



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 1, pp.: 51-63  
2022

DOI:

10.22034/JSSTA.2022.327543.1059

### Article Info

Received: 2022-2-1  
Accepted: 2022-3-13

### Keywords

Anodizing, Adhesion,  
Sandblasting, Primer, Forest  
products laboratory

### How to Cite this article

Mohamad Reza  
Nasresfahani, Mohamad  
Nasresfahani, Hossein  
Nazemi Ashani, Mojtaba  
Forghani, Hadi Gorabi,  
"Techniques for Controlling  
the Adhesion Quality of  
Anodized Coatings after  
Heating", *Journal of Space  
Science, Technology and  
Applications*, vol 2 (1), p.:  
51-63, 2022.

Original Article

## Techniques for Controlling the Adhesion Quality of Anodized Coatings after Heating

Mohamad Reza Nasresfahani<sup>\*1</sup>, Mohamad Nasresfahani<sup>2</sup>,  
Hossein Nazemi Ashani<sup>3</sup>, Mojtaba Forghani<sup>4</sup>, Hadi Gorabi<sup>5</sup>

- 1,\*. Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran, mr\_nasr2001@alumni.iut.ac.ir, Corresponding author
2. Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran, nasr2000chem@yahoo.com
3. Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran, h.nazemi@isrc.ac.ir
4. Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran, forghani.mojtaba@gmail.com
5. Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran, h.gurabi@isrc.ac.ir

### Abstract

One of the most common methods to increase the adhesion of aluminum surfaces is the use of anodized coatings. However, if we heat the manufactured products before adhering due to the hydration of the anodized coating, cracking and morphological changes, the adhesive capacity will be severely reduced. As part of the research presented in this study, methods such as non-sealing of the anodize, primer application before heating the coating, sandblasting before and after the anodizing coating, and use of FPL (Forest Products Laboratory) replacement coating have been used to investigate the adhesive behavior of the coating. According to the results, not sealing the anodized coating and priming it before heating will increase the adhesiveness of the coating in all cases. Sandblasting after coating had no significant effect on adhesion. Sandblasting before anodizing improves adhesion by altering the texture of roughness and morphology. FPL can also be used to replace anodized coatings. They were less sensitive to heating and storage.

# تکنیک‌هایی برای کنترل کیفیت چسب‌پذیری پوشش‌های آندایز بعد از حرارت‌دهی

محمد رضا نصرافهانی<sup>۱\*</sup>، محمد نصرافهانی<sup>۲</sup>، حسین ناظمی اشنی<sup>۳</sup>  
مجتبی فرقانی<sup>۴</sup>، هادی گورابی<sup>۵</sup>

۱. \* پژوهشکده مواد و انرژی، mr\_nasr2001@alumni.iut.ac.ir (نویسنده مسئول)
۲. پژوهشکده مواد و انرژی، nasr2000chem@yahoo.com
۳. پژوهشکده مواد و انرژی، h.nazemi@isrc.ac.ir
۴. پژوهشکده مواد و انرژی، forghani.mojtaba@gmail.com
۵. پژوهشکده مواد و انرژی، h.gurabi@isrc.ac.ir



دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۱، صفحه ۶۳-۵۱  
بهار و تابستان ۱۴۰۱

DOI:  
10.22034/JSSTA.2022.327543.1059

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

واژه‌های کلیدی

آندایز، چسب‌پذیری، سندبلاست،  
پرایمر، FPL

نحوه استناد به این مقاله

محمد رضا نصرافهانی، محمد نصرافهانی، حسین ناظمی اشنی، مجتبی فرقانی، هادی گورابی. "تکنیک‌هایی برای کنترل کیفیت چسب‌پذیری پوشش‌های آندایز بعد از حرارت‌دهی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد دوم، شماره اول، صفحات ۵۱-۶۳، ۱۴۰۱.

## چکیده

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای افزایش چسب‌پذیری سطوح آلومینیمی، استفاده از پوشش‌های آندایز است. اما چنانچه به دلیل شرایط خاص، محصولات تولیدی مجبور به حرارت‌دهی قبل از چسب‌زنی باشیم به دلیل هیدراته شدن پوشش آندایز، ترک خوردن و تغییر مورفولوژی، قابلیت چسب‌پذیری به شدت افت می‌کند. در این مقاله، با استفاده از ترفندهایی مانند عدم سیل کردن آندایز، اعمال پرایمر قبل از حرارت‌دهی پوشش، اعمال سندبلاست قبل و بعد از پوشش آندایز و استفاده از پوشش جایگزین FPL رفتار چسب‌پذیری پوشش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد، در تمامی موارد عدم سیل کردن پوشش آندایز و همچنین پرایمرزنی پوشش قبل از حرارت‌دهی، در افزایش چسب‌پذیری موثر خواهد بود. اعمال سندبلاست بعد از پوشش‌دهی، تاثیر قابل توجهی بر چسب‌پذیری نداشت. سندبلاست قبل از آندایز با تغییر مورفولوژی و نوع زبری‌ها، چسب‌پذیری را تا حد قابل قبولی ارتقا می‌دهد. همچنین اعمال پوشش FPL می‌تواند یک گزینه مناسب برای جایگزینی آندایز باشد. این پوشش‌ها، حساسیت کمتری نسبت به حرارت‌دهی و انبارداری از خود نشان دادند.

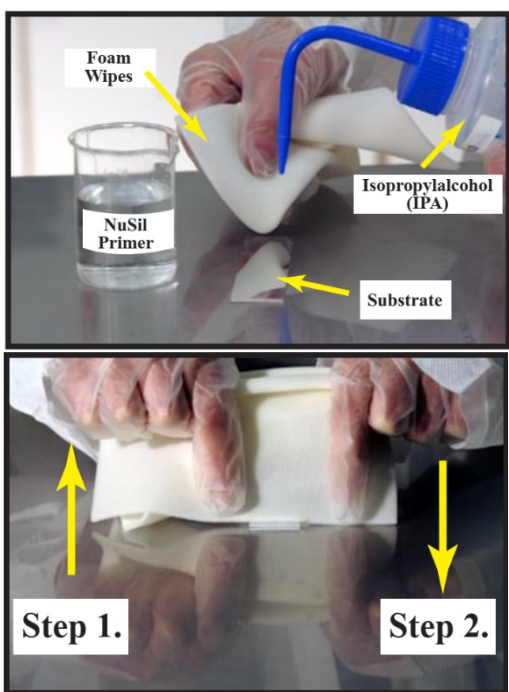
بودن کروم، استفاده از این نوع محلول را بسیار محدود کرده و محلول‌های جایگزینی مانند محلول اچ P2 (۳۷۰ گرم اسید سولفوریک غلیظ و ۱۵۰ گرم سولفات فریک ۷۵٪ و باقی‌مانده تا یک لیتر آب مقطر) با حداقل سمیت معرفی شده‌اند [۶، ۷]. به دلیل سمیت محلول‌های کرمیکی، گزینه‌های جایگزین شامل آندایزینگ در اسید سولفوریک (SAA)، اسید فسفریک (PAA) و مخلوط اسیدهای سولفوریک فسفر (PSA) رونق بیشتری گرفته‌اند. با این وجود، پیش‌فرایند استاندارد که در صنعت هوافضای اروپا پذیرفته شده است، بر اساس اچ CSA و آندایزینگ اسید کرومیک (CAA) است که اکسید فشرده‌تری نسبت به PAA (آندایز تولیدی با اسید فسفریک) تولید می‌کند و مقاومت در برابر خوردگی مناسب‌تری دارد [۶]. بدون توجه به نوع آندایز و محلول مورد استفاده، تقریباً در تمامی موارد آندایز شده، چنانچه شرایط و اصول استاندارد چسب‌زنی رعایت شود چسبندگی قابل قبولی حاصل می‌شود. اما مشکل اصلی در تغییر خواص چسب‌پذیری پوشش‌های آندایز شده پس از حرارت‌دهی است که خواص آن به شدت تغییر می‌کند و تقریباً چسب‌پذیری آن شبیه حالت بدون پوشش است. پوشش‌های آندایز، به دلیل جذب رطوبت محیط در طی فرایند حرارت‌دهی و همچنین ایجاد ترک‌هایی در سطح آن دچار تغییر رفتار ترشوندگی و مورفولوژی می‌شوند و این موضوع خواص چسب‌پذیری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته مشخص شده است که به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین آلومینا و زیرلایه، در دماهای بیشتر از ۸۵ درجه، ترک‌هایی در پوشش ایجاد می‌شود و این ترک‌ها باعث کنده شدن و جدایش پوشش می‌شود. این موضوع به شدت می‌تواند بر خواص چسب‌پذیری تاثیر داشته باشد. البته راه‌حلی برای کاهش این تاثیر وجود دارد که از آن جمله، اجتناب از پوشش‌های ضخیم است [۸]. مجموعه این عوامل سبب شده است تا در مواردی مانند ساخت ساندویچ پنل‌ها که لازم است از دو نوع چسب مختلف در فرایند ساخت استفاده شود و به نوعی دو مرحله پخت انجام گیرد، بعد از مرحله اول، پخت چسبندگی پوشش آندایز از بین برود.

در این گزارش، با بررسی روش‌ها و ترفندهای مختلف سعی شده است شرایطی فراهم شود تا کمترین افت خواص چسبندگی

آلیاژهای آلومینیم کاربردهای وسیعی در صنایع هوایی و فضایی پیدا کرده‌اند ولی مقاومت در برابر خوردگی این آلیاژها در شرایط کاری مورد نظر مبحث مهمی است. معمولاً قطعات آلومینیمی در معرض اتصال چسبی با یک قطعه دیگر قرار می‌گیرند به همین دلیل نیاز به یک پوشش چسب‌پذیر مقاوم به خوردگی، همیشه مورد آزمایش و بررسی بوده است. آندایز کردن سطح آلومینیم به دلیل ساختار متخلخل و مورفولوژی سلولی با منافذی در میان آنها، تاحدودی می‌تواند هر دو نیاز را به طور هم‌زمان فراهم کند. معمولاً چسبندگی بین دو جسم در دو مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سطح میکروسکوپی، چسبندگی فقط در صورت تماس مولکولی چسب (یا پرایمر) با زیرلایه حاصل می‌شود و جذب فیزیکی<sup>۱</sup>، یک الزام در این نوع اتصال است و خیس شدن مناسب سطح (تماس کامل چسب با سطح) که معمولاً با چربی‌زدایی ساده حاصل می‌شود، اهمیت زیادی دارد. البته این موضوع به تنهایی یک اتصال چسبی مناسب را تضمین نمی‌کند و دوام چسبندگی به تشکیل پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین زیرلایه و چسب نیز بستگی دارد [۱، ۲]. در مقیاس ماکروسکوپی، نیروهای مکانیکی ناشی از سخت شدن چسب داخل زبری‌ها و منافذ سطحی باعث افزایش چسبندگی می‌شوند که معمولاً به نام قفل‌های مکانیکی<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند [۳]. با تغییر عواملی مانند غلظت و نوع الکترولیت، دما و پتانسیل/ جریان اعمال شده در حین فرایند آندایز می‌توان نوع و شکل حفره‌ها و همچنین نوع پیوندهای شیمیایی را تغییر داد و خواص چسب‌پذیری متفاوتی به‌دست آورد.

یکی از موارد بسیار تاثیرگذار در بهبود چسبندگی، استفاده از پروموترها (بهبود دهنده‌های چسبندگی) است که قادر به ایجاد پیوندهای کووالانسی پایدار، هم با بستر اکسید فلزی و هم با رزین پلیمری پوشش هستند [۴]. برای یک چسبندگی خوب و با دوام، باید ترکیب شیمیایی سطح، ویژگی اسیدی و بازی آن، مورفولوژی اکسید و زبری سطح در نظر گرفته شود [۵]. اچ با اسید سولفوریک-کرومیک (FPL<sup>۳</sup>)، یکی از متداول‌ترین فرایندهای آندایزینگ برای اتصالات چسبی در صنایع هوایی است. اما سعی

استحکام چسبندگی داشته باشد. بنابراین، در تمامی نمونه‌ها، پرایمرزنی یکسانی اعمال شد.



شکل ۱. اعمال پرایمر مطابق با دستورالعمل سازنده [۱۲]

پس از خشک شدن پرایمر، یک لایه کپتون به منظور ارزیابی چسبندگی و انجام تست‌های چشمی و مکانیکی روی نمونه‌های پرایمردار چسبانده شد. این عمل با استفاده از چسب‌های جدول ۱ انجام شد و سپس نمونه‌ها در دمای ۱۵۰ درجه به مدت ۱۵ دقیقه عمل‌آوری شد. آماده‌سازی چسب بر اساس دستورالعمل و مخلوط کردن دو فاز به نسبت ۱:۱ انجام شد.

## ۲-۲- آماده‌سازی سطح آندایز

با توجه به مطالعات انجام گرفته به منظور آماده‌سازی ورق‌ها از آندایز CAA در محدوده دمایی ۵۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد مطابق با شرایط استاندارد پیشنهادی برای چسب‌پذیری استفاده شد [۴]. تمامی نمونه‌ها از جنس ورق آلومینیم ۷۰۷۵ با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر تهیه شد. تمامی عملیات برش و منقطع کردن قبل از عملیات آندایز انجام شد تا

بعد از حرارت‌دهی در آندایز ایجاد شود. تمرکز اصلی این تحقیق بر چسبندگی دو نوع چسب CV-2289 و CV-2568 است که با روش‌هایی مانند پرایمرزنی پیش از پخت و سندبلاست قبل و بعد از آندایز و روش‌های جایگزین مانند FPL، چسبندگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- طمواد و روش تحقیق

### ۱-۲- پرایمرزنی چسب‌زنی

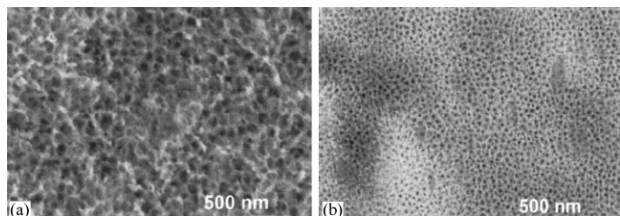
به منظور بررسی رفتار چسب‌پذیری ورق‌های آندایز شده از دو نوع چسب با گازدهی پایین و کشسانی بالا استفاده شد. چسب اول با کد اختصاصی CV-2289-1، به رنگ سفید و چسب دوم با کد اختصاصی CV10-2568 قرمز قابل شناسایی است و خواص مکانیکی هر یک، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات چسب‌های مورد استفاده [۹، ۱۰]

Adhesive	Tensile Strength (MPa)	Elongation %	Lap Shear	Viscosity (cP)	Dielectric Strength	Appearance
2289	4.8	350	2.8	Part A(60000) Part B(40000)	955	White
2568	1.6	170	1.2	Part A(125000) Part B(80000)	860	Red

پرایمر مورد استفاده بر اساس توصیه سازنده از نوع CF1-13 [۱۱] انتخاب شد و به روش مالش روی سطوح با استفاده از یک دستمال و مطابق با دستورالعمل سازنده مشابه شکل ۱، اعمال شد. پس از اعمال پرایمر، نمونه‌های آندایز شده به مدت یک ساعت در دما و رطوبت محیط قرار گرفت. لازم به ذکر است، نحوه اعمال پرایمر و غلظت آن نیز به عنوان یک متغیر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که این پارامتر نمی‌تواند نقش قابل توجهی در

طبق استاندارد، محلول اسیدی به نسبت ۱ جزء دیکرومات سدیم، ۱۰ جزء اسید سولفوریک غلیظ و ۳۰ جزء آب مقطر ساخته شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت با حل‌سازی یک تکه آلومینیم تعدیل شد و سرانجام عملیات اچ در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه انجام گرفت.



شکل ۳- مقایسه ساختارهای به‌دست آمده ناشی از (a)، عملیات FPL و (b)، عملیات آندایز [۱۴]

### ۲-۵- اندازه‌گیری زاویه تماس

به منظور ارزیابی خاصیت ترشوندگی نمونه‌ها و پیش‌بینی چسب‌پذیری، اندازه‌گیری زاویه تماس به صورت استاتیک با استفاده از آب مقطر و قطره‌ای به حجم ۵ میکرولیتر و بر اساس استاندارد ASTM D7334 [۱۵] با استفاده از دستگاه زاویه‌سنج نیمه خودکار مدل CAG-10 انجام شد (شکل ۴).

### ۲-۶- اندازه‌گیری براقیت

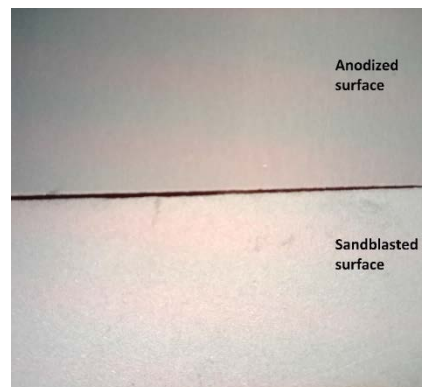
با اندازه‌گیری میزان ماتی یا روشنی پوشش‌های آندایز می‌توان، یکنواختی ضخامت پوشش در نقاط مختلف را تشخیص داد و در یک نوع پوشش ثابت میزان زبری آن سطح را نیز ارزیابی کرد [۲۲]. به همین منظور، برای ارزیابی پوشش‌های ایجاد شده و همچنین تغییر خواص آن‌ها بعد از حرارت‌دهی، از گلاس‌متر یا براقیت‌سنج مدل WG68 استفاده شد. تصویری از براقیت‌سنج استفاده شده، در شکل ۵ نشان داده شده است.

اندازه‌گیری بر اساس استاندارد BS EN ISO 7668 و متناسب با سطوح آندایز شده در سه زاویه ۲۰، ۶۰ و ۸۵ درجه انجام گرفت [۱۶].

آسیبی به لایه ترد اکسیدی بعد از آندایز وارد نشود. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، تمامی ورق‌های آندایز شده بدون عملیات آب‌بندی<sup>۱</sup> مورد پرایمرزنی قرار گرفت [۴، ۱۳]. نمونه‌های آندایز شده در حداقل زمان ممکن (حداکثر ۲۴ ساعت)، پس از آندایز شدن تحت شرایط چسب‌زنی و پرایمرزنی قرار گرفت.

### ۲-۳- سندبلاست

تعدادی از نمونه‌ها بر اساس طراحی آزمایش تحت سندبلاست نوع Sa2 قرار گرفت. در این نوع سندبلاست، تمام آلودگی‌ها و آثار اکسید و زنگ‌زدگی از سطح خارجی فلز حذف شد و محل مورد نظر با هوای فشرده پاکسازی شد. در این حالت، یک سطح خاکستری از سطح فلز پاکسازی شده دیده می‌شود. این عملیات در فشار ۵۰ Psi و با استفاده از ذرات ساینده اکسید آلومینیم انجام شد.



شکل ۲- مقایسه دو سطح سندبلاست شده و آندایز شده

### ۲-۴-۱- FPL

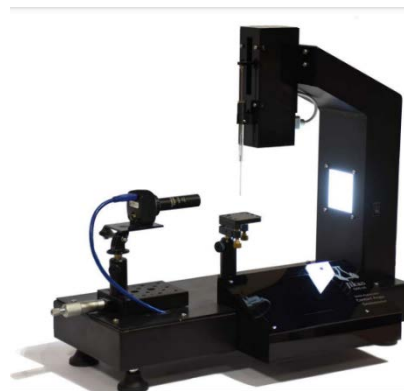
بر اساس طراحی آزمایش، تعدادی از نمونه‌ها تحت عملیات اچ FPL قرار گرفت. در این فرایند، اکسیداسیون سطح بدون استفاده از جریان الکتریکی و در محلول اسیدی انجام می‌گیرد و ساختاری متفاوت از روش آندایز به‌دست می‌آید که از نظر اندازه حفره نامنظم‌تر و بزرگ‌تر است (شکل ۳) [۴].

### ۳- نتایج و بحث

سه فرایند سندبلاست، پرایمرزنی و انجام اچ FPL، به عنوان روش‌هایی برای حفظ کیفیت چسبندگی ارائه شده است. هر نمونه با یک کد چندحرفی مطابق با جدول ۲ معرفی شده است که به ترتیب نشان دهنده نوع فرایند در مورد هر نمونه است.

جدول ۲ - کدهای معرف نمونه‌ها

A	ایجاد پوشش آندایز
H	پخت در دمای ۱۲۰ درجه
P	پرایمرزنی
S	سندبلاست



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس مدل CAG-10

### ۳-۱- زاویه تماس

یکی از معیارهای تشخیص چسب‌پذیر بودن سطح، ترشوندگی و اندازه‌گیری زاویه تماس است. در این تحقیق نیز تمامی نمونه‌ها در هر مرحله تحت اندازه‌گیری زاویه تماس قرار گرفت و نتایجی مطابق با جدول ۳ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ورق‌های آلومینیم قبل از آندایز و اعمال پوشش، نسبتاً آب‌گریز هستند و زاویه تماسی در حدود ۱۱۰ درجه ثبت شده است که این موضوع نشان دهنده چسب‌پذیری بسیار ضعیف است. بنابراین، اعمال پوشش آندایز به عنوان یک فرایند پیش چسب در این‌جا نیز مطابق با دیگر منابع تایید می‌شود. در ورق‌های آندایز شده و A-1 در فاصله زمانی کمتر از ۱۶ ساعت، مشاهده شد نمونه‌های A-1 و A-2 که توسط دو شرکت مختلف آندایز شده‌اند، زاویه تماسی به ترتیب حدود ۲۱ و ۲۴ درجه دارند که این میزان ترشوندگی، برای چسب‌پذیری و ایجاد یک اتصال چسبی محکم، بسیار مناسب است.



شکل ۵. براقیت‌سنج مدل WG68 با توانایی اندازه‌گیری سه زاویه ۲۰، ۶۰ و ۸۵ درجه

### ۳-۲- اندازه‌گیری استحکام چسبندگی

به منظور ارزیابی چسبندگی لایه کپتون بر سطوح آندایز شده، علاوه بر مشاهدات چشمی و ارزیابی کیفی چسبندگی، پس از چسب‌زنی و فرایند پخت نمونه‌هایی به پهنای ۲ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر از مرکز ناحیه چسب زده شده بریده شد. این نمونه‌ها سپس با استفاده از یک فیکسچر مخصوص در دستگاه تست کشش قرار داده شد و لایه کپتون با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه از روی سطح آندایز کننده شد. این روش به صورت غیراستاندارد و فقط به منظور مقایسه نتایج همین تحقیق انجام گرفت و از نظر شرایط اجرا مشابه با تست پیلینگ انجام شد.



در مواردی که به دلیل کاربرد نیاز به یک مرحله حرارت‌دهی دارند را بسیار محدود می‌کند و در مواردی، به اندازه‌ای چسب‌پذیری افت می‌کند که حذف پوشش و سنباده‌زنی و استفاده از زیرلایه خام و زبر، نتیجه بهتری را حاصل می‌کند.









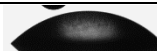
یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی برای کاهش تاثیر حرارت، اعمال پرایمر قبل از حرارت‌دهی آندایز و در زمان‌های کمتر از ۱۶ ساعت بعد از آندایز است. از آنجایی که ثابت شد حرارت می‌تواند تاثیر شدیدی بر ترشوندگی آندایز داشته باشد و به همین دلیل نفوذ پرایمر به منافذ نانومتری آندایز بعد از حرارت‌دهی بسیار محدود می‌شود؛ این گزینه می‌تواند تاثیر قابل توجهی در جلوگیری از افت چسب‌پذیری ایفا کند.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس روی این نوع از نمونه‌ها (A-P-H) نشان می‌دهد، بعد از حرارت‌دهی اگرچه زاویه تماس افزایش یافته و به حدود ۴۵ درجه رسیده است، اما این افزایش مشابه حالت A-H نیست و به محدوده آب‌گریزی نرسیده است. از طرفی، پرایمر نفوذ کرده قبلی در منافذ، نیاز به نفوذ جدید را از بین برده و این افزایش زاویه تماس نمی‌تواند مانع از تماس حداکثری چسب شود. تنها نکته مهم در این نمونه‌ها، امکان آلوده شدن پرایمر در حین حرارت‌دهی و آماده‌سازی است و به همین دلیل چسبندگی یکنواختی در کل سطح نمونه حاصل نمی‌شود و در مواردی، تکرارپذیری آن با خطا مواجه می‌شود.

راه‌حل پیشنهادی دیگر برای کاهش تغییرات چسبندگی بعد از حرارت‌دهی، عملیات سندبلاست است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳ در نمونه S-A، بعد از سندبلاست کردن آندایز بسیار باکیفیتی به دست آمده است و زاویه ترشوندگی حدود ۱۷ درجه حاصل شده است. انجام سندبلاست قبل از آندایز باعث می‌شود دو نوع زبری نانومتری و میکرومتری هم‌زمان ایجاد شود. این نوع ساختار مشابه ساختارهای لانه پرنده در کنار ساختار لانه زنبور است که در آندایزهای دم‌ای بالا نیز می‌توان این ساختار را به دست آورد (شکل ۶) [۷، ۱۷]. این ساختارهای لانه پرنده فوق آب‌دوست هستند و چسب‌پذیری بسیار مناسبی دارند.

جدول ۳. زاویه تماس به دست آمده برای نمونه‌های مختلف و ترتیب عملیات انجام گرفته روی هر نمونه:

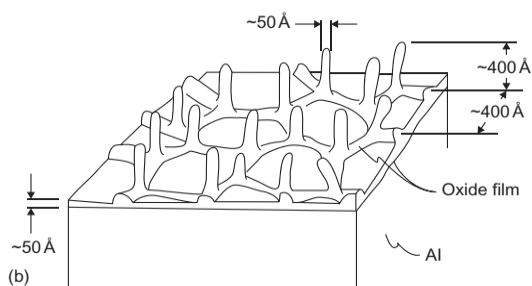
A، آندایز؛ S، سندبلاست؛ H، پخت در دمای ۱۲۰ درجه؛ P، پرایمر

Sample	Water Droplet shape	Contact Angle
As-roll		110±3
A-1		21±2
A-2		24±1
A-H		45±1
A-P-H		17±2
S-A		44±3
S-A-P-H		51±3
FPL		18±1
FPL-H		50±4

این نتایج نشان می‌دهد، تقریباً شرایط آندایز در هر دو شرکت یکسان بوده و تاثیر قابل توجهی در چسب‌پذیری ورق‌ها نداشته است. اعمال پوشش آندایز به دلیل ایجاد زبری‌های نانومتری و برخی میکرومتری، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر ترشوندگی داشته باشد. علاوه بر این، به دلیل زبر بودن سطح امکان تشکیل اتصالات مکانیکی افزایش می‌یابد و به نوعی چسب‌پذیری بهتر می‌شود. اما نکته قابل توجه در اینجا، افزایش زاویه تماس بعد از حرارت‌دهی ورق‌های آندایز در دمای ۱۲۰°C است که باعث شده زاویه تماس به حدود ۱۱۰ درجه برسد و به نوعی در محدوده آب‌گریزی قرار بگیرد. این موضوع، استفاده از پوشش‌های آندایز

درخشنده داشته که با اعمال پوشش آندایز مات شده است. این تغییر ناشی از زبری‌های نانومتری تشکیل شده روی سطح است.

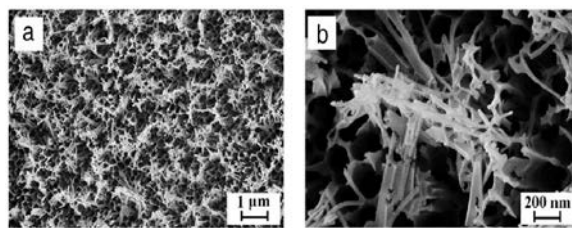
حرارت‌دهی (نمونه A-H)، نتوانسته در براقت سطح تغییر محسوسی ایجاد کند و این موضوع خود دلالت می‌کند که حرارت‌دهی مورفولوژی را تغییر نداده است و تغییرات زاویه تماس تنها ناشی از هیدراته شدن سطح و جذب آلودگی‌های محیطی است. استفاده از فرایند سندبلاست قبل و بعد از آندایز به شدت ماتی سطح را افزایش داده و به نوعی مورفولوژی را تغییر داده است. در یک شرایط ثابت، مات شدن سطح نشان‌دهنده افزایش زبری سطح و افزایش چسبندگی است. در نمونه‌های FPL شده پوشش از نظر براقت شرایطی بهتر از نمونه آندایز شده دارد و به همین دلیل انتظار می‌رود نوع زبری آن خشن‌تر و در نتیجه چسبندگی بهتری حاصل شود.



شکل ۷. تصویری شماتیک از ساختار ایجاد شده با استفاده از فرایند FPL [۱۸]

جدول ۴. نتایج حاصل از براقت‌سنجی

Sample	20° GU Value	60° GU Value	80° GU Value
As-roll	115	156	48
A	9.5	33	72
A-H	10	35	75
A-S	0.5	2.8	2.1
S-A	5	9	12
FPL	5	25	31



شکل ۶. ساختار لانه پرند ایجاد شده در پوشش آندایز با خاصیت فوق آب‌دوستی: (a) بزرگ‌نمایی کمتر و (b) بزرگ‌نمایی بیشتر [۱۷]

نکته قابل توجه در مورد این گروه از نمونه‌ها، تاثیر کمتر حرارت بر خواص ترشوندگی است که باعث شده زاویه تماس حدود ۴۴ درجه حاصل شود. در نمونه A-H-S، عملیات سندبلاست بعد از آندایز و حرارت‌دهی انجام شده و تا حدودی باعث حذف لایه آندایز از سطح نمونه شده است. در اینجا، نوع زبری‌های ایجاد شده نتوانسته کیفیت لازم برای ترشوندگی را ایجاد کند و زاویه تماس ۵۱ درجه به دست آمده است. از طرفی، تمیز کردن این نمونه‌ها به سختی انجام می‌گیرد و ذرات ریز ماسه و گرد و غبار باقی‌مانده روی سطح، مانع از یک چسبندگی بدون عیب می‌شود. فرایند FPL نیز به عنوان یکی از پیش فرایندهای استاندارد برای چسب‌زنی سطوح آلومینیم در مراجع ذکر شده است [۴]. نکته مهم در مورد این فرایند، تغییرات نسبتاً کم زاویه تماس بعد از حرارت‌دهی است. این نوع پوشش، ساختار اکسیدی کاملاً متفاوتی نسبت به پوشش‌های آندایز ایجاد می‌کند و برجستگی‌های سطحی فراوانی دارد (شکل ۷) و همچنین به دلیل اینکه پوشش بدون اعمال جریان الکتریکی ایجاد می‌شود، ضخامت آن کمتر از آندایز است و حساسیت آن به ترک خوردن ناشی از انبساط کمتر است. این نوع پوشش، حساسیت دمایی کمتری نسبت به آندایز دارد و بعد از حرارت‌دهی، شرایط چسبندگی قابل قبولی ارائه می‌کند. از طرفی نسبت به زمان انبارداری حساسیت ندارد و هیدراته نمی‌شود.

### ۲-۳- براقت

از آنجایی که تغییرات براقت در حین انجام یک فرایند می‌تواند معیاری برای تغییر مورفولوژی ساختارهای آندایز باشد، آنالیز براقت برای تعدادی از نمونه‌ها مطابق با جدول ۴ انجام گرفت. مشاهده می‌شود، ورق اولیه آلومینیم سطحی بسیار براق و



### ۳-۲- استحکام چسبندگی

میزان چسبندگی الزامات مصرف کننده را تامین می‌کند، به عنوان یک راه‌حل سریع و بدون محدودیت استفاده شود.

نکته قابل توجه در استفاده از این روش، سرعت عمل و به حداقل رساندن تماس سطوح آندایز پیش از پرایمرزنی با دیگر سطوح است. سطوح آندایز شده نباید پس از اچ، آب‌بندی شود و عملیات پرایمرزنی باید در زمان‌های کمتر از ۷۲ ساعت و حتی بهتر است در یک شیفت کاری (کمتر از ۱۶ ساعت بعد از آندایز) انجام گیرد [۱۹، ۲۰]. استفاده از فرایند سندبلاست قبل از آندایز می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر استحکام چسبندگی داشته باشد [۱۹]. با توجه به کاربرد صفحات مورد بررسی در این تحقیق و لزوم آندایز کردن این صفحات، در بخشی از این تحقیق ابتدا صفحات آندایز شده تا یک سمت آن برای کاربرد مذکور استفاده و سمت دیگر آن با استفاده از فرایند سندبلاست و حذف لایه آندایز برای چسب‌زنی آماده شود (A-H-S-P).

انتظار می‌رود، با اعمال سندبلاست مطابق با آنچه در مرجع [۱۹] ذکر شده است، تغییر قابل توجهی در استحکام چسبندگی حاصل شود اما این اتفاق به یکی از دلایل زیر رخ نداده است. دلیل اول، باقی ماندن لایه‌ها و پولک‌های ترک خورده پوشش آندایز روی سطح ورق‌ها است. به دلیل ضخامت کم ورق‌های مورد تست (0.5 mm)، امکان افزایش فشار گان سندبلاست و همچنین افزایش زمان سندبلاست وجود نداشت و گاهی باعث تغییر فرم و آسیب ورق می‌شود. بنابراین، باقی ماندن این پولک‌های ترک خورده که به نوعی هیدراته هم شده‌اند، باعث می‌شود پس از سندبلاست، شستشوی سطح به درستی انجام نگیرد و گرد و غبار در زیر پولک‌ها باقی بماند. از طرف دیگر خود این پولک‌های سست و ترک خورده پس از چسب‌زنی به عنوان یک بستر سست عمل کرده و باعث افت استحکام می‌شود.

ارزیابی استحکام چسبندگی به دو صورت ارزیابی چشمی و اندازه‌گیری مکانیکی با روشی مشابه تست پیلینگ انجام شد. نتایج به‌دست آمده برای دو نوع چسب CV10-2568 و CV-2289 در جدول ۵ ارائه شده است. این نتایج به دلیل غیراستاندارد بودن روش تست، فقط به منظور مقایسه ارائه شده و قابل مقایسه با نتایج خارج از این تحقیق نیست. همچنین، نتایج استحکام چسبندگی به صورت نمودار در شکل ۸ ارائه شده است. از نتایج مشخص می‌شود، در هر دو نوع چسب، اعمال فرایند پرایمرزنی قبل از حرارت‌دهی، منجر به افزایش استحکام چسبندگی و بهبود شرایط شده است. اگرچه این تاثیر در چسب سفید اندکی بیشتر بوده است.

جدول ۵. نتایج اندازه‌گیری استحکام چسبندگی

Sample		Force Peak (N)	Drop Slop
White Adhesive CV-2289	A-H-P	11±2	0.5
	A-P-H-P	29.5±5.6	1.1
	S-A-P-H-P	35±6.5	1.5
	A-H-S-P	29.5±2.05	1.04
	FPL	34.8	0.76
Red Adhesive CV10-2568	A-H-P	8.3±1.5	2.6
	A-P-H-P	29±5	1.9
	S-A-P-H-P	32.5±0.7	1.86
	A-H-S-P	26±3	0.64

به طور کلی، پرایمرزنی تنها بدون انجام هیچ فرایند دیگری (A-P-H-P) اگرچه استحکام چسبندگی را افزایش داده است اما نوع کننده شدن چسب از روی سطح به صورت شکست چسبندگی<sup>۱</sup> رخ می‌دهد. این گزینه می‌تواند در مواردی که این

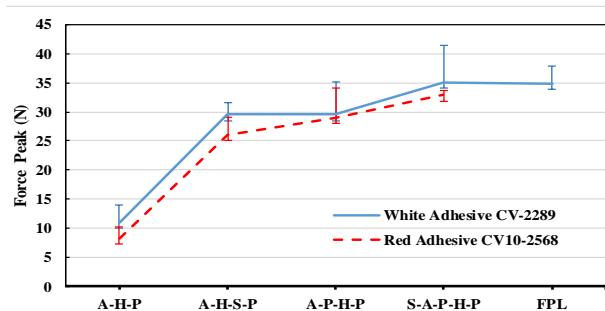
1 Adhesive Failure

شکل ۸ نشان می‌دهد، سندبلاست قبل از آندایز بر استحکام چسبندگی هر دو نوع چسب تاثیر داشته، اما این تاثیر با توجه به پراکندگی داده‌ها، در چسب سفید در برخی از نمونه‌ها بسیار زیاد بوده است. دلیل تاثیر کمتر آن در چسب قرمز را می‌توان در نوع پارگی و کنده شدن جستجو کرد. در چسب قرمز، تقریباً با همان روش‌های اعمال پرایمر قبل از حرارت‌دهی (A-P-H-P) و همچنین سندبلاست بعد از آندایز (A-H-S-P)، می‌توان به چسبندگی قابل قبولی دست پیدا کرد و نوع کنده شدن چسب در تست مکانیکی از نوع شکست هم‌چسبی<sup>۱</sup> است. بنابراین، تغییر شرایط نمی‌تواند تاثیر قابل توجهی بر استحکام چسب قرمز داشته باشد زیرا در این نوع کنده شدن، استحکام ذاتی چسب تعیین کننده است و تقریباً پیوند بین چسب و زیرلایه به حد بیشینه خود رسیده است. در چسب سفید، با توجه به اینکه در شرایط قبلی (A-P-H-P) و (A-H-S-P) کنده شدن از نوع شکست چسبی باقی مانده و تنها استحکام پیوند با زیرلایه کمی افزایش یافته است اما به حد بیشینه خود نرسیده است. بنابراین، تغییرات مورفولوژی سطح ورق همچنان توانسته است بر استحکام چسبندگی تاثیر داشته باشد. در این گروه از نمونه‌ها، رفتار دوگانه‌ای در طول تست مکانیکی مشاهده شد. در برخی از مناطق کنده شدن از نوع شکست هم‌چسبی و در مناطقی از نوع شکست چسبی است (شکل ۱۰).



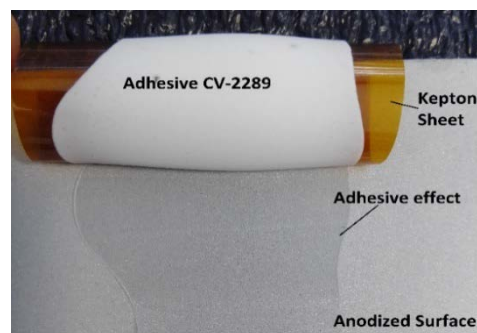
شکل ۱۰. کندگی نوع شکست هم‌چسبی و شکست چسبی در چسب CV-2289 آماده‌سازی شده به روش S-A-P-H-P

این موضوع نشان می‌دهد، اگرچه روش (S-A-P-H-P) توانسته است تا حد قابل قبولی چسبندگی بعد از حرارت‌دهی را حفظ کند اما تاثیر حرارت و جذب آلودگی‌های محیطی و هیدراته



شکل ۸. مقایسه استحکام چسبندگی نمونه‌های مختلف: کسب بهترین استحکام در نمونه‌های سندبلاست شده پیش از آندایز و انجام فرایند FPL

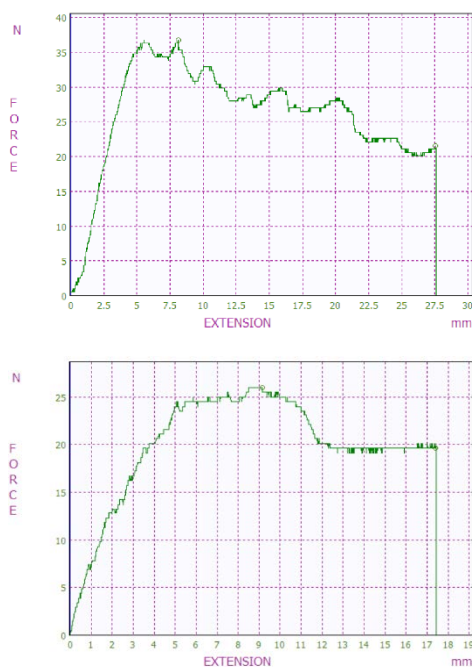
در این گروه از نمونه‌ها، بعد از کنده شدن چسب از روی سطح ورق، تغییر رنگ سطح ورق نشان دهنده کنده شدن لایه‌ای از روی سطح و تاییدی بر جدا شدن پولک‌های ترک خورده و سست است (شکل ۹).



شکل ۹. باقی ماندن اثر چسب روی سطح نمونه A-H-S-P ناشی از کنده شدن پولک‌های سست سطحی

دیگر فرایند پیشنهادی در این تحقیق، استفاده از فرایند سندبلاست قبل از آندایز (S-A-P-H-P) است که در بخش اندازه‌گیری زاویه تماس، نتایج آن ارائه شده است. در مراجع مختلف ذکر شده است، استفاده از سندبلاست پیش از آندایز به شدت مورفولوژی و نوع زبری ایجاد شده در حین آندایز را تغییر می‌دهد و می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر چسب‌پذیری داشته باشد [۱۹، ۲۰]. تنها بحثی که تقریباً در تمامی مراجع مجهول مانده است، تاثیر حرارت بر این ساختارهای بهبود یافته است.

1 Cohesive Failure



شکل ۱۱. نمودار تست کشش نمونه‌های آندایز شده و چسب زده شده با الف) چسب CV-2289 و ب) چسب CV10-2568

#### ۴- نتیجه‌گیری

اعمال پرایمر قبل از حرارت‌دهی، تاثیر قابل توجهی در جلوگیری از افت چسب‌پذیری ایفا می‌کند و باعث می‌شود نمونه‌ها بعد از حرارت‌دهی وارد محدوده آب‌گریز نشوند و زاویه تماس در حدود ۴۵ درجه باقی بماند. از طرفی، پرایمر نفوذ کرده قبلی در منافذ، نیاز به نفوذ جدید را از بین برده و این افزایش زاویه تماس نمی‌تواند مانع از تماس حداکثری چسب شود. با این وجود، در چسب CV-2289 همچنان نوع کنده شدن شکست چسبی است. این روش، به عنوان یک راه‌حل سریع و بدون محدودیت به شرط رعایت حداقل زمان بعد از آندایز و عدم سیل کردن قابل استفاده است.

اعمال سندبلاست قبل از آندایز، باعث ایجاد آندایزی با ساختار لانه پرند با خاصیت فوق آب‌دوست می‌شود که برای چسب‌پذیری گزینه بسیار مناسبی است. اما همچنان حرارت تاثیرگذار است. به طور کلی، این روش بر رفتار چسبندگی هر دو نوع چسب تاثیر گذاشته است. در چسب قرمز، تقریباً با همان روش‌های اعمال پرایمر قبل از حرارت‌دهی (A-P-H-P)، می‌توان به چسبندگی قابل

شدن سطح به اندازه‌ای زیاد است که هنوز به طور کامل شرایط شکست هم‌چسبی فراهم نشده است.

در اینجا فقط نوع زبری‌ها تغییر کرده و مورفولوژی اصلاح شده اما مانعی برای هیدراته شدن سطح در دمای بالا و جذب آلودگی‌ها وجود ندارد. اگرچه در شرایط دمای محیط، بهترین زمان چسب‌زنی صفحات آندایز شده کمتر از ۷۲ ساعت (و بهترین حالت کمتر از ۱۶ ساعت) ذکر شده است اما با توجه به دمای بالای حرارت‌دهی (۱۲۰ درجه)، این زمان بسیار کاهش یافته و نیازمند سرعت عمل بالا است. در نمونه‌هایی که پوشش اکسیدی به روش FPL ایجاد شده، تقریباً از نظر خواص مکانیکی مشابه S-A-P-H-P است. نکته قابل توجه در این نمونه‌ها، تکرارپذیری مناسب و حساسیت کمتر در برابر حرارت است. پرایمرزنی قبل از حرارت، تاثیری در این نمونه‌ها نداشته و به همین دلیل، نتایج آن ارائه نشده است. در این نمونه‌ها نیز کندگی چسب از هر دو نوع شکست هم‌چسبی و شکست چسبی است. در شکل ۱۱، نمودار استحکام چسبندگی برای دو نوع چسب قرمز و سفید ارائه شده است. رفتار موجی چسب سفید در نمودار، تاییدی بر دو نوع کندگی شکست هم‌چسبی و شکست چسبی بوده و افت پیوسته نمودار کاملاً مشهود است. این در حالی است که در نمودار مربوط به چسب قرمز، بعد از عبور از ناحیه گذرای اولیه، شرایط شکست هم‌چسبی حاکم می‌شود (شکل ۱۲). با شروع این ناحیه، افت خاصی مشاهده نمی‌شود و چسبندگی یکنواخت حاصل می‌شود.

شکست هم‌چسبی و شکست چسبی است. این در حالی است که در نمودار مربوط به چسب قرمز بعد از عبور از ناحیه گذرای اولیه دیگر افت خواص ندارد و شرایط شکست هم‌چسبی حاکم می‌شود.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### مراجع

- [1] G.W. Critchlow; D.M. Brewis, Review of surface pretreatments for aluminium alloys, Adhesion and Adhesives, vol. 16, pp. 255-275, 1996.
- [2] W. Brockmann, O.-D. Hennemann, H. Kollek, C. Matz, Adhesion in bonded aluminium joints for aircraft construction International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 6, pp. 115-143, 1896.
- [3] A.J. Kinloch, M.S.G. Little, J.F. Watts, The role of the interphase in the environmental failure of adhesive joints, Acta Materialia, vol.48, pp. 4543-4553, 2000.
- [4] Adhesive bonding handbook (ECSS-E-HB-32-21A), ESA Requirements and Standards Division 2011.
- [5] M.P. Martínez-Viademonte, S.T. Abrahami, T. Hack, M. Burchardt, H. Terryn, A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection, Coatings, vol. 10, pp. 1-20, 2020.
- [6] S.T. Abrahami, T. Hauffman, J.M.M.d. Kok, J.M.C. Mol, H. Terryn, The Effect of Anodic Aluminum Oxide Chemistry on Adhesive Bonding of Epoxy, The Journal of Physical Chemistry, vol. 120, pp. 19670-19677, 2016.
- [7] S.T. Abrahami, J.M.M.d. Kok, V.C. Gudla, R. Ambat, H. Terryn, J.M.C. Mol, Interface strength and degradation of adhesively bonded porous aluminum oxides, npj Materials Degradation, vol. 8, pp. 1-8, 2017.
- [8] R. H. Probert, Aluminum Anodizing flakes off when heated to 125 °C, 2010, <https://www.finishing.com/557/60.shtml>
- [9] N. Technology, CV-2289-1: Controlled volatility potting and encapsulating silicone elastomer, in: N. Technology, 2014.

قبولی دست پیدا کرد و نوع کنده شدن در تست مکانیکی از نوع شکست هم‌چسبی است. اعمال سندبلاست قبل از آندایز نیز منجر به ایجاد آندایزی با ساختار لانه پرند با خاصیت فوق آب‌دوست می‌شود که برای چسب‌پذیری گزینه بسیار مناسبی است. اما همچنان حرارت تاثیرگذار است. به طور کلی، این روش بر رفتار چسبندگی هر دو نوع چسب تاثیر گذاشته است. در چسب قرمز تقریباً با همان روش‌های قبلی می‌توان به چسبندگی قابل قبولی دست پیدا کرد و نوع کنده شدن چسب از نوع شکست هم‌چسبی است. اما در چسب سفید، با تغییر مورفولوژی سطح ورق استحکام چسبندگی تغییر کرده است. در اینجا نیز تاثیر حرارت مشهود ولی کنترل شده است و دلیل آن جذب آلودگی‌های محیطی و هیدراته شدن سطح است که هنوز به طور کامل شرایط شکست هم‌چسبی فراهم نشده است.



شکل

۱۲. کندگی نوع شکست هم‌چسبی در چسب CV10-2568 آماده‌سازی شده به روش A-P-H-P

اعمال سند بلاست بعد از آندایز و حرارت‌دهی به دلیل باقی ماندن لایه‌ها و پولک‌های ترک خورده پوشش آندایز روی سطح ورق‌ها چسبندگی قابل قبولی ایجاد نشد، اگرچه انتظار می‌رود زبری‌های ناشی از سندبلاست به شدت چسبندگی را افزایش دهد. در نمونه‌هایی که پوشش اکسیدی به روش FPL ایجاد شده است، از نظر خواص مکانیکی مشابه S-A-P-H-P است. نکته قابل توجه در این نمونه‌ها، تکرارپذیری مناسب و حساسیت کمتر آن در برابر حرارت است و کندگی چسب از هر دو نوع شکست هم‌چسبی و شکست چسبی است. در فرایند FPL، به دلیل ایجاد ساختار اکسیدی کاملاً متفاوت نسبت به پوشش‌های آندایز، برجستگی‌های سطحی قلاب مانند و ضخامت کمتر آن نسبت به آندایز، حساسیت به ترک خوردن ناشی از انبساط کمتر است. رفتار موجی چسب سفید در نمودار تست کشش، تاییدی بر دو نوع کندگی

- [10] N. Technology, CV10-2568: Controlled volatility RTV ablative silicone, in: N. Technology, 2019
- [11] N. Technology, CF1-135: High technology silicone primer, in: N. Technology, 2014.
- [12] N.T. LLC, Application and Storage Recommendations for NuSil's Primers, 2015.
- [13] E.R.a.S. Division, Black-anodizing of metals with inorganic dyes (ECSS-Q-ST-70-03C), ESA Requirements and Standards Division, 2008.
- [14] A. Bjørgum, F. Lapique, J. Walmsley, K. Redford, Anodising as pre-treatment for structural bonding, International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 23, pp. 401-412, 2003.
- [15] A. International, ASTM D7334-08: Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement, ASTM International West Conshohocken, 2013.
- [16] STI/33, BS EN ISO 7668: Anodizing of aluminium and its alloys. Measurement of specular reflectance and specular gloss of anodic oxidation coatings at angles of 20°, 45°, 60 °or 85°, BSI,2021.
- [17] J. Ye, Q. Yin, Y. Zhou, Superhydrophilicity of anodic aluminum oxide films: From "honeycomb" to "bird's nest", Thin Solid Films, vol. 517, pp. 6012-6015, 2009.
- [18] R.F. Wegman, J.V. Twisk, Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding, Elsevier Inc, 2013.
- [19] J.D. Minford, Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data, Marcel dekker, New York, 1993.
- [20] E.W. Thrall, R.W. Shannon, Adhesive Bonding of Aluminum Alloys, Boca Raton, 1985.



#### COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)