نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۵

بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند ترموفرمینگ برای تولید پهپادهای بال ثابت

امیر عرب زاده شمس [۱]، مسعود جوادی [۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱)

چکیده

تحقیق حاضر به پارامترهای مؤثر در فرآیند ترموفرمینگ برای تولید قطعات پیچیده و سبک در صنعت هوافضا، به ویژه در ساخت پهپادهای بال ثابت می‌پردازد. ترموفرمینگ، فرآیندی است که شامل گرم کردن مواد ترموپلاستیک و شکل‌دهی آن‌ها به اشکال دلخواه است. این فرآیند به دلیل مزایایی چون کاهش وزن، بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های تولید، کاربرد گسترده‌ای دارد. یکی از عوامل کلیدی مؤثر در این فرآیند، دما است که باید به‌طور دقیق تنظیم شود تا مواد به نقطه نرم‌شدن خود برسند، بدون اینکه خواص فیزیکی آن‌ها آسیب ببینند. تحقیقات نشان می‌دهد که دماهای بالای غیرکنترل‌شده می‌توانند منجر به ذوب شدن بیش از حد و تخریب خواص مکانیکی شوند. به همین دلیل، استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی حرارتی و تحلیل‌های تجربی برای بهینه‌سازی دما از اهمیت بالایی برخوردار است. فشار اعمالی در طی فرآیند ترموفرمینگ نیز تأثیر زیادی بر کیفیت سطح و دقت ابعادی محصولات دارد. انتخاب نوع مواد و ترکیبات مختلف ترموپلاستیک‌ها نیز در این فرآیند بسیار مهم است. برای تولید پهپادهای بال ثابت، باید مواد سبک، با استحکام بالا و قابلیت فرم‌دهی مناسب انتخاب شوند. مواد عمومی مانندPVC ، ABS و پلی‌کربنات به دلیل خواص مکانیکی عالی و سهولت در فرآیند تولید، گزینه‌های مناسبی هستند. این تحقیق به بررسی تأثیر اشعه UV به‌عنوان یک متغیر کلیدی در فرآیند ترموفرمینگ پرداخته و نشان می‌دهد که استفاده از پایدارکننده‌های UV می‌تواند به حفظ خواص مکانیکی و ظاهری مواد در برابر تابش UV کمک کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بهینه‌سازی دما، فشار و زمان در فرآیند ترموفرمینگ منجر به تولید قطعات با کیفیت بالاتر و استحکام بیشتر می‌شود. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در صنعت هوافضا مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود کیفیت و عملکرد پهپادهای بال ثابت کمک کند.

واژه‌های کلیدی: *ترموفرمینگ، ترموپلاستیک، مواد PVC، پهپاد بال ثابت، اشعه UV*

Investigation of Effective Parameters in the Thermoforming Process for the Production of Fixed-Wing Drones

A. Arabzadeh Shsms, M.Javadi

Abstract

The present research focuses on the parameters impacting the thermoforming process for producing complex and lightweight components in the aerospace industry, particularly in the construction of fixed-wing drones. Thermoforming is a process that involves heating thermoplastic materials and shaping them into desired forms. This process is widely applied due to advantages such as weight reduction, improved efficiency, and lower production costs. One of the key factors in this process is temperature, which must be precisely controlled to ensure that the materials reach their softening point without damaging their physical properties. Research indicates that uncontrolled high temperatures can lead to excessive melting and degradation of mechanical properties. Therefore, employing thermal simulation techniques and experimental analyses for temperature optimization is highly important. The pressure applied during the thermoforming process also significantly affects the surface quality and dimensional accuracy of the products. The selection of materials and various combinations of thermoplastics is also crucial in this process. For producing fixed-wing drones, lightweight materials with high strength and suitable moldability should be chosen. Common materials such as PVC, ABS, and polycarbonate are suitable options due to their excellent mechanical properties and ease of processing. This research examines the impact of UV radiation as a key variable in the thermoforming process and demonstrates that the use of UV stabilizers can help preserve the mechanical and aesthetic properties of materials against UV exposure. The findings indicate that optimizing temperature, pressure, and time in the thermoforming process leads to the production of higher quality parts with greater strength. This research can serve as an effective strategy in the aerospace industry and contribute to enhancing the quality and performance of fixed-wing drones.

Key words: *Thermoforming, Thermoplastics, PVC materials, Fixed-wing drone, UV radiation*

* نویسنده پاسخگو: مسعود جوادی، تلفن: ۰۹۱۲۷۵۷۵۲۴۷ پست الکترونیک: javadi@ssau.ac.ir

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

ترموفرمینگ یکی از فرآیندهای کلیدی در تولید قطعات پیچیده و سبک با استفاده از مواد ترموپلاستیک است و در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی و تولید پهپادها کاربرد دارد. این روش تولید به ویژه در دهه‌های اخیر از پیشرفت‌های چشمگیری برخوردار شده است. تاریخچه ترموفرمینگ به دهه ۱۹۴۰ بازمی‌گردد[۱]، در این دوران، مواد اولیه به‌کاررفته عمدتاً به پلی‌ستیرن و PVC محدود می‌شد. محققانی مانند دکتر دنیل گانسر در سال ۲۰۲۱ فرآیند ترموفرمینگ را در تولید قطعات سبک برای هواپیماهای بدون سرنشین بررسی کردند[۲]. آن‌ها به بررسی اثر دما و زمان بر ویژگی‌های مکانیکی مواد پرداختند و به نتایج مهمی درباره بهینه‌سازی این پارامترها دست یافتند. همچنین، دکتر لانگ بین نیز در سال ۲۰۲۲ تحقیقاتی درباره استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرآیندهای ترموفرمینگ انجام داده و نشان داده است که مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند پیش‌بینی دقیقی از رفتار مواد در حین فرآیند ایجاد کنند[۳]. این پیشرفت‌ها به شناسایی مشکلات و بهینه‌سازی شرایط تولید کمک کرده است. با گذشت زمان و پیشرفت در فناوری مواد، استفاده از پلیمرهای مهندسی مانند ABS و پلی‌کربنات در این فرآیند متداول شد. این پیشرفت‌ها امکان تولید قطعات پیچیده‌تری را فراهم کرد و منجر به رشد صنعت پهپادها گردید. ابتدا، یکی از مهم‌ترین پارامترها در فرآیند ترموفرمینگ، انتخاب مواد مناسب است. مواد ترموپلاستیک انتخابی باید دارای خواص مکانیکی و حرارتی مطلوبی باشند. پلیمرهایی چون ABS، پلی‌کربنات و پلی‌استر، به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و قابلیت شکل‌پذیری بالا، به طور گسترده‌ای در تولید بدنه و بال‌های پهپادهای بال ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند. دومین پارامتر کلیدی، دمای فرآیند ترموفرمینگ است. دما باید به اندازه‌ای باشد که ماده به حالت نرمی و شکل‌پذیری مناسب برسد، در حالی‌که زمان به عنوان پارامتر بعدی باید به گونه‌ای مدیریت شود که از افزایش بیش از حد دما و تغییرات خواص فیزیکی مواد جلوگیری شود. آزمایشات تجربی و مدل‌سازی عددی می‌تواند به تعیین شرایط بهینه دما و زمان کمک کند. سومین عامل تأثیرگذار، فشار اعمالی در فرآیند است. افزایش فشار می‌تواند به بهبود کیفیت سطح و دقت ابعادی کمک کند؛ اما فشار بیش از حد ممکن است منجر به خرابی و جدایی لایه‌ها شود. بنابراین، انتخاب فشار مناسب برای حصول به بهترین کیفیت و کمترین نقص، از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، طراحی هندسه و ضخامت قطعات نیز نقش مهمی در فرآیند ترموفرمینگ ایفا می‌کند. توزیع صحیح ضخامت و طراحی مناسب بال‌ها و بدنه می‌تواند به بهبود عملکرد آیرودینامیکی و استحکام ساختاری پهپاد کمک کند.

در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند ترموفرمینگ می‌تواند به تولید پهپادهای با کارایی بالا و وزن کم منجر شود. این فرآیند نه تنها به استحکام و دوام پهپادها کمک می‌کند، بلکه هزینه‌های تولید را نیز کاهش می‌دهد و در نهایت کیفیت محصولات را ارتقا می‌بخشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پارامترهای چون دما، فشار و زمان در فرآیند ترموفرمینگ منجر به تولید قطعات با کیفیت بالاتر و استحکام بیشتر می‌شود. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در تولید پهپادهای بال ثابت مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش هزینه‌ها تولیدی بدنه، بهبود کیفیت و عملکرد پهپادهای بال ثابت کمک کند.

اصول فرآیند ترموفرمینگ

ترموفرمینگ یک فرآیند تولید است که در آن ورق‌های پلاستیکی تحت تأثیر حرارت و فشار قرار می‌گیرند تا به شکل‌های موردنظر قالب‌گیری شوند. مراحل اصلی این فرآیند شامل گرمایش، فرم‌دهی و خنک‌سازی است که به صورت کلی در شکل ۱ به اختصار این فرآیند قابل مشاهده می‌باشد.

مراحل فرآیند

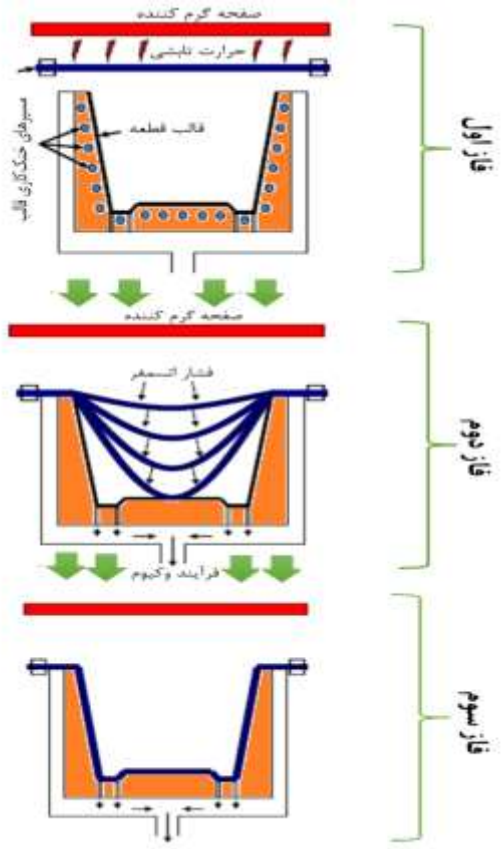
۱.گرمایش: ورق پلاستیکی به دماهای بالا (معمولاً بین ۱۶۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) رسانده می‌شود تا قابلیت شکل‌پذیری خود را به دست آورد. تنظیم دما به‌طور مستقیم بر توانایی ماده برای فرم‌دهی تأثیر می‌گذارد و دمای مناسب بسته به نوع ماده و ضخامت ورق متفاوت خواهد بود.

$$T[f] = T[m] - \Delta T \quad (۱)$$

که در آن $T[f]$ دمای فرم‌دهی، $T[m]$ دمای ذوب ماده و ΔT تغییر دما در نظر گرفته می‌شود. در همین راستا در اثر گرمایش مواد پلیمری (پلاستیکی)، مواد دچار جمع‌شوندگی می‌شوند که برای مواد مختلف به شرح جدول ذیل می‌باشد.

۲. فرم‌دهی: پس از گرم شدن، ورق روی قالب قرار گرفته و تحت فشار (معمولاً در محدوده ۲ تا ۸ بار) قرار می‌گیرد. این فشار باعث می‌شود ورق به شکل قالب درآید و به‌طور دقیق با جزئیات قالب منطبق شود.

۳. خنک‌سازی: پس از فرم‌دهی، قطعه تولیدشده باید به آرامی خنک شود تا از انحناء و تغییر شکل جلوگیری گردد[۵]. این مرحله به‌خصوص در حفظ کیفیت و دقت نهایی قطعه حیاتی است. در همین راستا در جدول ۱ می‌توان میزان جمع‌شوندگی برخی از ترموپلاستیک‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- فرآیند ترموفرمینگ

جدول۱- میزان جمع‌شوندگی برای ترموپلاستیک‌ها[۴]

مواد	Shrinkage %
ABS	۰/۵-۰/۹
PS	۰/۵-۰/۸
PP	۱/۰-۲/۵
LDPE	۱/۵-۴/۵
HDPE	۲/۰-۴/۵

عوامل مؤثر بر فرآیند ترموفرمینگ

در این بخش به بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت ساخت قطعات پرداخته شد.

۱. دما

تنظیم دما به‌طور مستقیم بر توانایی ماده برای فرم‌دهی تأثیر می‌گذارد. دما باید به اندازه‌ای باشد که پلیمر شرایط مطلوب شکل‌پذیری را داشته باشد، به‌طوریکه این خصوصیات به ازای هر نوع پلیمر متفاوت است که در جدول ۲ برای بخشی از پلیمرها بیان شده. برای مثال، پلی‌اتیلن با دمای ذوب ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است در دماهای پایین‌تر نیز بتواند فرم‌دهی را تجربه کند.

جدول۲- میزان دمای بهینه شکل‌پذیری مواد ترموپلاستیک[۶]

انواع مواد	Forming temp (°)
ABS	۱۲۱-۱۸۸
PS	۱۴۳-۱۷۷
PP	۱۵۴-۱۹۹
PVC	۱۲۱-۱۷۷
PC	۱۸۲-۲۱۶
PETE	۱۲۹-۱۶۳

۲. فشار

فشار مورد استفاده در فرآیند ترموفرمینگ نیز تأثیر زیادی بر توزیع مواد و استحکام نهایی دارد. فشار کم می‌تواند منجر به عیوب سطحی و عدم دقت در شکل‌پذیری گردد. رابطه ساده بین فشار و استحکام کششی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود[۸] :

$$\sigma = F/A \quad (۲)$$

که در آن σ استحکام کششی، F نیرو و A مساحت ناحیه مقطع است.

۳. زمان

زمان نگهداری در دما و فشار مشخص نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زمان بیشتر می‌تواند به بسط بهتر مواد کمک کند، اما همچنین ریسک تغییرات منفی خواص مکانیکی را نیز به همراه دارد. این نکته به‌خصوص در رابطه (۳) قابل بیان است[۸] :

$$E = E[0] - e^{\wedge}(-kt) \quad (۳)$$

که در آن E مدول الاستیسیته در زمان t ، E_0 مدول اولیه و k ثابت معین است. در جدول ۳ زمان نگهداری مناسب برای ترموپلاستیک‌ها بیان شده:

جدول۳- زمان بهینه حرارت دهی برای مواد ترموپلاستیک [۶]

انواع مواد	Heating time (sec)
ABS	۸۰
PS	۶۰
PE	۱۰۰
PP	۱۰۰
PVC	۶۰
PC	۱۲۰

۴. متغیرهای مؤثر بر قابلیت فرم‌دهی مواد

در این بخش به متغیرهای دیگری پرداخته می‌شود که می‌توانند بر کیفیت فرآیند ترموفرمینگ تأثیر بگذارند.

۴،۱. نوع ماده

انتخاب نوع پلیمر برای فرآیند ترموفرمینگ اهمیت بالایی دارد. پلیمرهای مختلف شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن و پلی‌وینیل کلراید هرکدام خواص منحصربه‌فردی دارند که تأثیر زیادی بر روی شکل‌پذیری و ویژگی‌های نهایی دارند.

- پلی‌اتیلن: از لحاظ کششی و انعطاف‌پذیری خوب است ولی مقاومت کمتری در برابر دماهای بالا دارد.
- پلی‌پروپیلن: مقاوم‌تر در برابر دما و مواد شیمیایی است و بیشتر برای تولید قطعات تحت فشار استفاده می‌شود[۷].

ضریب LDR (نسبت تغییر طول)

ضریب LDR یک پارامتر کلیدی در علم مواد و فرآیندهای شکل‌دهی است که به اندازه‌گیری تغییرات طول یک خط یا بُعد خاص در یک قطعه پس از انجام عملیات شکل‌دهی می‌پردازد. مفهوم LDR به ویژه در صنایعی که از ورق‌های فلزی یا مواد پلیمری برای ساخت قطعات سه‌بعدی استفاده می‌کنند، اهمیت زیادی دارد. محاسبه LDR بر اساس مقایسه طول خطی که بر روی ورق قبل از شکل‌دهی مشخص شده و طول همان خط پس از انجام شکل‌دهی انجام می‌شود. فرمول محاسبه LDR به صورت زیر است[۱۰] :

$$LDR = \frac{\text{طول خط در قسمت شکل‌گرفته}}{\text{طول خط قبل از شکل‌دهی}}$$

این نسبت به ما این امکان را می‌دهد تا تأثیر فرآیند شکل‌دهی را بر روی ابعاد قطعه اندازه‌گیری کنیم. اگر LDR بالاتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که طول خط در اثر شکل‌دهی افزایش یافته است و می‌تواند به معنای کشش یا تغییر شکل باشد. در مقابل، اگر LDR کمتر از ۱ باشد، به معنی این است که خط کوتاه‌تر شده است که ممکن است نتیجه فشرده‌سازی یا هزینه‌های دیگر باشد.

ضریب ADR (نسبت تغییر مساحت)

ضریب ADR یکی دیگر از پارامترهای مهم در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی است که به بررسی کشش و تغییرات سطحی در مواد می‌پردازد. این نسبت به‌ویژه در صنایع تولیدی که نیاز به شکل‌دهی دقیق ورق‌های فلزی یا دیگر مواد دارند، کاربرد گسترده‌ای دارد.

محاسبه ADR از طریق مقایسه مساحت سطح قسمت شکل‌گرفته بر اساس ماده اولیه و مساحت سطح ورق به کار رفته انجام می‌گیرد. فرمول محاسبه ADR به صورت زیر است [۸]:

$$ADR = \frac{\text{مساحت سطح قسمت شکل‌گرفته}}{\text{مساحت سطح ورق اولیه}}$$

این نسبت اطلاعات کلیدی را در مورد چگونگی تغییرات سطحی به دست می‌دهد که جدول ۴ میزان ADR و LDR را برای مواد ترموپلاستیک بیان کرده. به‌طور مثال، اگر ADR بیشتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که قطعه در طی فرآیند شکل‌دهی افزایش یافته است، که می‌تواند به معنای کشش و تغییر هندسی باشد. در مقابل، اگر ADR کمتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که سطح و طول ماده کاهش یافته و ممکن است ناشی از ویژه‌سازی شکل‌دهی باشد.

جدول۴- ضریب LDR و ADR برای مواد ترموپلاستیک[۹]

مواد	Maximum LDR	Maximum ADR
ABS	۳/۴	۵/۵
Acrylic	۲/۱	۳/۴
HDPE	۴/۳	۶/۵
LDPE	۴/۵	۶/۰
PP	۷/۱	۷/۵
PVC	۴/۱	۴/۳

۴،۲. ضخامت ورق

ضخامت ورق نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در فرآیند ترموفرمینگ است. ورق‌های ضخیم‌تر نیاز به دمای بالاتری برای شکل‌دهی دارند و طول زمان بیشتری هم برای گرم شدن نیاز خواهند داشت.

رابطه ضخامت و دما: به‌طور کلی، ضخامت بیشتر به معنای دمای بالای کنترل‌شده و زمان بیشتری برای گرم کردن می‌باشد.

$$T_{ideal} = k.t^n \qquad (۴)$$

T_{ideal} دمای ایده‌آل برای گرم‌کردن ورق به فرم پلاستیک k یک ثابتی است (درجه سانتی‌گراد بر میلی‌متر) که به نوع ماده (مثلاً پلیمر) و خواص آن بستگی دارد، t ضخامت ورق و n یک نمایی است که معمولاً در حدود مقدار ۱ تا ۳ قرار دارد و به نوع ماده و ویژگی‌های آن بستگی دارد. که برای برخی از ترموپلاستیک‌های در جدول ۵ بیان شده:

جدول۵- ضریب n و k برای پلاستیک‌های گوناگون[۱۰]

مواد	k	n
ABS	۰/۵-۱/۲	۱/۵-۳/۰
PS	۰/۵-۱/۰	۱/۳-۲/۰
HDPE	۰/۴-۱/۰	۱/۵-۲/۰
LDPE	۰/۵-۱/۲	۱/۲-۲/۰
PP	۰/۴-۱/۱	۱/۵-۲/۵
PVC	۰/۵-۱/۵	۱/۵-۲/۰

۴،۳. طراحی قالب

طراحی مناسب قالب می‌تواند تأثیر زیادی بر روند فرم‌دهی داشته باشد. توجه به نکات زیر در طراحی قالب می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند کمک کند:

- **زاویه‌های عرضه:** زاویه‌های مناسب در طراحی قالب می‌تواند به کاهش تنش‌ها و تنش‌های اضافی کمک کند[۱۱].
- **نوع قالب مثبت و یا منفی:**

در قالب مثبت، شکل مورد نظر به سمت بالا برجسته شده است. در این روش، ورق پلاستیکی روی قالب قرار می‌گیرد و تحت تأثیر حرارت نرم می‌شود. سپس با اعمال فشار (معمولاً از طریق ایجاد خلاء)، ورق به شکل قالب شکل می‌گیرد. قالب‌های مثبت معمولاً برای تولید قطعاتی با طراحی‌های پیچیده و خاص مناسب هستند. یکی از مزایای این نوع قالب، سهولت در جدا کردن قطعه نهایی از قالب است، زیرا از روی قالب جدا می‌شود و این امر باعث کاهش خطر آسیب به قطعه می‌شود. در قالب منفی، شکل طراحی به صورت فرورفتگی در قالب ایجاد می‌شود و ورق پلاستیکی به سمت داخل قالب فشار داده می‌شود. این روش معمولاً برای تولید قطعاتی با جزئیات زیاد، مانند ظروف پلاستیکی و قطعات صنعتی استفاده می‌شود[۱۲]. یکی از برتری‌های قالب‌های منفی، دقت بالاتر در تولید قطعات با جزئیات ظریف است. همچنین، این قالب‌ها معمولاً برای تولید مقادیر زیاد و یکنواخت مناسب هستند. در انتخاب بین قالب مثبت و منفی، باید به نوع محصول، جزئیات طراحی و مقدار تولید توجه کرد. قالب مثبت برای پیچیدگی‌های کمتری مناسب‌تر است و جداسازی آسان‌تری دارد، در حالی که قالب منفی دقت و جزئیات بیشتری را در اجزاء نهایی ارائه می‌دهد. به طور کلی، انتخاب مناسب بسته به نیازهای خاص پروژه و نوع قطعه نهایی متفاوت خواهد بود.

- **زیرساخت قالب:** استفاده از متریال مناسب و مقاوم در برابر حرارت برای قالب‌ها می‌تواند مانع از تغییر شکل و از بین رفتن دقت در فرآیند شود.

اتصال ورق‌های PVC بعد از ترموفرمینگ

ورق‌های PVC (پلی وینیل کلراید) به دلیل ویژگی‌های خاص خود، مانند سبکی، مقاومت در برابر رطوبت و سادگی در فرآیند تولید، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مراحل مهم در استفاده از این ورق‌ها، اتصال آن‌ها بعد از فرآیند ترموفرمینگ است. در این مقاله، به بررسی روش‌های علمی و مناسب برای اتصال ورق‌های PVC پس از ترموفرمینگ می‌پردازیم که در شکل ۲ روند ساخت پهپاد به روش ترموفرمینگ نمایش داده شده است.

شکل ۲- فرآیند ساده شده از ساخت پهپاد به روش ترموفرمینگ

روش‌های اتصال ورق‌های PVC

روش‌های مختلفی برای اتصال ورق‌های PVC وجود دارد که شامل چسباندن، جوشکاری و استفاده از اتصالات مکانیکی است. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند.

الف) چسباندن

چسباندن یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای اتصال ورق‌های PVCاست. چسب‌های مخصوص PVC معمولاً بر پایه حلال یا پایه آب هستند. این چسب‌ها به خوبی با سطح PVC ترکیب می‌شوند و اتصالی محکم و مقاوم در برابر رطوبت ایجاد می‌کنند .

چسب‌های حلالی: این نوع چسب‌ها به دلیل قدرت چسبندگی بالا و سرعت خشک شدن سریع، برای اتصال ورق‌های PVC بسیار مناسب هستند. به عنوان مثال، چسب‌های حلالی مانند PVC cement به طور خاص برای این منظور طراحی شده‌اند و می‌توانند اتصالی قوی و دائمی ایجاد کنند[۱۳] .

چسب‌های پایه آب: این چسب‌ها به دلیل عدم وجود حلال‌های آلی، گزینه‌ای ایمن‌تر و دوستدار محیط زیست هستند. آن‌ها معمولاً زمان خشک شدن بیشتری دارند، اما در نهایت اتصالی قوی ایجاد می‌کنند[۱۴] .

ب) جوشکاری

جوشکاری یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای اتصال ورق‌های PVC است. این روش شامل استفاده از حرارت برای ذوب کردن لبه‌های ورق‌ها و سپس ترکیب آن‌ها به یکدیگر است. جوشکاری می‌تواند به دو صورت انجام شود:

- جوشکاری حرارتی: در این روش، از دستگاه‌های جوش حرارتی برای ذوب کردن لبه‌های PVC استفاده می‌شود. این روش به ویژه برای ورق‌های ضخیم‌تر مناسب است و اتصالی بسیار قوی و مقاوم در برابر آب و مواد شیمیایی ایجاد می‌کند[۱].
- جوشکاری با استفاده از گاز: در این روش، از گاز برای تولید حرارت و ذوب کردن لبه‌های PVC استفاده می‌شود. این روش معمولاً برای اتصالات بزرگ‌تر و پیچیده‌تر مناسب است.

ج) اتصالات مکانیکی

استفاده از اتصالات مکانیکی مانند پیچ و مهره نیز می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای اتصال ورق‌های PVC باشد. این روش به ویژه در مواردی که نیاز به جداسازی و تعمیر وجود دارد، مفید است. با این حال، این روش ممکن است به دلیل ایجاد سوراخ در ورق‌ها، مقاومت در برابر آب را کاهش دهد.

(پلی وینیل کلراید) PVC

روش چسباندن: چسب‌های حلالی مانند PVC cement بهترین گزینه برای اتصال ورق‌های PVC هستند. این چسب‌ها به خوبی با سطح PVC ترکیب شده و اتصالی قوی و مقاوم در برابر رطوبت ایجاد می‌کنند.

-روش جوشکاری: جوشکاری حرارتی (Thermal Welding) نیز بر روی PVC قابل استفاده است و می‌تواند اتصالی بسیار قوی به وجود آورد، به ویژه برای ورق‌های با ضخامت بیشتر.

(اکریلونیتریل بوتادین استایرن) ABS

روش چسباندن: چسب‌های مخصوص ABS که معمولاً بر پایه حلال هستند بهترین گزینه برای اتصال ورق‌های ABS می‌باشند. این چسب‌ها می‌توانند پیوند محکمی ایجاد کنند و با ترکیب مناسب، مقاومت خوبی در برابر ضربه و کشش ارائه دهند.

روش جوشکاری: جوشکاری حرارتی نیز برای ABS مؤثر است، اما باید دقت کرد که دمای مورد استفاده از دمای ذوب ABS بیشتر نشود تا خاصیت مکانیکی آن حفظ شود.

(پلی استایرن) PS

روش چسباندن: برای پلی استایرن، چسب‌های حلالی مانند styrene cement استفاده می‌شود. چسب‌های مخصوص پلی استایرن می‌توانند اتصال قوی و پایدار ایجاد کنند.

روش جوشکاری: جوشکاری نیز امکان‌پذیر است، اما به دلیل شکنندگی پلی استایرن و حساسیت آن به حرارت، این روش معمولاً توصیه نمی‌شود.

(پلی پروپیلن) PP

روش چسباندن: چسب‌های دو جزئی (دوپیشنهادی) به عنوان بهترین گزینه برای اتصال پلی پروپیلن شناخته می‌شوند. برای اتصال مؤثر، از چسب‌های مخصوص پلی پروپیلن که عموماً بر پایه اپوکسی هستند، استفاده می‌شود.

روش جوشکاری: جوشکاری حرارتی و جوشکاری با امواج اولتراسونیک نیز برای پلی پروپیلن مناسب هستند. جوشکاری با امواج اولتراسونیک به دلیل دقت و سرعت بالا در اتصال، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(پلی اتیلن با چگالی کم) LDPE

روش چسباندن: چسب‌های مخصوص LDPE که معمولاً بر پایه آکریلیک یا EVA (اتیلن وینیل استات) هستند، می‌توانند به خوبی برای اتصال LDPE استفاده شوند.

روش جوشکاری: جوشکاری حرارتی و جوشکاری با گاز نیز می‌تواند برای LDPE مورد استفاده قرار گیرد. جوشکاری حرارتی به دلیل خاصیت خاص LDPE در دمای پایین، اغلب توصیه می‌شود.

(پلی اتیلن با چگالی بالا) HDPE

روش چسباندن: اتصال HDPE به چالش‌هایی مواجه است؛ بنابراین، چسب‌های پلی‌اودی‌تایلین) مخصوص (HDPE استفاده می‌شوند. این چسب‌ها معمولاً نیاز به پیش‌پردازش مثل پانچ کردن دارند.

روش جوشکاری: جوشکاری حرارتی و جوشکاری با امواج اولتراسونیک برای HDPE مؤثر است. این روش‌ها غالباً برای اتصالات ساختاری و پیوستگی فیزیکی مطلوبی را فراهم می‌آورند.

تجزیه و تحلیل کیفی و کمی

برای تجزیه و تحلیل اثرات پارامترهای مختلف، از روش‌های آماری و مهندسی استفاده می‌شود. این اطلاعات می‌تواند شامل تغییرات خواص مکانیکی، مطالعه بر روی ضریب الاستیسیته و حامل‌های کششی قطعات تولیدی باشد. اطلاعات حاصل می‌تواند به‌واسطه آزمون‌های زیر بررسی گردد:

- **آزمون کشش:** برای اندازه‌گیری استحکام و شکل‌پذیری.
- **تحلیل میکروسکوپی:** برای بررسی عیوب سطحی و تغییرات ساختاری[۱۵] .

آزمون‌های مکانیکی

تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی می‌تواند به ارزیابی کیفیت نهایی کمک کند .

- **مدول الاستیسیته:** می‌تواند به‌عنوان معیاری برای توصیف سختی و انبساط مواد در نظر گرفته شود [۱۶].
- **استحکام کششی:** قادر به نشان دادن حد تحمل مواد تحت بارگذاری نیست.

تأثیر UV (اشعه ماوراء بنفش) بر مواد پلاستیکی پس از ساخت قطعات پهپادهای بال ثابت به روش ترموفرمو‌ینگ

تأثیر UV (اشعه ماوراء بنفش) بر مواد پلاستیکی پس از عملیات ترموفرمینگ موضوعی مهم در بکارگیری این مواد در جهت ساخت پهپادهای بال ثابت است. در زیر به بررسی این تأثیرات پرداخته می‌شود:

۱.تغییرات شیمیایی و فیزیکی

- **تجزیه شیمیایی** :اشعه UV می‌تواند باعث تجزیه زنجیره‌های پلیمری شود که منجر به کاهش وزن مولکولی و تغییر خواص مکانیکی مواد می‌گردد. این تجزیه می‌تواند به ایجاد ترک‌ها و شکستگی‌ها در سطح پلاستیک منجر شود.
- **تغییر رنگ** :تابش UV می‌تواند باعث تغییر رنگ و کدر شدن سطح پلاستیک‌ها شود. این تغییر رنگ به دلیل شکست پیوندهای شیمیایی و تولید ترکیبات جدید است.

۲. خواص مکانیکی

- **کاهش استحکام** :مواد پلاستیکی که تحت تابش UV قرار می‌گیرند، معمولاً استحکام کششی و خمشی کمتری نسبت به نمونه‌های غیرمؤثر دارند. این کاهش استحکام می‌تواند به شکست زودرس در کاربردهای عملی منجر شود.
- **افزایش شکنندگی** :با گذشت زمان و تحت تأثیر UV، پلاستیک‌ها ممکن است شکننده‌تر شوند و در نتیجه، قابلیت انعطاف‌پذیری خود را از دست بدهند.

۳. تأثیر بر فرآیند ترموفرمینگ

- **تغییر در خواص حرارتی**: تابش UV می‌تواند خواص حرارتی مواد پلاستیکی را تغییر دهد، که این امر می‌تواند بر فرآیند ترموفرمینگ تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، دماهای ذوب و شکل‌پذیری ممکن است تغییر کند.
- **کیفیت نهایی محصول**: اگر پلاستیک‌ها قبل از ترموفرمینگ تحت تابش UV قرار گیرند، ممکن است کیفیت نهایی محصول کاهش یابد، زیرا تغییرات در خواص مکانیکی و ظاهری می‌تواند بر عملکرد نهایی تأثیر بگذارد.

راه حل های محافظت از قطعات تولید شده پهپادها به روش ترمومو‌فرمینگ در برابر UV

استفاده از UV stabilizers (پایدارکننده‌های UV)

استفاده از پایدارکننده‌های UV در فرآیند ترموفرمینگ می‌تواند به حفظ خواص مکانیکی و ظاهری مواد پلاستیکی در برابر اشعه ماوراء بنفش کمک کند. در زیر به چند نوع پایدارکننده UV که معمولاً برای بهبود فرآیند ترموفرمینگ در ساخت پهپادهای بال ثابت استفاده می‌شوند، اشاره شده است:

۱. پایدارکننده‌های UV از نوع هیدروکسیل-آریل-آلکین‌ها - (Hindered Amine Light Stabilizers HALS)

این نوع پایدارکننده‌ها به طور اختصاصی برای جلوگیری از تجزیه زنجیره‌ای پلیمرها در برابر اشعه UV طراحی شده‌اند. آنها با واکنش با رادیکال‌های آزاد ناشی از تابشUV، فرآیند تخریب را کند می‌کنند و به حفظ خواص مکانیکی کمک می‌کنند.

۲. پایدارکننده‌های UV از نوعUV Absorbers

این افزودنی‌ها به جذب اشعه ماوراء بنفش و تبدیل آن به حرارت یا انرژی غیرمضر کمک می‌کنند. این نوع پایداری می‌تواند شامل ترکیباتی مانند Benzotriazolesو Benzophenones باشد.

۳. پایدارکننده‌های UV از نوع اتیلن-وینیل استات(EVA)

این ترکیبات معمولاً از ویژگی‌های مقاومتی خوب در برابر UV برخوردارند و می‌توانند در فرایند ترموفرمینگ به کار گرفته شوندEVA، به دلیل خاصیت شفافیت و چسبندگی خود محبوبیت دارد.

۴. پایدارکننده‌های ترکیبی

این نوع پایدارکننده‌ها معمولاً ترکیبی از HALS و UV Absorbersهستند که به ارائه حفاظت کامل‌تر در برابر تابش UVکمک می‌کنند. این ترکیبات می‌توانند ترکیبی از مزایای هر دو دسته را ارائه دهند و عملکرد بهتری در حفظ خواص پلاستیک‌ها داشته باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی دما، فشار و زمان در فرآیند ترموفرمینگ منجر به تولید قطعات با کیفیت بالاتر و استحکام بیشتر می‌شود. الیاف ترموپلاستیک نظیرPVC، ABS، PS، PP، LDPE و HDPE به دلیل ویژگی‌های خاص خود، نیاز به روش‌های مختلفی برای اتصال دارند. انتخاب روش مناسب بستگی به نوع ماده، ضخامت، شرایط محیطی و نیاز به پایداری اتصال دارد.

چسباندن و جوشکاری به عنوان دو روش اصلی در این زمینه است، که در اکثر موارد، با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مصرفی، انتخاب می‌شوند. که در همین راستا تعداد متعددی آزمایش تجربی در مجموعه آزمایشگاه رازی انجام شد. از آنجا که هر یک از این مواد خواص و چالش‌های خاص خود را دارند، استفاده از مشاوره‌های تخصصی و آزمایش‌های پیش از نصب می‌تواند به بهبود کیفیت نهایی محصولات کمک کندهمچین استفاده از مواد اولیه‌ای که به خودی خود مقاومت خوبی در برابر UV دارند، مانند پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن‌هایی که به صورت خاص با افزودنی‌های مقاوم به UV اصلاح شده‌اند، یک روش مؤثر برای افزایش طول عمر بدنه پهپادها پس از ترموفرمینگ است. همچنین، این بهینه‌سازی می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید، کاهش ضایعات و افزایش سرعت تولید منجر گردد. بهینه‌سازی فرآیند ترموفرمینگ با توجه به پارامترهای بررسی‌شده، به‌طور قابل توجهی می‌تواند کیفیت و عملکرد پهپادهای بال ثابت را بهبود بخشد. همچنین استفاده از مواد جدید، از جمله مواد کامپوزیتی و نانوکامپوزیت‌ها، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن قطعات کمک کند. این مواد می‌توانند خواصی چون استحکام بالا و وزن کم را به ارمغان بیاورند.

پی‌نوشت‌ها

۱ John Morris
۲ David Lachapelle
۳ PVC
۴ UV radiation
۵ PE
۶ PS
۷ Thermoplastics
۸ Thermal Welding
۹ HDPE
۱۰ LDPE

منابع و مراجع

[1] N. Amanat, N. L. James, and D. R. McKenzie, "Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices," *Med. Eng. Phys.*, vol. 32, no. 7, pp. 690–699, 2010.

[2] D. Günther et al., "3D printed sand tools for thermoforming applications of carbon fiber reinforced composites—a perspective," *Materials*, vol. 14, no. 16, p. 4639, 2021.

[3] L. B. Tan and N. D. P. Nhat, "Prediction and optimization of process parameters for composite thermoforming using a machine learning approach," *Polymers*, vol. 14, no. 14, p. 2838, 2022.

[4] F. Ozturk, O. Bas, and E. Ates, "Thermoplastic composite materials for the aerospace industry," *Res. Dev. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 5, 2021.

[5] M. Sonmez et al., "Development, Testing, and Thermoforming of Thermoplastics Reinforced with Surface-Modified Aramid Fibers for Cover of Electronic Parts in Small Unmanned Aerial Vehicles Using 3D-Printed Molds," *Polymers*, vol. 16, no. 15, p. 2136, 2024.

[6] T. Penttilä, "Thermoforming: The Effects of Machine Parameters to the Process and End Product," 2020.

[7] G. Gruenwald, *Thermoforming: a plastics processing guide*. Routledge, 2018.

[8] Z. Xuetao, "UAV design and manufacture," Citeseer, 2010.

[9] M. L. Garcia-Romeu et al., "Dimensional Analysis of the Wear of 3D Printed Dies Used to Form PC and PVC Sheets by Thermoforming," *Key Eng. Mater.*, vol. 960, pp. 21–28, 2023.

[10] J. Throne, "The effect of sheet sag on radiant energy transmission in thermoforming," *Thermoforming Q*, vol. 25, no. 4, pp. 19–24, 2006.

[11] M. Ghafur, B. Koziey, and J. Vlachopoulos, "Simulation of Thermoforming and Blowmolding—Theory and Experiments," in *Rheological Fundamentals*

of Polymer Processing, Springer, pp. 321–383, 1995.

[12] S. A. Ashter, *Thermoforming of single and multilayer laminates: plastic films technologies, testing, and applications*. William Andrew, 2013.

[13] S. J. Marshall et al., "A review of adhesion science," *Dent. Mater.*, vol. 26, no. 2, pp. e11–e16, 2010.

[14] Y.-P. Zhao, L. Wang, and T. Yu, "Mechanics of adhesion in MEMS—a review," *J. Adhes. Sci. Technol.*, pp. 519–546, 2003.

[15] R. Truckenmüller et al., "Flexible fluidic microchips based on thermoformed and locally modified thin polymer films," *Lab Chip*, vol. 8, no. 9, pp. 1570–1579, 2008.

[16] R. Kensicki, "UV/EB Thermoset Polymers Intended for Thermoforming Applications."