چسبناکی عبارت از قابلیت پیش‌آغشته برای چسبیدن به خود یا به سایر سطوح است. عوامل مؤثر بر چسبناکی پیش‌آغشته را می‌توان به دو دسته کلی عوامل ساختاری و فرایندی تقسیم کرد. از مهم‌ترین عوامل ساختاری می‌توان نوع و فرمول‌بندی رزین، جرم مولکولی، گرانش‌وی، مقدار پخت، نوع و معماری پارچه، دما، مقدار حفره‌ها و محتوای فرار را نام برد. همچنین، از مهم‌ترین عوامل فرایندی می‌توان به مقدار رطوبت، پیرشدگی، زمان و نیروی تماس، نیروی جداسازی، سرعت و زاویه لایه‌چینی اشاره کرد. سازوکارهای وادادگی هم‌چسبی و فصل مشترک، دو سازوکار وادادگی در چسبناکی پیش‌آغشته است و این دو سازوکار در شرایط مختلف قابلیت تبدیل به یکدیگر را دارند. همچنین، با توجه به عدم وجود آزمون استاندارد از چند روش مختلف از جمله غلتک شناور، کاوند، گوی غلتان، پوست‌کنی، برش اتصال هم‌پوشان و چسبناکی حلقه برای سنجش مقدار چسبناکی استفاده می‌شود. در این مقاله، عوامل مؤثر بر چسبناکی پیش‌آغشته، روش‌های مختلف سنجش آن و سازوکارهای مختلف وادادگی بررسی شده است.

بسیار

فصلنامه علمی

سال نهم، شماره ۳،

صفحه ۴۹-۳۹، ۱۳۹۸

ISSN: 2252-0449

چکیده



امیررضا پولادوند



مهرزاد مرتضایی

واژگان کلیدی

پیش‌آغشته،

چسبناکی،

عامل مؤثر،

جریان‌پذیری،

سازوکار وادادگی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mortezaee@mut.ac.ir & mhrmorteza@gmail.com

مقدمه

امروزه کامپوزیت‌ها تقریباً در تمام صنایع کاربرد دارند، باین‌حال، کاربردهای آن‌ها در صنایع حمل‌ونقل، هوافضا و نظامی بسیار حائز اهمیت است. مجموعه‌ای از قطعات استفاده‌شده در این صنایع، که از درجه اهمیت خاصی برخوردارند، از پیش‌آغشته‌ها تهیه می‌شوند. پیش‌آغشته‌ها مواد مرکبی هستند که از آغشتن یک جزء تقویت‌کننده نظیر الیاف شیشه، کربن، بور یا آرامید به رزین فرمول‌بندی‌شده گرمانرم یا گرماسخت نظیر رزین‌های آکریلیک یا اپوکسی به‌دست می‌آیند. پیش‌آغشته‌ها مواد واسطه‌ای هستند. در صورتی‌که ماده پلیمری گرماسخت باشد، به‌طور جزئی شبکه‌ای یا نیم‌پخت شده (B-stage) و پیش از رسیدن به نقطه ژل‌شدن واکنش مرحله اول آن به پایان می‌رسد [۱]. روش‌های تولید پیش‌آغشته، ویژگی‌ها و مشخصات اصلی آن را در گذشته گروه پژوهشی نویسندگان مقاله بررسی کرده‌اند [۲].

از سامانه‌های پخت تأخیری در تولید پیش‌آغشته استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که در دمای معمولی آرام است و به پخت پیش‌آغشته منجر نمی‌شود تا زمان لازم برای لایه‌چینی و شکل‌دهی قطعه کامپوزیتی در اختیار باشد. در تولید اجزای کامپوزیتی، پیش‌آغشته انعطاف‌پذیر به یک قالب صلب می‌رود که هندسه نهایی در آنجا شکل می‌گیرد. پلیمر زمینه پیش‌آغشته با گرما فعال می‌شود و واکنش تراکمی شیمیایی آن حاصل می‌شود که موجب پلیمرشدن و شبکه‌ای شدن می‌شود. واکنش پخت خالص محدود و گرم‌آزاست و تجزیه گرماسنجی تفاضلی پویشی (DSC)، روش ترجیحی برای تعیین درجه پخت از راه اندازه‌گیری آنتالپی واکنش است. اگر هرگونه پخت قبلی رخ داده باشد، آنتالپی باقی‌مانده واکنش کاهش می‌یابد [۳]. فرایند لایه‌گذاری پیش‌آغشته به قالب، به‌عنوان لایه‌چینی شناخته می‌شود. برای اکثر کاربران پیش‌آغشته، لایه‌چینی به‌طور دستی توسط نیروی نیمه‌ماهر انجام می‌شود. لایه‌چینی شامل برش ورقه‌ها به شکل مورد نیاز، از بین بردن کاغذ پستی و قراردادن آن‌ها در قالب است. برای اطمینان از چسبیدن لایه به سطح قالب، فشار به‌طور دستی اعمال می‌شود. سپس، پیش‌آغشته به‌علت خواص چسب‌های حساس به فشار، که به‌عنوان چسبناکی ماتریس پلیمری پخت‌شده به‌طور جزئی شناخته می‌شود در جای خود باقی می‌ماند [۴]. در سال‌های اخیر به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کاهش خطای انسانی در فرایند ساخت، تکرارپذیری و کیفیت بیشتر و افزایش سرعت تولید، برای جابه‌جایی و لایه‌چینی پیش‌آغشته از فرایندهای خودکاری مانند جای‌گذاری خودکار الیاف (AFP)، جای‌گذاری خودکار مواد (AMP) و لایه‌چینی خودکار نوار

پیش‌آغشته (ATL) در طرح ساخت کامپوزیت‌های کارآمد (ACP) استفاده می‌شود [۵]. فرایندهای خودکار تولید قطعات کامپوزیتی به‌طور چشمگیری به خواص پیش‌آغشته حساس هستند. خم‌شدن الیاف، ایجاد چین‌وچروک در پارچه، تغییرات در مقدار چسبناکی و سایر نقص‌ها می‌تواند آثار زیانباری بر قطعه کامپوزیت نهایی داشته باشد. مدل‌سازی محاسباتی و دانستن دلایل مختلف تغییرات خواص پیش‌آغشته در یک پیکربندی پیچیده می‌تواند باعث کاهش چشمگیر این نقص‌های ساختاری شود. بدین ترتیب، شناخت چسبناکی پیش‌آغشته به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های این مواد امری ضروری است.

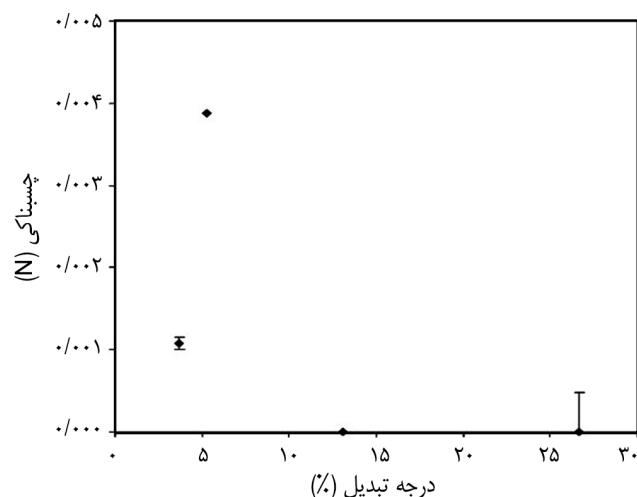
چسبناکی

چسبناکی پیش‌آغشته‌ها پس از مرحله پیش‌پخت، از مشخصه‌های مهم پیش‌آغشته‌هاست. این پارامتر از خواص گرانش‌کشان توده پیش‌آغشته است. چسبناکی عبارت از قابلیت یک پیش‌آغشته برای چسبیدن به خود یا به سایر سطوح است [۶]. چسبناکی را به‌طور سنتی می‌توان به‌عنوان چسبندگی تعریف کرد که به‌سرعت در دمای معمولی بدون اصلاح سطح خاص و با فشار انگشت ایجاد می‌شود [۷]. زمانی که نیروی لایه‌های پیش‌آغشته را از یکدیگر یا از سطحی جدا می‌کند، به‌دلیل گرانش کم رزین در این مرحله لیفچه‌هایی به‌وجود می‌آیند که سبب ایجاد مقاومت در برابر این کار می‌شود. این مقاومت را چسبناکی می‌گویند و از خواص چسب‌های حساس به فشار است (شکل ۱). این مقاومت از جنس چسبندگی بوده، اما مقدار آن به‌مراتب کمتر از چسبندگی نهایی است. این اتصال از گرانش کم پیش‌آغشته پس از مرحله پیش‌پخت ناشی می‌شود و به اتصال در حالت لاستیکی مربوط است [۸].

چسبناکی نباید خیلی کم باشد، زیرا چسبناکی ناکافی سبب حرکت پیش‌آغشته در حین لایه‌چینی در قالب می‌شود. در این حالت، لایه‌ها روی هم سر می‌خورند. از سویی این مقدار اگر



شکل ۱- لیفچه‌های تشکیل‌شده در اثر چسبناکی پیش‌آغشته [۷].

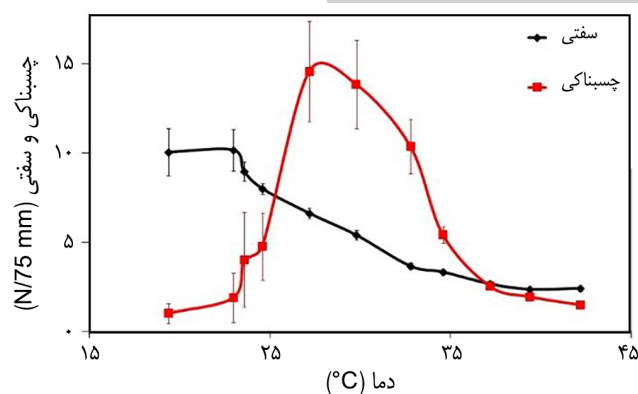


شکل ۳- تغییرات مقدار چسبناکی پیش آغشته با تغییر درصد پخت [۲۰].

پخت و افزایش گرانی، چسبناکی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، نمودار مقدار چسبناکی برحسب دما یک قله نشان می‌دهد که معمولاً در حوالی دمای محیط است [۱۸، ۱۹] (شکل ۲). همچنین، این قله نشان‌دهنده تغییر در حالت وادادگی از حالت هم‌چسبی به وادادگی در فصل مشترک است که در قسمت وادادگی توضیح داده می‌شود. دمای ظهور این قله، به مقدار پیش‌پخت وابسته است، زیرا در طول پیش‌پخت دمای انتقال شیشه‌ای رزین افزایش می‌یابد و معمولاً به نزدیکی دمای محیط می‌رسد. بدین دلیل با کمی افزایش دما و گذر از دمای انتقال شیشه‌ای رزین، پیش‌آغشته در حالت لاستیکی قرار می‌گیرد. در این حالت، چسبناکی آن به دلیل جاری شدن رزین افزایش می‌یابد، اما پس از آن بر اثر افزایش دما واکنش پخت دوباره آغاز شده و سبب کاهش چسبناکی می‌شود. این قله در رفتار چسبناکی با تغییرات درصد پخت نیز مشاهده می‌شود. دلیل آن است که با شروع واکنش پخت، ابتدا گرانی کاهش یافته و مقدار چسبناکی افزایش می‌یابد. اما با افزایش درصد پخت، مقدار گرانی به سرعت افزایش می‌یابد که سبب کاهش مقدار چسبناکی می‌شود (شکل ۳). در درصدهای پخت کم، وادادگی از نوع هم‌چسبی است، اما با افزایش درصد پخت به وادادگی در فصل مشترک تغییر می‌کند.

اثر نوع، مقدار رزین و مقدار مواد فرار

برای تولید پیش‌آغشته بسته به خواص مدنظر، تولیدکننده می‌تواند از رزین‌های مایع، نیمه‌جامد، جامد یا ترکیبی از این رزین‌ها استفاده کند. در رزین‌های مایع، به دلیل گرانی کم در پیش‌پخت مقدار چسبناکی زیاد بوده و رزین‌های نیمه‌جامد در مقایسه با رزین‌های



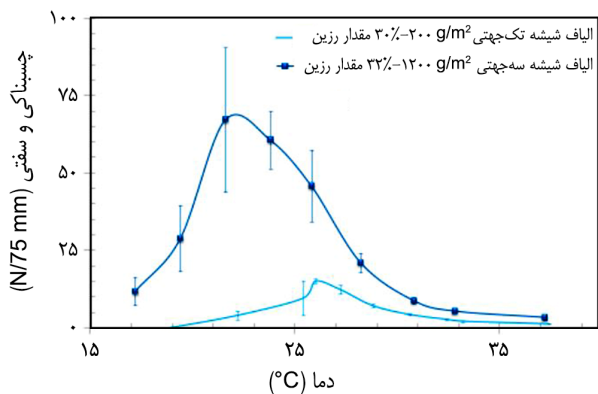
شکل ۲- نمودار تغییرات در چسبناکی با افزایش دما [۷].

بسیار زیاد باشد، جداکردن لایه‌های پیش‌آغشته از یکدیگر و نیز کاغذ جداکننده بسیار دشوار است. همچنین، رزین روی ابزارآلات فرایندهای خودکار برجا می‌ماند [۱۰]. با توجه به اینکه در طول انبارداری پیرشدن پیش‌آغشته‌ها با پیشرفت واکنش پخت سبب کاهش مقدار چسبناکی و از بین رفتن آن می‌شود، از عمر چسبناکی به عنوان عمر مفید پیش‌آغشته یاد می‌شود. با از بین رفتن چسبناکی کاهش خواص کار با دست در پیش‌آغشته مشاهده می‌شود [۱۰-۱۲]. سطوح چسبناکی پیش‌آغشته توسط سازنده فرمول‌بندی شده است به طوری که مواد در طول روند لایه‌گذاری در محل قرار می‌گیرند و در صورت لزوم می‌توانند به راحتی جایگزین شوند [۵]. وادادگی‌های هم‌چسبی و فصل مشترک دو سازوکار اصلی وادادگی چسبناکی پیش‌آغشته است. این دو سازوکار به شدت به عوامل مؤثر بر چسبناکی حساس هستند و در شرایط مختلف که در ادامه توضیح داده می‌شود، قابلیت تبدیل به یکدیگر را دارند. وادادگی هم‌چسبی نوعی وادادگی است که در آن به دلیل استحکام کم چسب، وادادگی در توده آن ایجاد می‌شود. اما در وادادگی فصل مشترک، پیوند قوی بین چسب و زیرآیند ایجاد نمی‌شود و لایه‌های پیش‌آغشته در ناحیه فصل مشترک از یکدیگر جدا می‌شوند.

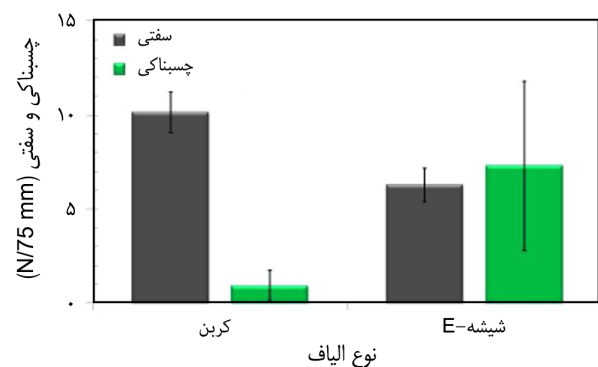
عوامل ساختاری

اثر گرانی، دما و درصد پخت

این سه عامل را می‌توان به عنوان اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر چسبناکی پیش‌آغشته معرفی کرد. یادآور می‌شود، این سه عامل به شدت به یکدیگر وابسته هستند. همان‌گونه که در بسیاری از مطالعات علمی بیان شده است، چسبناکی پیش‌آغشته‌ها از گرانی کم رزین در مرحله پیش‌پخت ناشی می‌شود. مشهود است، با افزایش دما گرانی کاهش یافته و مقدار چسبناکی پیش‌آغشته افزایش می‌یابد [۱۷-۱۳]. اما اگر روند افزایش دما ادامه یابد، به دلیل آغاز واکنش



(الف)

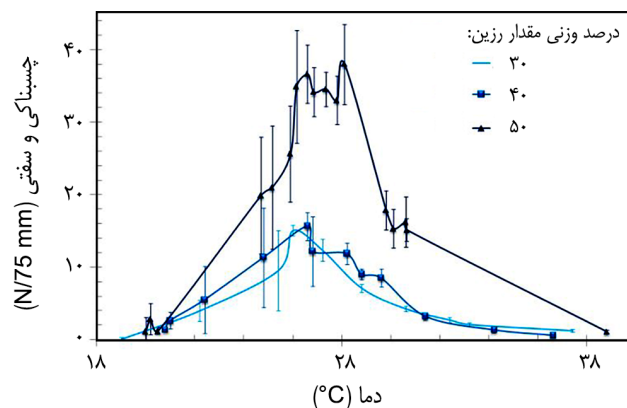


(ب)

شکل ۵- (الف) مقایسه مقدار چسبناکی و سفتی بین الیاف کربن و الیاف شیشه [۷] و (ب) نمودار مقایسه اثر نوع دوخت پارچه بر رفتار چسبناکی با تغییرات دما [۲۳].

رزین به درون الیاف کربن بهتر انجام می‌پذیرد. اما در الیاف شیشه، مقدار بیشتری از رزین روی سطح باقی می‌ماند که سبب چسبناکی بیشتر می‌شود.

نوع دوخت پارچه بر مقدار چسبناکی مؤثر است، اما تغییرات در وزن سطحی پارچه (fiber areal weight) با وجود اثرگذاری بر مقدار سفتی پارچه، اثر محسوسی بر مقدار چسبناکی ندارد. در مقایسه میان پارچه سه‌جهتی با پارچه تک‌جهتی در مقدار رزین تقریباً یکسان، مقدار چسبناکی پارچه سه‌جهتی بیشتر از تک‌جهتی است (شکل ۵-الف) [۲۳]. یکی از دلایل این مسئله می‌تواند زبری بیشتر سطح پارچه چندجهتی و ایجاد درگیری‌های مکانیکی بیشتر در مقایسه با پارچه تک‌جهتی باشد. دلیل دیگر این قضیه نیز می‌تواند نفوذ کمتر رزین به درون بافت پارچه چندجهتی نسبت به تک‌جهتی و ایجاد لایه رزین بر سطح باشد. همچنین مقدار هوای محبوس میان لایه‌ها در پارچه‌های چندجهتی، نسبت به تک‌جهتی بیشتر است که می‌تواند یکی دیگر از دلایل این موضوع باشد.



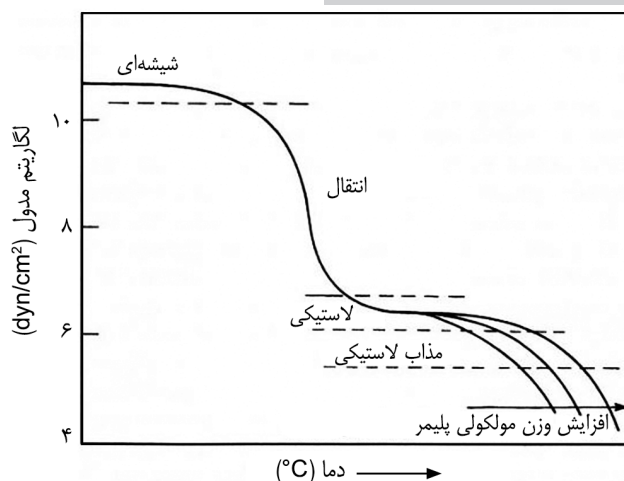
شکل ۴- نمودار تغییرات مقدار چسبناکی با دما در مقادیر متفاوت رزین [۲۳].

مابع دارای گرانروی بیشتری هستند. این موضوع سبب کاهش چسبناکی می‌شود، اما به دلیل وجود گروه‌های هیدروکسیل زیاد در ساختار خاصیت چسبندگی آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد. این مسئله سبب می‌شود تا رزین‌های نیمه‌جامد نیز چسبناک باشند. در رزین‌های جامد، جامدشدن سبب از بین رفتن چسبناکی می‌شود و استفاده از رزین‌های جامد می‌تواند مقدار چسبناکی را به شدت کاهش دهد. هنگامی که رزین جامد به عنوان زیرآیند انتخاب شود، از روش حلالی برای آغشته‌سازی الیاف به رزین استفاده می‌شود. در چنین فرایندی، مقدار چسبناکی به‌طور مستقیم با مقدار حلال موجود در سامانه ارتباط دارد. هر چه مقدار حلال در سامانه کاهش یابد، مقدار چسبناکی نیز کاهش پیدا می‌کند [۲۱].

هر چه مقدار رزین موجود در میان لایه‌ها افزایش یابد، مقدار چسبناکی به دلیل افزایش سطح تماس و برهم‌کنش قوی‌تر رزین-رزین افزایش می‌یابد [۲۳]. مشخص است، با افزایش مقدار رزین به دلایل پیش‌گفته، مقدار چسبناکی هم افزایش می‌یابد (شکل ۴). زمانی که مقدار رزین کم باشد، وادادگی از نوع وادادگی در فصل مشترک است. اما با افزایش مقدار رزین، حالت وادادگی به هم‌چسبی تغییر پیدا می‌کند.

اثر نوع و معماری الیاف و وزن سطحی پارچه

نوع الیاف بر مقدار چسبناکی و رفتار آن با تغییرات دما مؤثر است. الیاف کربن در مقایسه با الیاف شیشه در مقدار، نوع رزین و نوع دوخت یکسان دارای چسبناکی کمتری هستند (شکل ۵-ب) [۲۳]. این موضوع می‌تواند به دلیل سفتی بیشتر الیاف کربن و اصلاح سطح اپوکسی موجود بر آن‌ها نسبت به الیاف شیشه باشد. همچنین، رفتار این دو نوع الیاف در مرحله آغشته‌سازی با هم متفاوت است و نفوذ

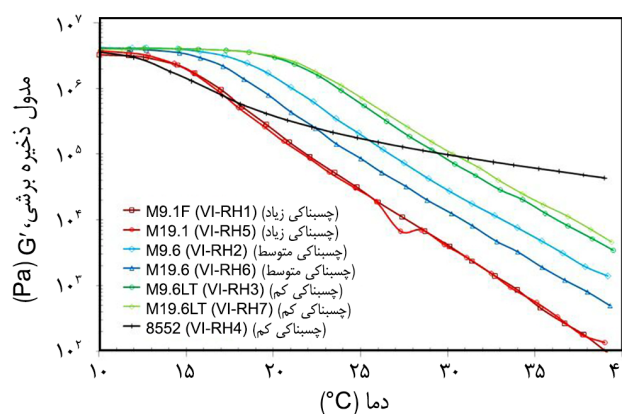


شکل ۶- نمودار تغییرات خواص گرانروکشسانی با تغییرات دما [۲۵].

اثر جرم مولکولی و افزودنی

افزایش جرم مولکولی رزین سبب افزایش سفتی، گرانروی و جامدشدن می‌شود که تمام این رخدادها سبب کاهش مقدار چسبناکی می‌شود [۲۳]. در نمودار مدول برشی برحسب دما (شکل ۶) حالت‌های فیزیکی مختلف رزین با افزایش دما نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، جایی که رزین در حالت لاستیک مایع قرار می‌گیرد، ناحیه چسبناکی پیش‌آغشته است. با افزایش جرم مولکولی در دمای ثابت، این منطقه به سمت راست انتقال یافته و مقدار چسبناکی آن نسبت به رزین با جرم مولکولی کمتر کاهش می‌یابد. در مقابل، هرچه جرم مولکولی کاهش یابد در دماهای کمتر پیش‌آغشته چسبناک می‌شود.

افزایش جرم مولکولی رزین، سبب تغییر حالت وادادگی از حالت هم‌چسبی به وادادگی در فصل مشترک نیز می‌شود. در شرایطی که از رزین با جرم مولکولی زیاد استفاده می‌شود، با به‌کارگیری



شکل ۷- نمودار مقایسه مدول برشی رزین با سطوح چسبناکی متفاوت [۷].

افزودنی‌ها با جرم مولکولی کم که با عنوان چسبناک‌کننده شناخته می‌شوند، مقدار چسبناکی افزایش می‌یابد و از سفتی پیش‌آغشته کاسته می‌شود [۲۵].

کاهش مقدار چسبناکی با افزایش مدول برشی در آزمون رئومتری انجام‌شده روی پیش‌آغشته‌ها با سطوح چسبناکی متفاوت مشاهده شده است (شکل ۷) [۷]. در اثر افزایش مدول رزین، مقدار چسبناکی کاهش یافته و مقدار نفوذ لایه‌ها در هم نیز کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش مدول نهایی کامپوزیت است. افزایش درصد پخت در مرحله پیش‌پخت و همچنین افزایش جرم مولکولی می‌تواند اصلی‌ترین دلایل افزایش مدول برشی باشند.

افزودن پرکننده و نرم‌کننده نیز بر مقدار چسبناکی مؤثر است. پرکننده‌ها سبب افزایش گرانروی و مدول برشی رزین می‌شوند و در نتیجه مقدار چسبناکی پیش‌آغشته را کاهش می‌دهند. اما نرم‌کننده‌ها، رفتاری معکوس دارند و با کاهش مقدار گرانروی و در مقدار مدول برشی سبب افزایش مقدار چسبناکی پیش‌آغشته می‌شوند [۲۶].

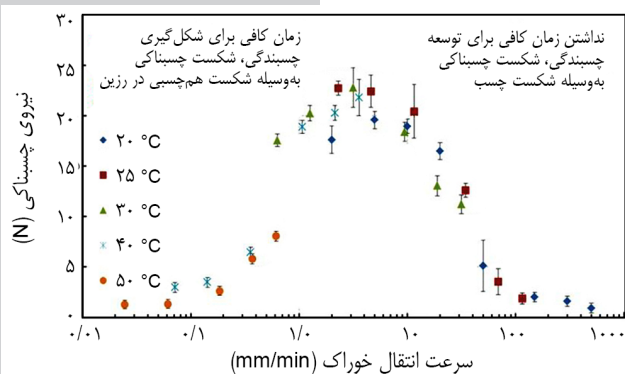
عوامل فرایندی

اثر پیرشدگی، رطوبت و زاویه لایه‌گذاری

مقدار چسبناکی پیش‌آغشته نسبت به پیرشدگی به‌شدت حساس است. از این رو، عمر کاربری پیش‌آغشته را بر اساس دوام چسبناکی آن مشخص می‌کنند [۱۶، ۲۷]. به‌طور کلی، برای جلوگیری از پیرشدگی پیش‌آغشته، آن را در یخچال نگهداری می‌کنند. اما برای حمل‌ونقل و عملیات لایه‌چینی لازم است تا پیش‌آغشته در شرایط محیط قرار گیرد. این تغییر دما سبب پیرشدگی از راه پیشرفت واکنش‌های پخت یا پلیمرشدن پیش‌آغشته می‌شود و کاهش شدیدی را در مقدار چسبناکی و انعطاف‌پذیری رزین ایجاد می‌کند (جدول ۱).

جدول ۱- جدول تغییرات شرایط فیزیکی پیش‌آغشته بر اثر پیرشدگی [۲۶].

زمان (روز)	شرایط فیزیکی
۰-۶	مایع گرانرو جریان‌پذیر بر الیاف پیش‌سازه
۷	نیمه‌جامد، چسبناک و انعطاف‌پذیر
۸	نیمه‌جامد، غیرچسبناک و انعطاف‌پذیری کم
۹-۱۴	جامد، غیرچسبناک و سخت



شکل ۱۰- منحنی مرجع نیروی چسبناکی با تغییرات سرعت انتقال یافته [۵].

پیش رود، مقدار چسبناکی افزایش بیشتری می‌یابد (شکل ۹) [۲۹]. افزایش سطح تماس رزین در دو لایه مختلف می‌تواند یکی از دلایل این موضوع باشد.

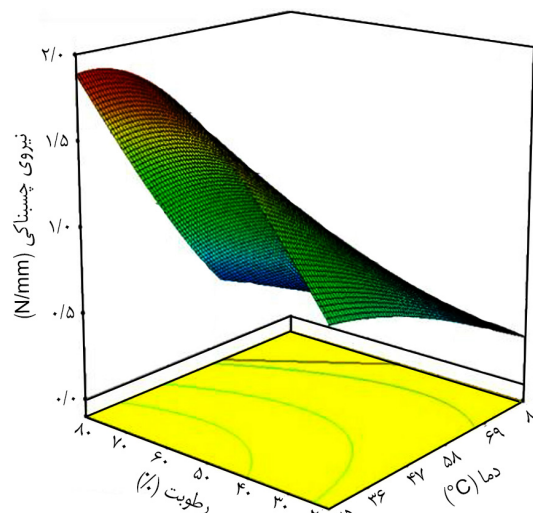
اثر سرعت لایه‌چینی، نیروی فشاری و زمان تماس

بسیاری از پژوهشگران درباره این سه عامل به عنوان مهم‌ترین عوامل در طول فرایند لایه‌گذاری مطالعه کرده و نتایج پژوهش‌های آن‌ها نیز تقریباً مشابه بوده است [۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۲، ۲۷، ۲۸]. در فرایندهای خودکار لایه‌چینی، سرعت لایه‌چینی از اصلی‌ترین پارامترها محسوب می‌شود و دانستن مقدار چسبناکی و تغییرات آن با تغییر سرعت لایه‌چینی امری ضروری است. همین موضوع سبب شده است تا در پژوهشی منحنی مرجع نیروی چسبناکی در برابر سرعت لایه‌چینی‌های مختلف از راه اصل WLF رسم شود تا بتوان در هر سرعت، مقدار چسبناکی را پیش‌بینی کرد (شکل ۱۰).

در سرعت‌های کم یا زمان‌های زیاد فرصت کافی برای اتصال لایه‌ها وجود دارد و وادادگی از نوع هم‌چسبی است. با افزایش سرعت به دلیل شکل‌گیری لیفچه‌ها نیروی چسبناکی افزایش می‌یابد و به قله می‌رسد. سپس با ادامه روند افزایش سرعت یا کاهش زمان نیروی چسبناکی کاهش می‌یابد و تغییر حالت در نوع وادادگی به وادادگی در فصل مشترک به دلیل عدم وجود زمان کافی برای تشکیل پیوند قوی مشاهده می‌شود [۵]. افزایش نیروی فشاری در زمان لایه‌چینی سبب نفوذ بیشتر لایه‌ها در یکدیگر شده و از این رو نیروی چسبناکی را افزایش می‌دهد.

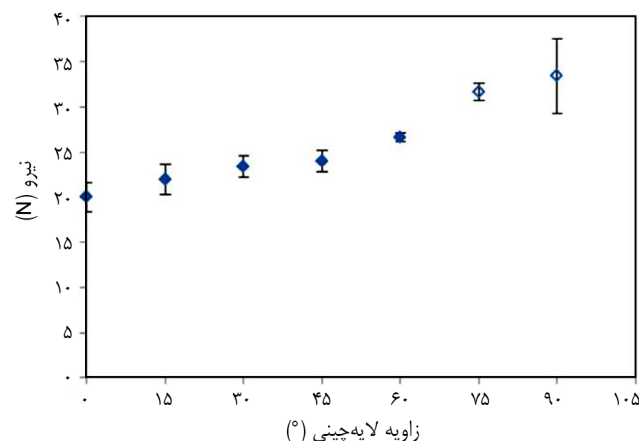
روش‌های سنجش مقدار چسبناکی پیش آغشته

در سال‌های اخیر، با توجه به نبود آزمون استاندارد برای سنجش مقدار چسبناکی پیش‌آغشته از آزمون‌های مختلف استفاده شده



شکل ۸- نمودار سه‌بعدی نیروی چسبناکی با تغییرات دما و رطوبت [۲۸].

اثر تغییر رطوبت بر مقدار چسبناکی نیز مشابه اثر تغییرات دماست و یک قله نشان می‌دهد. در رطوبت‌های کم، مقدار چسبناکی کم است. با افزایش رطوبت به سطح متوسط، مقدار چسبناکی به مقدار بیشینه می‌رسد. سپس با ادامه روند افزایش رطوبت، مقدار آن کاهش می‌یابد [۲۸]. در رطوبت‌های متوسط، مقدار گرانیوی کاهش و چسبناکی افزایش می‌یابد. اما در رطوبت‌های بسیار زیاد، لیفچه‌ها بین سطوح تشکیل نمی‌شوند که سبب کاهش مقدار چسبناکی می‌شود. با توجه به شکل ۸، بیشینه نیروی چسبناکی در دمای نزدیک به دمای محیط و رطوبت نسبی متوسط رخ می‌دهد. بر اساس خواص مکانیکی مورد انتظار قطعه نهایی، در تولید کامپوزیت‌های چندلایه زاویه لایه‌ها نسبت به یکدیگر تنظیم می‌شود. با تغییر زاویه لایه‌ها نسبت به یکدیگر، مقدار چسبناکی نیز تغییر می‌کند و هر چه زاویه از ۰° و ۰° به سمت ۹۰° و ۹۰°



شکل ۹- نمودار اثر زاویه بین لایه‌ها بر نیروی چسبناکی [۵].

است. آزمون‌ها از صنعت چسب‌های حساس به فشار (PSA) گرفته شده است، اما به‌طور کلی به‌ویژه در برهه اخیر، دو آزمون کاوند (probe) و پوست‌کنی بیشتر مدنظر پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۴، ۱۹، ۲۱، ۲۸، ۲۹]. در پی این دو آزمون بررسی دقیق‌تری از در مقاله انجام پذیرفته است.

روش غلتک شناور

از روش آزمون غلتک شناور (floating roller method) طبق استاندارد ASTM D3167 برای سنجش مقدار استحکام اتصال میان سطح انعطاف‌پذیر و سطح سخت استفاده می‌شود. در سنجش مقدار چسبناکی پیش‌آغشته با این روش، پیش‌آغشته روی سطح فلزی قرار داده می‌شود. سپس با غلتک پوست‌کنی به روشی مشابه با پوست‌کنی ۹۰° از روی سطح سخت جدا می‌شود. نیروی مقاوم در برابر جدایش به‌عنوان نیروی چسبناکی گزارش می‌شود.

آزمون چسبناکی حلقه

آزمون چسبناکی حلقه (loop tack test) برای سنجش مقدار چسبناکی میان یک لایه پلیمری و سطح فلزی طبق استاندارد ASTM 6195A طراحی شده است. در این آزمون، لایه چسبناک انعطاف‌پذیر به‌شکل حلقه در گیره قرار می‌گیرد و از روی سطح فلزی به‌آرامی فرود می‌آید تا اتصال بین دو سطح برقرار شود. سپس، از روی سطح جدا می‌شود. نیروی مقاوم در برابر جدایش به‌عنوان نیروی چسبناکی گزارش می‌شود.

برش اتصال هم‌پوشان

برای سنجش مقدار چسبناکی بین دو لایه پیش‌آغشته از روش برش اتصال هم‌پوشان (lap shear) استفاده می‌شود. پهنای نمونه ۶/۳۵ mm بوده و دو نمونه به اندازه ۲۰ mm از طول و کاملاً در عرض با یکدیگر هم‌پوشانی دارند. نمونه‌ها بین دو گیره ثابت شده و در جهت طولی با سرعت ۰/۰۵ mm/s از یکدیگر جدا می‌شوند. نیروی لازم برای جدایش دو سطح از یکدیگر به‌عنوان نیروی چسبناکی ثبت می‌شود [۲۷].

گوی غلتان

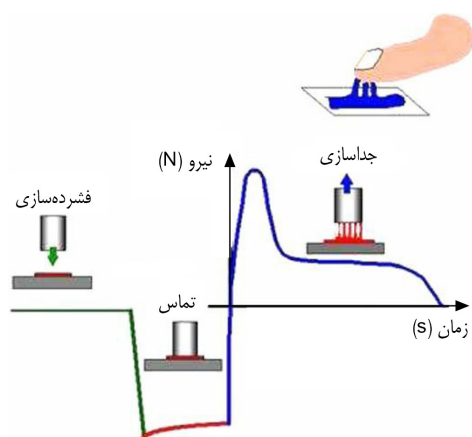
از آزمون گوی غلتان (rolling ball) برای سنجش ظرفیت چسب در برقراری سریع اتصال با سایر سطوح بدون اعمال هیچ فشاری استفاده می‌شود. استاندارد این آزمون ASTM D3121 است. نمونه آزمون دارای ۲۴ mm پهنای و ۳۷۵ mm طول بوده و توپ آزمون

نیز از جنس فولاد زنگ‌نزن با قطر ۱۱ mm است. نمونه روی میز قرار داده شده و سپس گوی از ارتفاعی به‌طور شیب‌دار رها می‌شود. اجازه داده می‌شود تا گوی روی سطح پیش‌آغشته حرکت کند تا زمانی که بایستد. سپس مسافتی که گوی از زمان اتصال روی سطح حرکت می‌کند، سنجیده شده و میانگین پنج آزمون گزارش می‌شود.

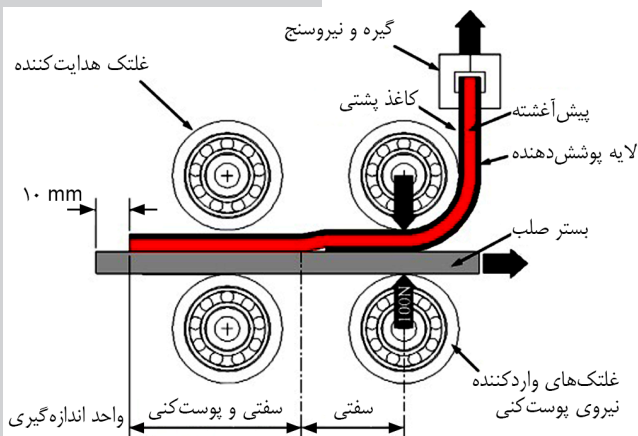
آزمون کاوند

این آزمون شامل دو صفحه دایره‌ای است که لایه نازکی از رزین یا پیش‌آغشته در بین آن‌ها قرار گرفته است. این آزمون به آزمون فشار-کشش نیز معروف است، به‌گونه‌ای که در ابتدای آزمون صفحه بالایی روی لایه پیش‌آغشته فرود می‌آید و با اعمال فشار آن را به صفحه پایینی می‌فشارد. سپس، صفحه بالایی در حالت کشش قرار می‌گیرد و با حرکت به سمت بالا از پیش‌آغشته جدا می‌شود (شکل ۱۱). همچنین با این روش، مقدار چسبناکی بین لایه‌های پیش‌آغشته نیز محاسبه می‌شود. بدین منظور پنج لایه از پیش‌آغشته با ابعاد ۵/۱ cm × ۵/۱ cm بین دو فک فلزی قرار داده می‌شوند. سپس تحت فشار با سرعت جابه‌جایی ۰/۰۲۵۴ cm/min قرار می‌گیرند تا به نیروی ۲۶۸ N برسد. آنگاه در این فشار، به مدت ۳۰ s نگه‌داشته شده و سپس نمونه در حالت کشش با سرعت جابه‌جایی ثابت ۰/۰۳۴ cm/min کشیده می‌شود. از تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از نمودار تنش-کرنش این آزمون می‌توان ضریب چقرمگی و انرژی فشردگی را به‌دست آورد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، مهم‌ترین مقادیر بیانگر چسبناکی ضریب چقرمگی و انرژی فشردگی هستند. ضریب چقرمگی از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Toughness factor} = \int_{\epsilon_{0\% \text{ tensile}}}^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon$$



شکل ۱۱- مراحل مختلف آزمون کاوند در سنجش چسبناکی [۱۴].



شکل ۱۳- تصویر آزمون پوست کنی برای سنجش مقدار چسبناکی پیش آغشته [۹].

شروع به کشش می کند این حفره ها در جهت عمودی گسترش می یابند و باعث تشکیل لیفچه ها بین سطح کاوند و پیش آغشته می شوند. با افزایش مقدار جابه جایی و افزایش فاصله بین دو سطح، لیفچه ها کشیده شده و سپس پاره می شود و نیروی چسبناکی تا خط پایه کاهش می یابد، در این مورد نیز حالت وادادگی از نوع وادادگی هم چسبی است (شکل ۱۲) [۲۲].

آزمون پوست کنی

با این آزمون می توان چسبناکی بین پیش آغشته و زیر لایه صلب و همچنین میان دولایه از پیش آغشته را محاسبه کرد. در این آزمون دو دسته غلتک موجود است. دسته اول، وظیفه هدایت لایه ها و دسته دوم اعمال نیرو و پوست کنی را بر عهده دارند. آزمون پوست کنی انجام شده از نوع ۹۰° است (شکل ۱۳).

اگر هدف یافتن مقدار چسبناکی بین پیش آغشته و ابزار باشد، نوار پیش آغشته روی زیر لایه صلب حرکت می کند و سپس مقدار چسبناکی اندازه گیری می شود. اما اگر هدف اندازه گیری مقدار چسبناکی بین دولایه پیش آغشته باشد، لایه پایینی به طرفین دستگاه پوست کنی گیر داده می شود و لایه بالایی از روی آن حرکت می کند. در این حالت، نیروی ممانعت کننده از این حرکت به عنوان نیروی چسبناکی گزارش می شود.

دو حالت کلی وادادگی های هم چسبی و فصل مشترک در این آزمون وجود دارد که بسته به شرایط پیش گفته می توانند به یکدیگر تبدیل شوند. اگر مقدار رزین برجامانده روی بستر چشمگیر بوده و لیفچه ها تشکیل شده باشند، وادادگی از نوع هم چسبی (شکل ۱۴-الف) بوده و نشانگر مقدار چسبناکی زیاد است. ولی اگر مقدار برجامانده روی بستر قابل چشم پوشی بوده و تقریباً

که در آن

$\epsilon_{0\% \text{ tensile}}$: کرنش در نیروی صفر در حین اعمال کشش

ϵ_{max} : کرنش در بیشترین فشار

σ : تنش است.

انرژی فشردگی برابر است با مجموع انرژی ناحیه اعمال فشار در منحنی تنش-کرنش یعنی مرحله فشردگی، مرحله نگه داشتن فشار و مرحله کشش تا نقطه صفر شدن فشار که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Compressive energy} = \int_{\epsilon_{0\%}}^{\epsilon_{\text{min}}} \sigma d\epsilon + \int_{\epsilon_{\text{min}}}^{\epsilon_{\text{min, hold}}} \sigma d\epsilon + \int_{\epsilon_{\text{min, hold}}}^{\epsilon_{0\% \text{ tensile}}} \sigma d\epsilon$$

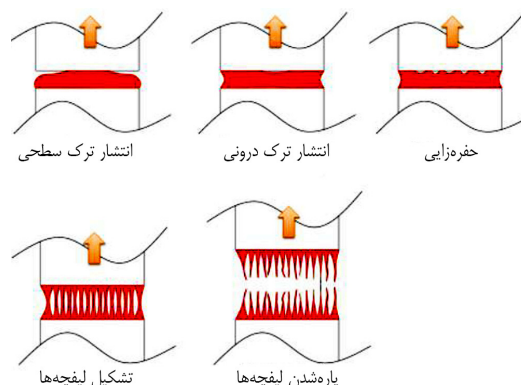
که در آن

$\epsilon_{0\%}$: کرنش در شروع چرخه چسبناکی

ϵ_{min} : کرنش در کمترین فشار بعد از اعمال فشار

$\epsilon_{\text{min, hold}}$: کرنش در کمترین فشار بعد از مرحله نگه داشتن است. ضریب چقرمگی بیانگر انرژی لازم برای جدا کردن لایه های پیش آغشته است درحالی که انرژی فشردگی مقدار انرژی لازم برای فشردگی چندلایه ای پیش آغشته تا حد مشخصی از فشار را نشان می دهد [۳۰].

دو حالت کلی وادادگی و سه سازوکار وادادگی در آزمون کاوند مشاهده شده است. زمانی که فصل مشترک بین پیش آغشته و کاوند بسیار ضعیف است، سازوکار انتشار ترک سبب وادادگی فصل مشترک می شود. همچنین، به وجود آمدن و انتشار ترک در خود رزین نیز می تواند دیگر سازوکار وادادگی باشد اما در این مورد حالت وادادگی از نوع وادادگی هم چسبی است. سازوکار سوم وادادگی سازوکار حفره زایی و تشکیل لیفچه است، در هنگام فشار بین صفحه بالایی و لایه پیش آغشته حفره هایی به دلیل محبوس شدن هوا بین دو سطح ایجاد می شود، سپس زمانی که صفحه بالایی



شکل ۱۲- تصویر سازوکارهای مختلف وادادگی در آزمون کاوند [۲۳].



شکل ۱۴- دو حالت مختلف وادادگی چسبناکی در آزمون پوست‌کنی [۷].

وادادگی شود. سرعت لایه‌چینی، نیروی فشاری در هنگام لایه‌چینی و زمان تماس لایه‌ها با یکدیگر نیز به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل فرایندی اثرگذار بر مقدار چسبناکی شناخته شده‌اند. به‌دلیل عدم وجود آزمون استاندارد، از آزمون‌های مختلف برای سنجش مقدار چسبناکی پیش‌آغشته استفاده شده است. اما در سال‌های اخیر به‌دلیل شباهت بسیار زیاد آزمون‌های کاوند و پوست‌کنی به فرایندهای لایه‌چینی و حرکت لایه‌ها بر یکدیگر، این دو آزمون به‌عنوان آزمون‌های اصلی بررسی شدند. دو سازوکار وادادگی هم‌چسبی و فصل مشترک به‌عنوان سازوکارهای وادادگی در چسبناکی بین دو سطح مطالعه شده‌اند. در نقاطی که مقدار چسبناکی زیاد است یا عواملی سبب افزایش چسبناکی می‌شود، وادادگی از نوع هم‌چسبی است. در نقاطی که مقدار چسبناکی کم باشد یا عواملی سبب کاهش آن شود، سازوکار چسبناکی به وادادگی فصل مشترک تغییر می‌کند.

هیچ لیفچه‌ای تشکیل نشده باشد، وادادگی در فصل مشترک است (شکل ۱۴-ب). زمانی اوج چسبناکی رخ می‌دهد که هر دو مقدار چسبناکی هم‌چسبی و فصل مشترک برابر باشد [۷، ۲۹].

نتیجه‌گیری

چسبناکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مشخصه‌های پیش‌آغشته پس از مرحله پیش‌پخت معرفی شد. عوامل مؤثر بر چسبناکی پیش‌آغشته به دو دسته کلی عوامل ساختاری و فرایندی تقسیم می‌شوند. گرانیوی، دما و درصد پخت به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل ساختاری مؤثر بر چسبناکی پیش‌آغشته شناخته شده‌اند. این عوامل کاملاً به یکدیگر وابسته‌اند و تغییر هریک از آنها می‌تواند مقدار چسبناکی را به‌شدت تغییر دهد و باعث ایجاد تغییر در سازوکار

مراجع

1. Ahn K.J. and Seferis J.C., Prepreg Process Analysis, *Polym. Compos.*, **14**, 349-360, 1993.
2. Khalafi H.R. and Mortezaei M., Effect of Processing Parameters on the Properties of Solvent and Hot-melt Prepreg Manufacturing Methods, *Polymerization (Persian)*, **4**, 72-82, 2014.
3. Roşu D., Caşcaval C.N., Mustatǎ F., and Ciobanu C., Cure Kinetics of Epoxy Resins Studied by Non-Isothermal DSC Data, *Thermochim. Acta.*, **383**, 119-127, 2002.
4. Goode K., Automated Ply Lamination, *ASM Handbook*, ASM International, 639-641, 1987.
5. Endruweit A., Ghose S., Johnson B.A., Kelly S., De Focatiis D.S.A., and Warrior N.A., Tack Testing to Aid Optimisation of Process Parameters for Automated Material Placement in an Industrial Environment, *Annual International Conference on Composite Materials (ICCM 21)*, Xi'an, 20-25 August, 2017.
6. Gent A.N. and Hamed G.R., *Fundamentals of Adhesion*, Springer, Boston, 39-73, 1990.
7. Crossley R.J., Schubel P.J., and Warrior N.A., The Experimental Determination of Prepreg Tack and Dynamic Stiffness, *Compos.: Part A. Appl. Sci. Manuf.*, **43**, 423-434, 2012.
8. Ahn K.J., Seferis J.C., Pelton T., and Wilhelm M., Deformation Parameters Influencing Prepreg Tack, *SAMPE Quarterly*, **13**, 148-158, 1992.
9. Crossley R.J., Schubel P.J., and De Focatiis D.S., Time-Temperature Equivalence in the Tack and Dynamic Stiffness of Polymer Prepreg and Its Application to Automated Composites Manufacturing, *Compos.: Part A. Appl. Sci. Manuf.*, **52**, 126-133, 2013.
10. Banks R., Mouritz A.P., John S., Coman F., and Paton R., Development of a New Structural Prepreg: Characterisation of Handling, Drape and Tack Properties, *Compos. Struct.*, **66**, 169-174, 2004.
11. Akay M., Effects of Prepreg Ageing and Post-Cure Hygrothermal Conditioning on the Mechanical Behaviour of Carbon-

- Fibre/Epoxy Laminates, *Compos. Sci. Technol.*, **38**, 359-370, 1990.
12. Anon V., Prepreg Technology, <http://www.hexcel.com/resources/datasheets>, Available in 12 January 2013.
13. Bakhshi N. and Hojjati M., An Experimental and Simulative Study on the Defects Appeared During Tow Steering in Automated Fiber Placement, *Compos.: Part A. Appl. Sci. Manuf.*, **113**, 122-131, 2018.
14. Ahn K.J., Seferis J.C., Pelton T., and Wilhelm M., Analysis and Characterization of Prepreg Tack, *Polym. Compos.*, **13**, 197-206, 1992.
15. Crossley R.J., Schubel P.J., and Warrior N.A., The Experimental Characterisation of Prepreg Tack, *Annual International Conference on Composite Materials (ICCM-17)*, Edinburgh, 27-31 July, 2009.
16. Ahn K.J., Peterson L., Seferis J.C., Nowacki D., and Zachmann H.G., Prepreg Aging in Relation to Tack, *Appl. Polym. Sci.*, **45**, 399-406, 1992.
17. Bjornsson A., Lindback J.E., Eklund D., and Jonsson M., Low-Cost Automation for Prepreg Handling-Two Cases from the Aerospace Industry, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, **9**, 68-74, 2016.
18. Rao S., Umer R., and Cantwell W.J., An Evaluation of the Compression Response of High-Performance Prepregs for AFP Applications, *Polym. Polym. Compos.*, **23**, 389-398, 2015.
19. Shu Z., Peng X., and Li F.F., Cohesive Zone Model for Prepreg Tack Based on Probe Test, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **39**, 416-429, 2018.
20. Rajaei M., Beheshty M.H., and Hayaty M., Preparation and Processing Characterization of Glass/Phenolic Prepregs, *Polym. Polym. Compos.*, **19**, 789- 796, 2011.
21. Gillanders A.M., Kerr S., and Martin T.J., Determination of Prepreg Tack, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **1**, 125-134, 1981.
22. Schubel P.J., Crossley R.J., Boateng E.K., and Hutchinson J.R., Review of Structural Health and Cure Monitoring Techniques for Large Wind Turbine Blades, *Renew. Energ.*, **51**, 113-123, 2013.
23. Drakonakis V.M., Velisaris C.N., Seferis J.C., Doumanidis C.C., Wardle B.L., and Papanicolaou G.C., Matrix Hybridization in the Interlayer for Carbon Fiber Reinforced Composites, *Polym. Compos.*, **31**, 1965-1976, 2010.
24. Mezger T.G., *The Rheology Handbook: for Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*, Vincentz Network, Hannover, 159, 2006.
25. O'Connor A.E. and Willenbacher N., The Effect of Molecular Weight and Temperature on Tack Properties of Model Polyisobutylenes, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **24**, 335-346, 2004.
26. Islam A.I., Design and Development of Nanofiber Engineered Polymer Composite Prepregs, Doctoral Dissertation, North Carolina Agricultural and Technical State University, January 2018.
27. Nguyen D.C. and Krombholz C., Influence of Process Parameters and Material Aging on the Adhesion of Prepreg in AFP Processes, *Annual European Conference on Composite Materials (ECCM17)*, Munich, 26-30 June, 2016.
28. Wohl C., Palmieri F.L., Forghani A., Hickmott C., Bedayat H., Coxon B., Poursartip A., and Grimsley B., Tack Measurements of Prepreg Tape at Variable Temperature and Humidity, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa>, available in 9 October 2017.
29. Endruweit A., Choong G.Y., Ghose S., Johnson B.A., Younkin D.R., Warrior N.A., and De Focatiis D.S., Characterisation of Tack for Uni-Directional Prepreg Tape Employing a Continuous Application-and-Peel Test Method, *Compos.: Part A. Appl. Sci. Manuf.*, **114**, 295-306, 2018.
30. Putnam J.W., Seferis J.C., Pelton T., and Wilhelm M., Perceptions of Prepreg Tack for Manufacturability in Relation to Experimental Measures, *Sci. Eng. Compos. Mater.*, **4**, 143-54, 1995.