



بررسی تجربی چسبندگی میکروساختارهای چسبنده مصنوعی هرمی مارمولکی از جنس سیلگارد ۱۸۴ مورد استفاده در گریپرها

ایمان پورمیرزا آقا لنگرودی^{الف}، مهدی مدبری فر^{ب*}، محمدرضا شیخ الاسلامی^ج، میلاد همتی^{الف}

^{الف} دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، iman.langarodi69@gmail.com

^ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-modabberifar@araku.ac.ir

^ج استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-sheikhaleslami@araku.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
در سال‌های اخیر از چسبنده‌های مصنوعی الهام گرفته از موهای پاهای مارمولک در ربات‌های دیوار نورد و گریپرها استفاده شده است. این چسبنده‌ها به‌عنوان روشی جدید برای جابجایی اشیاء تخت در خطوط تولید مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش جابجایی مزایایی مانند مصرف کم انرژی و توانایی جابجایی مواد غیر مغناطیسی بر روش‌های مرسوم جابجایی اشیاء تخت دارد. چسبنده‌های جهت‌دار مارمولکی بر اساس مدل چسبندگی اصطکاکی بوده و از ساختارهای نامتقارن، عمدتاً گوه‌ای شکل، استفاده کرده و به‌صورت جهت‌دار و فقط در یک جهت عمل می‌کنند. در این مقاله، طراحی و ساخت چسبنده مصنوعی مارمولکی با میکروساختارهای هرمی از جنس سیلگارد ۱۸۴ توصیف شده است. با استفاده از میکروساختارهای هرمی امکان عملکرد در جهات مختلف وجود داشته، سطح چسبندگی بین میکروساختارهای چسبنده و ماده افزایش می‌یابد و امکان به هم چسبندگی میکروساختارهای چسبنده مارمولکی کاهش می‌یابد. در این پژوهش از روش ماشین‌کاری شیمیایی و میکرولیتوگرافی جهت ساخت قالب ریختگی این میکروساختارها استفاده شده و مراحل آن تشریح می‌شود. عملکرد چسبنده جهت‌دار هرمی پیشنهادی با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی ارزیابی گردید و نیروی چسبندگی بر روی مواد مختلف اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها نیروی چسبندگی نرمال با استفاده از نیروی برشی کنترل گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده میانگین افزایش ۳۰ درصد در چسبندگی نرمال نسبت به میکروساختارهای چسبنده گوه‌ای است.	چسبنده مارمولکی، میکرولیتوگرافی، ماشین‌کاری شیمیایی، گریپر، سیلگارد ۱۸۴.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷

Experimental Investigation of Adhesion of Synthetic Pyramid Shape Gecko-like Micro-structured Adhesive for Grippers Made of Silgard 184

Iman Pourmirzaagha Langroodi^a, Mehdi Modabberifar^{a*}, Mohammad reza Sheykholeslami^a, Milad Hemmati^a

^a Department Mechanical Engineering, Arak University, Arak, 3848177584, Iran

KEYWORDS

Gecko-like adhesive,
Microlithography,
Chemical machining,
Gripper,
Silgard 184.

Received: August 08, 2021

Revised: September 16, 2021

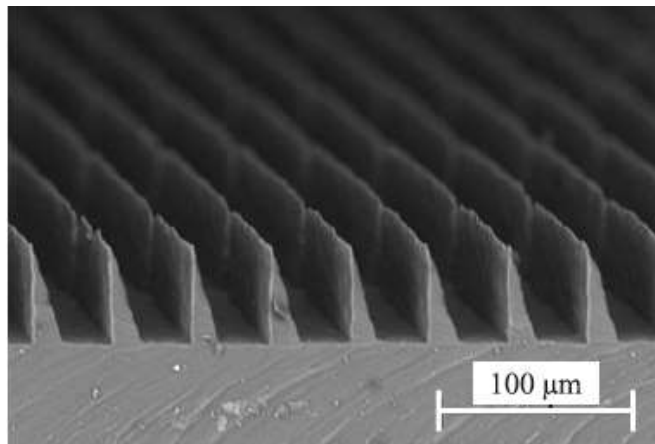
Accepted: October 04, 2021

ABSTRACT

In recent years, gecko-like dry adhesives have been used in robotic grippers and climbing robots. The adhesive has been introduced as a new approach for manipulating flat objects in production lines. The method has several advantages over other, more traditional, gripping methods such as lower power consumption compared to suction-based systems or the ability to handle non-magnetic materials. Directional Gecko-like adhesives are based on the frictional adhesion and employ asymmetric feature, mostly wedge shape, and perform only in one direction. In this paper, design and fabrication process of a new pyramid shape Gecko-like adhesive using silgard 184 has been described. The new microstructures has the ability of adhesion in several directions, and the contact surface between the adhesive and substrate increases and the possibility of self-sticking between adjacent stalks decreases. Chemical machining and microlithography were used for manufacturing molds in this research and the details were described. The performance of proposed adhesive was evaluated using an experimental set-up and adhesion force was measured on different substrate. During experiments, adhesion was controlled via applied shear force to adhesive. The experimental results showed 30% increase in adhesion using proposed adhesive in comparison with the existing similar adhesive.

۱- مقدمه

سیستم‌های انتقال اتومات ورق‌های تخت در فرآیندهای ساخت برای انتقال ورق‌های تخت مجزا از یک دستگاه به دستگاهی دیگر و یا برای بسته‌بندی نهایی محصولات استفاده می‌شوند. این سیستم‌ها برای گرفتن ورق یا از سیستم‌های مکشی یا از خواص ماده ورق مورد انتقال (به‌عنوان مثال استفاده از خواص مغناطیسی برای ورق‌های فرومغناطیس) استفاده می‌کنند. در سال‌های اخیر از چسبندگی الهام گرفته از مارمولک در گریپرها^۱ سیستم‌های انتقال استفاده شده است. منشأ این چسبندگی نیروهای واندروالسی بین چسب و ماده می‌باشد [۱]. این روش مزایایی از جمله مصرف کم انرژی نسبت به سیستم‌های مکشی یا قابلیت انتقال مواد غیر فرومغناطیس نسبت به روش‌های سنتی انتقال دارد [۲، ۳] نوع جهت‌دار (شکل ۱) این چسبنده قابلیت کنترل نیروی چسبندگی را دارد. زمانی که این چسبنده‌ها در جهت عمودی بارگذاری می‌شوند فقط نوک میکروساختارهای چسبنده با ماده در تماس هستند و نیروی چسبندگی کمی ایجاد می‌کنند. ولی زمانی که در ابتدا به این چسبنده‌ها نیروی برشی اعمال می‌شود میکروساختارهای مارمولکی^۲ خم‌شده و سطح مقطع بزرگ‌تری با سطح ماده مورد انتقال ایجاد می‌کنند و در نتیجه نیروی چسبندگی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند (شکل ۲). به‌طور کلی هرچقدر نیروی برشی بیشتر باشد نیروی چسبندگی بزرگ‌تری بین سطح چسبنده و ماده ایجاد می‌شود (تا یک حد مشخصی)؛ بنابراین با کنترل نیروی برشی می‌توان نیروی چسبندگی را اصطلاحاً روشن و خاموش کرد [۴].



شکل ۱ یک نمونه چسبنده مصنوعی مارمولکی جهت‌دار [۳]

چسبنده‌های مارمولکی مصنوعی جهت‌دار اخیر عمدتاً از میکروساختارهای گوه‌ای از جنس مواد الاستومر^۳ مانند انواع PDMS^۴ برای اتصال به سطوح استفاده می‌کنند [۵]. روش‌های مختلف ساخت مستقیم مانند پلیمریزاسیون^۵ افزودنی برای تولید میکروساختارهای چسبنده مارمولکی ارائه شده است [۶]؛ اما عمده روش‌ها مبتنی بر روش ریختن پلیمر بر روی سطح قالب‌های حفره‌دار و درآوردن میکروساختار چسبنده از درون قالب است. برای ساخت این قالب‌ها از روش‌های مختلفی مانند میکروماشینکاری [۷] و بعضی از روش‌های لیتوگرافی^۶ استفاده شده است که شامل لیتوگرافی سنتی ماوراءبنفش، لیتوگرافی پرتوالکترونی^۷ و ساخت لایه به لایه می‌باشد [۸]. این چسبنده‌ها معمولاً به روش‌های مختلفی در گریپرها مونتاژ می‌شوند.

در گریپرها با چسبنده مارمولکی جهت‌دار، نیروی مورد نیاز برشی برای روشن شدن چسبنده‌ها از سیستم‌های تحریک دستی، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار [۹] یا محرکه‌های برقی (شانک گریپر^۸، سولنوئید^۹) تأمین شده است و برای افزایش نیروی چسبندگی بین چسبنده و سطح ماده از ترکیب نیروی الکترواستاتیک و چسبندگی مارمولکی نیز استفاده شده است [۲].

^۱ Gripper

^۲ Gecko-like microstructures

^۳ Elastomer

^۴ Polydimethylsiloxane

^۵ Polymerization

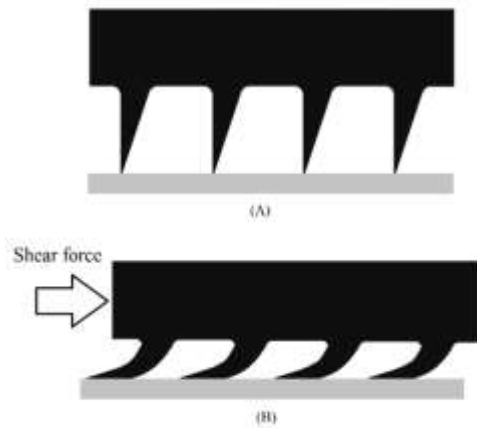
^۶ Lithography

^۷ E-beam

^۸ Schunk gripper

^۹ Solenoid

مواد مورد استفاده در این پژوهشها انواع تجاری PDMS مانند سیلگارد ۱۷۰^{۱۰} می باشد. میکروساختارهای چسبنده جهت دار مارمولکی گوه‌ای دارای مزایایی مانند سطح انطباق خوب با ماده مورد جابجایی می باشد. ولی باین وجود این میکرو ساختارها فقط در یک جهت روشن می شوند و امکان اشتباه بستن آنها در پدهای چسبنده رباتها و گریپرها وجود دارد. همچنین در این میکروساختارها امکان به هم چسبیدگی ساقه‌های مجاور یکدیگر وجود دارد که این مشکل راندمان چسبندگی را پایین می آورد.



شکل ۲ اصول عملکرد چسبندگی مارمولکی (A) چسبنده میکروگوه‌ای در نزدیکی سطح قطعه کار است و اجازه می دهد که فقط نوک گوه‌ها با سطح قطعه در تماس باشد (B) زمانی که به چسبنده نیروی برشی اعمال می شود سطح تماس چسبنده و قطعه کار افزایش یافته و در نتیجه نیروی چسبندگی بین میکروگوه‌ها و قطعه کار افزایش می یابد [۳]

جهت حل مشکلات فوق الذکر، در این مقاله میکروساختارهای هرمی از جنس سیلگارد ۱۸۴ جهت جایگزینی در پدهای چسبنده گریپرها پیشنهاد شده است. در میکروساختارهای هرمی امکان به هم چسبیدگی ساقه‌های مجاور به حداقل خود می رسد. همچنین با توجه به شکل متقارن ساختار هرمی امکان اعمال نیروی برشی در جهات متعدد وجود دارد و مشکل اشتباه بستن جهت پدهای چسبنده در گریپرهای رباتیک به حداقل می رسد. در این پژوهش، جهت ساخت قالب میکروساختارهای هرمی از فرآیندهای میکروولیتوگرافی و ماشین کاری شیمیایی استفاده می شود و در ادامه با استفاده از فرآیند ریختگی، میکروساختارهای چسبنده هرمی تولید می شوند.

۲- مواد و فرآیندها

در این بخش مواد مورد استفاده در فرآیند ساخت چسبنده هرمی مارمولکی و فرآیندهای مورد استفاده جهت ساخت این میکروساختارها تشریح می گردد.

۲-۱- میکروساختارهای چسبنده هرمی

با توجه به هزینه‌های بالای قالب‌سازی میکروساختارهای مارمولکی، تاکنون روابط تئوری برای طراحی این میکروساختارها ارائه نشده و عمده طراحی‌های انجام شده تاکنون به صورت تجربی بوده‌اند. ساختار گوه‌ای مورد استفاده در گریپرهای مارمولکی موجود علی‌رغم عملکرد موفقیت‌آمیزی که داشته‌اند دارای ایراداتی نیز هستند. همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، یکی از این مشکلات، چسبیده شدن میکروساختارها به یکدیگر در هنگام اعمال نیروی برشی زیاد است که باعث تخریب این میکروساختارها می گردد. همچنین این نمونه‌ها به دلیل شکل گوه‌ای بودنشان فقط عمل چسبندگی را از یک طرف انجام داده و جهت اعمال نیروی برشی می‌بایستی در جهت خوابیده شده میکروساختارها باشد در غیر این صورت عملکرد مطلوب چسبندگی حاصل نمی شود.

یکی دیگر از معایب میکروساختارهای گوه‌ای شکل مورد استفاده، راندمان نسبتاً پایین آنهاست. این میکروساختارها در بهترین حالت ممکن بیش از ۳۰ درصد ظرفیت تئوری خود جرم بلند نمی کنند [۵]. یکی از دلایل این موضوع عدم انطباق

¹⁰ Sylgard 170

کامل سطح چسبنده با سطح ماده مورد جابجایی است. با وجود اینکه در گریپرها موجود با ترکیب سطح صلب و انعطاف پذیر تلاش شده که مقدار جرم مورد جابجایی افزایش یابد، ولیکن به دلیل نسبت طول (۲۰۰ میکرومتر) به عرض پایه (۲۰ میکرومتر) زیاد در این میکروساختار، با کوچک‌ترین شیبی که در پد چسبنده ظاهر می‌شود، تماس یکسر میکروساختارها با سطح قطع می‌شود. برای رفع این مشکل، میکروساختارهای منفرد راه‌حل مناسبی به نظر می‌رسند. در ساختار هرمی پیشنهادی علاوه بر مزیت انطباق بهتر با سطوح به دلیل منفرد بودن میکروساختارهای چسبنده، احتمال چسبیده شدن میکروساختارهای مجاور کمتر شده و امکان اعمال نیروی برشی از چهار طرف فراهم می‌گردد. این ساختارهای هرمی دارای زاویه حدوداً ۵۰ درجه‌ای در چهار طرف به صورت نوک‌تیز می‌باشند. از ویژگی‌های این ساختار می‌توان به چسبندگی بهتر به سطوح تخت و مقاومت و استحکام بیشتر در برابر آسیب‌های فشاری و درهم‌رفتگی ساقه‌های چسبنده اشاره کرد. همچنین در این ساختار امکان اعمال نیروی برشی جهت درگیر کردن چسبنده با سطوح از چهار طرف وجود داشته و امکان اشتباه بسته شدن این چسبنده در پدهای گریپری را به حداقل می‌رساند. در شکل ۳ شماتیک چسبنده جهت‌دار مارمولکی پیشنهادی با طرح هرمی نشان داده است. ابعاد پایه و فاصله میکروساختارها مشابه پژوهش‌های قبلی [۳، ۵] ۲۰ و ۲۵ میکرومتر انتخاب شده است. ارتفاع این هرم‌ها هنگام ساخت و در فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی مشخص می‌شود.



شکل ۳ شماتیک چسبنده جهت‌دار مارمولکی پیشنهادی با طرح هرمی

۲-۲- ماده تشکیل‌دهنده میکروساختارها

پس به دلیل نیاز چسبنده‌های مارمولکی به قابلیت استفاده مجدد، برای ساخت آن‌ها از مواد الاستومر حجمی استفاده می‌شود تا در مقابل رسوب ناشی از آلودگی مقاوم بوده و عمر ساقه‌های چسبنده را افزایش دهند. این بدان معناست که ماده مورد استفاده می‌بایستی مدول یانگ و استحکام برشی مطلوبی داشته باشد. PDMS یک الاستومر بوده که به‌طور گسترده در میکروساختارهای چسبنده مارمولکی استفاده شده است. روش ساخت نیز عمدتاً به روش ریختن^{۱۱} بوده و PDMS بعد از ترکیب با یک ماده هاردنر^{۱۲} بر روی سطح قالب مادگی میکروساختارها ریخته شده و حفره‌های آن را پر می‌کند و سپس در کوره پخته می‌شود؛ بنابراین المان کلیدی ساخت میکروساختارهای چسبنده (با هر شکل و ساختاری)، قالب‌های آن می‌باشد که به روش‌های مختلفی ساخته می‌شوند. متداول‌ترین روش ساخت این قالب‌ها روش میکرولیتوگرافی^{۱۳} و ماشین‌کاری شیمیایی یا ترکیبی از این دو است.

مقدار PDMS مایع به مقدار ضخامت چسبنده بستگی دارد. هرچه قدر میزان ضخامت بیشتر باشد استحکام چسبنده مارمولکی بیشتر می‌شود. در این پژوهش از یک PDMS موجود در بازار با نام تجاری سیلگارد ۱۸۴^{۱۴} با ترکیب هاردنر آن طبق دستورالعمل سازنده برای ساخت میکروساختارهای چسبنده مارمولکی استفاده شده است و نتایج آن با میکروساختار گوه‌ای از همین جنس مقایسه شده است.

¹¹ Casting

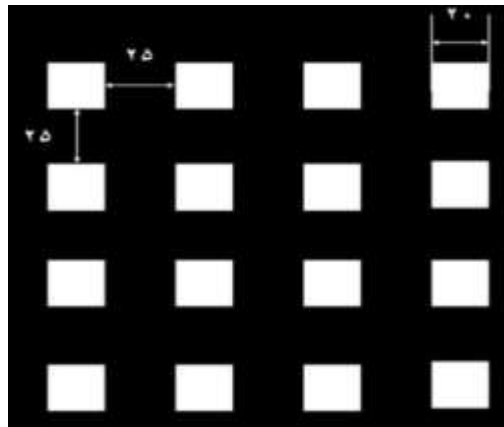
¹² Hardener

¹³ Microlithography

¹⁴ Sylgard-184

۲-۳- ساخت قالب میکروساختارهای چسبنده مارمولکی

هدف در این قسمت ساخت قالب میکروساختارهای چسبنده است که دربرگیرنده حفره‌های هرمی شکلی است که بتوان میکروساختارهای چسبنده هرمی مارمولکی را از آن بیرون آورد. با توجه با ابعاد کوچک این حفره‌ها، متداول‌ترین روش برای ساخت آن‌ها میکرولیتوگرافی و ماشین‌کاری شیمیایی است. در این پژوهش از ترکیب هر دو فرآیند برای ساخت قالب مورد نظر استفاده شده است. در ابتدا یک ویفر سیلیکونی که معمولاً برای ساخت قالب‌های میکرونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌عنوان زیر لایه انتخاب شده و پس از شست‌وشو با آب به روش لایه نشانی چرخشی، لایه‌های اکسید سیلیکون (۳ میکرومتر)، کروم (۱ میکرومتر) و ماده حساس به نور یا فتورزیست^{۱۵} مثبت بعد از انجام مرحله حباب‌گیری در خلأ و پخت اولیه بر روی آن قرار می‌گیرد. علت استفاده از کروم و اکسید سیلیکون در این قالب، دقت بالای خوردگی آن‌ها در فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی است. فتورزیست مثبت ماده‌ای است که در فرآیند میکرولیتوگرافی مورد استفاده قرار گرفته و با قرارگیری در معرض نور فرابنفش در ماده‌ای موسوم به ظاهر ساز^{۱۶} حل یا اصطلاحاً ظاهر می‌گردد. با استفاده از ماسک‌های الگو می‌توان به ماده حساس به نور الگویی را منتقل نمود. فتورزیست مورد استفاده در این پژوهش S1813 می‌باشد. روی ماده حساس به نور ماسکی از جنس کروم که طرح هرمی را بر روی آن ایجاد می‌کند قرار گرفته (شکل ۴) و سپس درون دستگاه پرتونگاری فرابنفش قرار می‌گیرد. بعد از قرارگیری درون دستگاه لیتوگرافی پرتو نور فرابنفش، پرتو نور همگن از این ماسک عبور کرده و طرحی روی لایه حساس به نور ایجاد می‌کند. نور فرابنفش باعث می‌شود فتورزیست مثبت که یک ماده غیرقابل حل در محلول ظهور است، در معرض نور ساختار شیمیایی آن تغییر کرده و آن قسمت‌هایی که نور دیده به ماده قابل حل شدن تبدیل می‌شود. این نواحی در محلول ظهور حل می‌شوند و قسمت‌هایی که به‌وسیله ماسک در معرض نور قرار نگرفته در مایع ظهور حل نمی‌شوند و طرح نهایی ظاهر می‌شود. مراحل فرآیند ساخت قالب در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴ طرح ماسک فتورزیست مثبت برای چسبنده مارمولکی هرمی (همه ابعاد به میکرومتر است)

مرحله بعدی ساخت قالب شامل ماشین‌کاری شیمیایی (اچینگ^{۱۷}) می‌باشد. در این مرحله قالب سیلیکونی را ابتدا در محلول اکسید کروم و سپس در محلول اسیدی اکسید سیلیکون قرار داده تا مرحله خوردگی دوم و سوم انجام شود. در این مرحله با غوطه‌ورسازی ویفر سیلیکون درون حمام اکسید سیلیکون واکنش شیمیایی درون مواد مورد نظر و لایه‌ها به‌صورت مرتب انجام می‌پذیرد و در مرحله پایانی قالب بیرون آورده شده و با آب‌وهوا شست‌وشو می‌شوند. تمام این موارد مانند فرآیند لیتوگرافی درون آزمایشگاه با فیلتر نور زرد انجام می‌پذیرد زیرا فتورزیست‌های موردنظر با نور معمولی واکنش‌پذیر می‌باشد. به‌طور خلاصه در مراحل ساخت قالب، از لیتوگرافی برای ایجاد تصویری از طرح و از اچینگ برای انتقال الگو به لایه‌ها استفاده گردید. اچینگ مورد استفاده در این پژوهش از نوع مرطوب ناهمسانگرد می‌باشد که در آن نرخ اچینگ وابسته به جهت‌گیری بلور است و خوردگی در بعضی از جهت‌ها خیلی سریع‌تر از دیگر جهت‌گیری‌های بلوری است. معمولاً از ترکیب (KOH) برای این نوع اچینگ استفاده می‌شود. ادامه این نوع اچینگ در عمق باعث ایجاد شکل هرمی در حفره‌های قالب می‌شود. شکل ۶

¹⁵ Photoresist

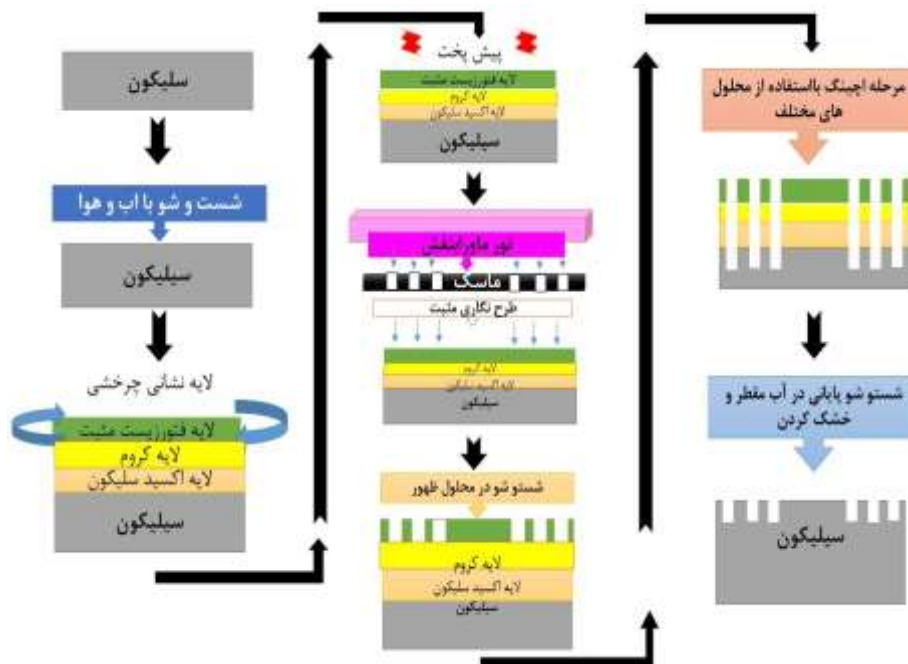
¹⁶ Developer

¹⁷ Etching

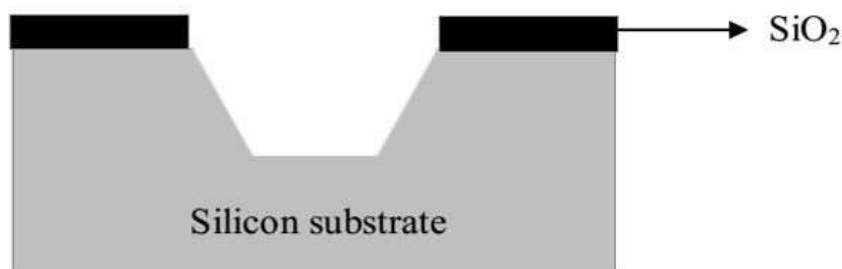
سطح مقطع این نوع اچینگ را نشان می‌دهد.

۲-۴- فرآیند ساخت میکروساختارهای چسبنده هرمی مارمولکی

جهت ساخت میکروساختارهای هرمی شکل چسبنده، سیلگارد ۱۸۴ مطابق دستورالعمل سازنده آماده شده و در محفظه خلأ به مدت ۳ دقیقه حباب زدایی می‌شود. این ماده بعد از حباب زدایی بر روی سطح قالب ریخته شده و در دستگاه سانتریفیوژ به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه چرخانده می‌شود تا یک لایه نازکی از چسبنده با ضخامت یکسان بر روی سطح قالب قرار گیرد. سپس قالب به همراه چسبنده در کوره قرار گرفته و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه پخته می‌شود. نهایتاً چسبنده مصنوعی مارمولکی پخته شده با استفاده از تیغه آزمایشگاهی از روی قالب برداشته می‌شود. شکل ۷ تصویر SEM^{۱۸} میکروساختارهای ساخته شده هرمی چسبنده مارمولکی و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۵ مراحل ساخت قالب میکرو ساختار چسبنده مارمولکی هرمی با استفاده از فرآیندهای میکرولیتوگرافی و ماشین‌کاری شیمیایی

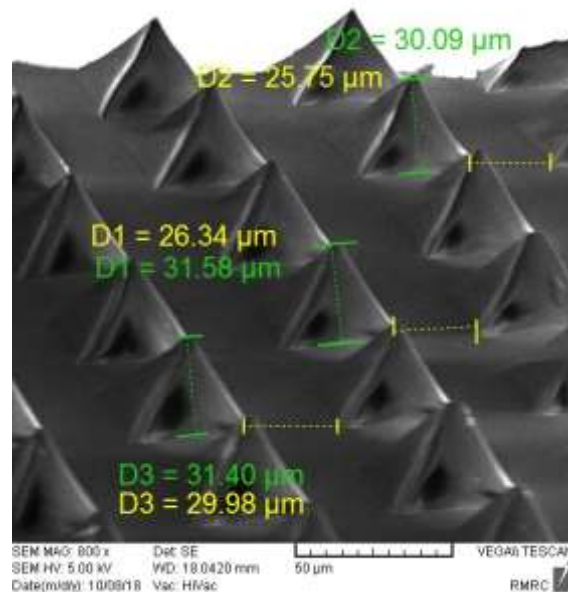


شکل ۶ سطح مقطع اچینگ ناهمسانگرد

¹⁸ Scanning electron microscope

۳- آزمایش‌ها

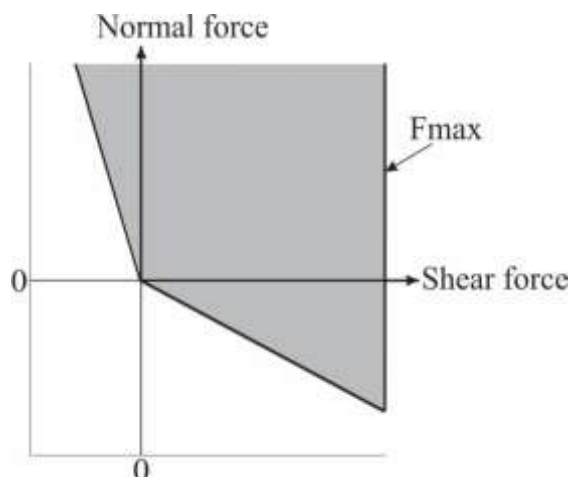
پس از انجام مراحل ساخت قالب به‌وسیله فرآیند میکرولیتوگرافی و ماشین‌کاری شیمیایی، نمونه ساخته‌شده که به‌عنوان چسبنده مارمولکی شناخته می‌شود می‌بایستی مورد آزمایش قرار گرفته و عملکرد آن بر سطوح مختلف ارزیابی شده و نمودارهای چسبندگی نرمال آن استخراج شود. از این‌رو در این قسمت به آزمایش میزان چسبندگی این چسبنده مارمولکی پرداخته می‌شود. جهت انجام این آزمایش‌ها، ابتدا باید چسبنده مارمولکی ساخته‌شده را به یک پد انعطاف‌پذیر که توانایی این چسبنده را در انطباق با سطوح افزایش می‌دهد متصل کرده و سپس آزمایش‌ها انجام شود.



شکل ۷ تصویر SEM و مشخصات هندسی میکروساختارهای ساخته شده چسبنده هر می مارمولکی

۳-۱- طراحی پد چسبنده برای آزمایش‌ها

چسبندگی مارمولکی جهت‌دار از مدل چسبندگی اصطکاکی^{۱۹} تبعیت می‌کند [۹]. در این مدل مطابق شکل ۸ با افزایش نیروی برشی بر چسبنده، نیروی چسبندگی نرمال افزایش می‌یابد.

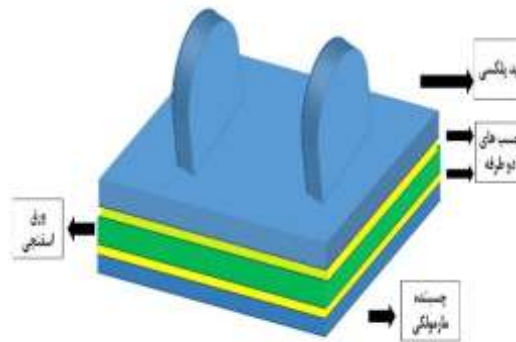


شکل ۸ مدل چسبندگی اصطکاکی. مقادیر زیر صفر نیروی نرمال نشان‌دهنده چسبندگی هستند [۹]

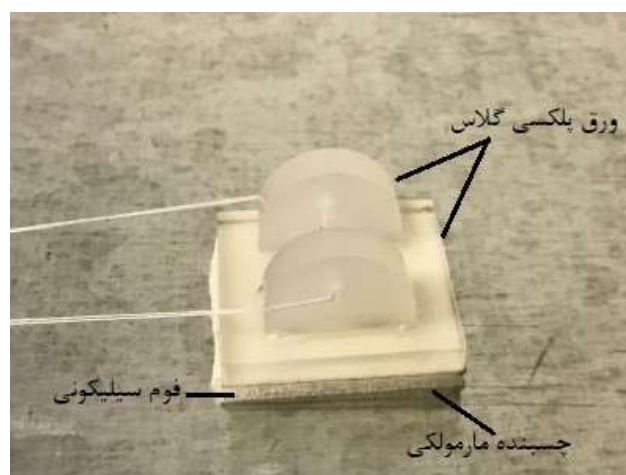
بنابراین برای ارزیابی عملکرد چسبنده ساخته‌شده نیاز است که ابتدا این چسبنده بر روی سطح مورد نظر قرار گیرد، سپس یک نیروی برشی به موازات سطح، بر چسبنده اعمال شود و در ادامه نیروی چسبندگی نرمال (عمود بر سطح) اندازه‌گیری شود.

¹⁹ Frictional adhesion

این مراحل را هم می‌توان در یک گریپر (دستی یا اتومات) یا یک پد چسبنده به صورت دستی انجام داد. جهت اندازه‌گیری نیروی برشی و نرمال به‌طور هم‌زمان نیاز به سنسور اندازه‌گیری نیروی چند محوره است، ولیکن با توجه به قیمت بالای این سنسورها و در دسترس نبودن آن در این پژوهش، از یک چیدمان آزمایشگاهی ابتکاری برای اعمال و اندازه‌گیری نیروی برشی و اندازه‌گیری نیروی چسبندگی نرمال استفاده گردید که در ادامه توضیح داده می‌شود. در ابتدا لازم است که یک پد چسبنده دستی برای انجام آزمایش‌ها طراحی و ساخته شود. برای اینکه پد چسبنده بتواند انطباق خوبی با سطح ورق‌های تخت مورد آزمایش داشته باشد، یک پشتی صلب نیاز است که برای ساخت آن از ورق پلکسی گلاس^{۲۰} استفاده شده است. برای این منظور یک ورق پلکسی گلاس مربعی شکل به ابعاد ۳ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر برش خورده و دو ورق نیز به صورت قلاب بر روی ورق پلکسی گلاس چسبانده می‌شود (شکل ۹). لایه‌های مورد استفاده در این پد به ترتیب از روی سطح جسم عبارتند از یک لایه میکروساختار چسبنده مارمولکی که با چسب دو لایه به یک فوم سیلیکونی چسبانده شده و فوم سیلیکونی نیز با یک چسب دولایه به پشتی پلکسی گلاس متصل می‌شود. دلیل انتخاب فوم سیلیکونی در این پد، انعطاف‌پذیری و قابلیت انطباق خوب فوم با پستی و بلندی سطح جسم در ابعاد میکرونی است. با افزایش سطح انطباق پد چسبنده با سطح جسم مورد نظر، نیروی و اندروالسی افزایش یافته و چسبندگی نیز بیشتر خواهد شد. شکل ۱۰ پد چسبنده ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹ لایه‌های پد چسبنده مورد استفاده در آزمایش‌ها

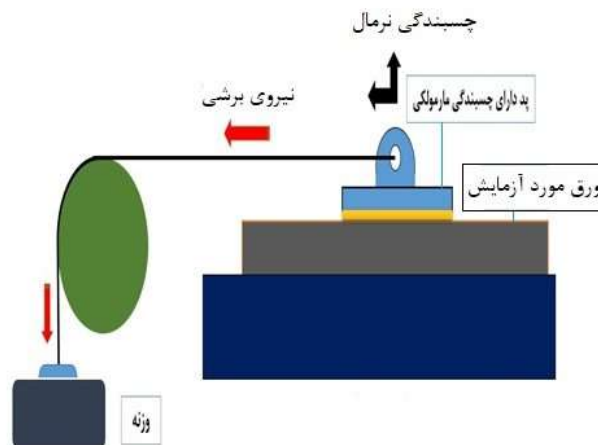


شکل ۱۰ پد چسبنده ساخته‌شده

²⁰ Plexiglass

۳-۲- مجموعه آزمایشگاهی و آزمایش‌ها

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، در ارزیابی چسبنده‌های جهت‌دار مارمولکی، جهت فعال شدن چسبنده طبق مدل چسبندگی اصطکاکی نیاز به اعمال نیروی برشی در جهتی به موازات سطح جسم مورد جابجایی است. جهت اعمال نیروی برشی بر پد چسبنده، از وزنه‌های استاندارد استفاده گردید. این وزنه‌ها داخل یک ظرف قرار گرفته و از طریق یک نخ به پد چسبنده نیرو اعمال می‌کنند. شکل ۱۱ شماتیک مجموعه اندازه‌گیری نیروی چسبندگی را نشان می‌دهد. بعد از اعمال نیروی برشی بر پد چسبنده و چسبیده شدن آن به سطح ورق مورد نظر، پد چسبنده به صورت دستی بلند می‌شود. در این پژوهش معیار اندازه‌گیری چسبندگی نرمال حداکثر نیروی چسبندگی می‌باشد و برای اندازه‌گیری آن، وزن سنگین‌ترین ورق را که بتوان با یک نیروی برشی مشخص بلند کرد (ورق فقط از سطح پایه جدا شود) بر سطح مقطع پد چسبنده تقسیم کرده و تنش فشاری که نشان‌دهنده چسبندگی است محاسبه می‌شود. موادی که برای بلند کردن به وسیله پد چسبنده مارمولکی از آن‌ها استفاده شده در ابعاد 20×20 سانتی‌متر بوده و نوع جنس آن‌ها به ترتیب: پلکسی گلاس، شیشه، ورق فولادی و اکریلیک^{۲۱} می‌باشد. دمای محیط زمان آزمایش 20 ± 2 سلسیوس و رطوبت نسبی 40 ± 5 درصد بود؛ و شکل ۱۲ ماکزیمم نیروی چسبندگی اندازه‌گیری شده برای مواد ذکر شده را با استفاده از سیلگارد - ۱۸۴ در تنش‌های برشی مختلف نشان می‌دهد. این نمودار نشان‌دهنده آن است که بیشترین نیروی چسبندگی در اکریلیک به دست آمده است.



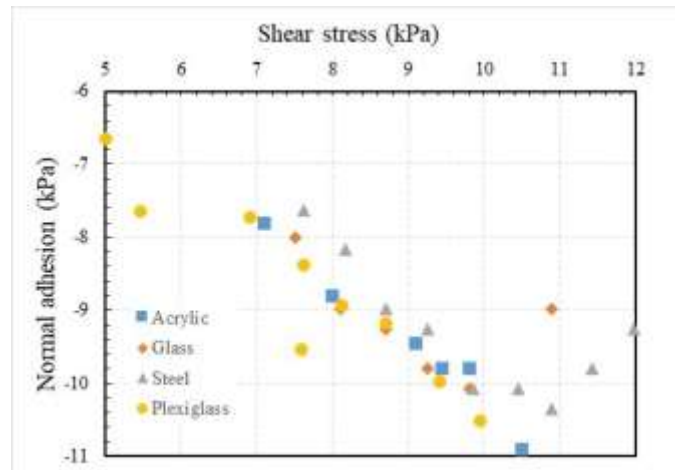
شکل ۱۱ شماتیک مجموعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری

شکل ۱۳ چسبندگی میکروساختار گوه‌ای را با هرمی در ماده شیشه [۳] مقایسه می‌کند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بیشینه چسبندگی میکروساختار هرمی تا $1/3$ برابر بیشینه چسبندگی میکروساختار گوه‌ای اندازه‌گیری شده است.

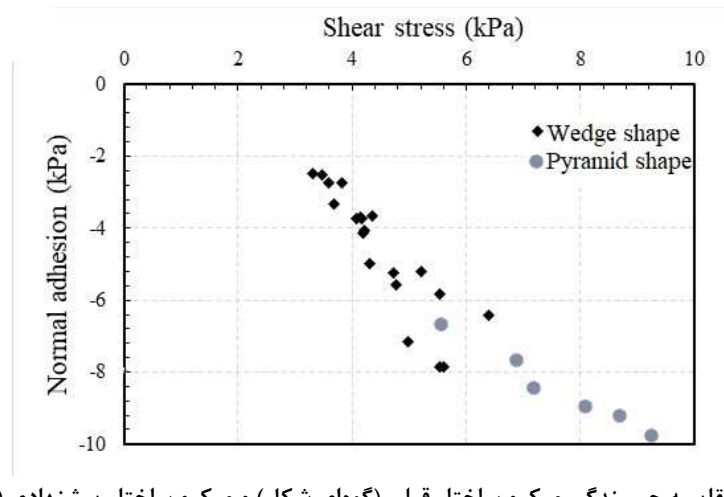
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک قالب جهت ساخت میکروساختارهای چسبنده مارمولکی هرمی شکل طراحی و ساخته شد که عملکرد موفق در چسبندگی بر روی سطوح مختلف داشت. در میکروساختارهای هرمی می‌توان نیروی برشی را از چهار طرف اعمال کرد که از این لحاظ نسبت به میکروساختارهای چسبنده گوه‌ای موجود دارای مزیت است. علاوه بر این ساختار منفرد این میکروساختار امکان انطباق بهتری بر روی سطوح مورد نظر نسبت به میکروساختار گوه‌ای موجود فراهم کرده و چسبندگی بین پد چسبنده و ماده مورد نظر افزایش می‌یابد. از این چسبنده مارمولکی ساخته‌شده می‌توان برای پدها و یا بازوهای رباتیک و یا ربات‌های دیوار نورد استفاده کرد.

²¹ Acrylic



شکل ۱۲ ماکزیمم تنش برشی و چسبندگی نرمال اندازه‌گیری شده در چسبنده مارمولکی هرمی بر روی مواد مختلف



شکل ۱۳ مقایسه چسبندگی میکرو ساختار قبلی (گوه‌ای شکل) و میکرو ساختار پیشنهادی (هرمی)

۵- مراجع

- [1] Parness A, Kennedy B A, Heverly M C, Cutkosky M R, Hawkes E W. Grippers based on opposing van der waals adhesive pads. Google Patents; 2016.
- [2] Dadkhah M, Zhao Z, Wettels N, Spenko M. A self-aligning gripper using an electrostatic/gecko-like adhesive. in International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016;1006-1011.
- [3] Modabberifar M, Spenko M. Development of a gecko-like robotic gripper using scott-russell mechanisms. Robotica. 2020;38:541-549.
- [4] Santos D, Spenko M, Parness A, Kim S, Cutkosky M. Directional adhesion for climbing: theoretical and practical considerations. Journal of Adhesion Science and Technology. 2007;21:1317-1341.
- [5] Parness A, Soto D, Esparza N, Gravish N, Wilkinson M, Autumn K, Cutkosky M. A microfabricated wedge-shaped adhesive array displaying gecko-like dynamic adhesion, directionality and long lifetime. Journal of the Royal Society Interface. 2009;6:1223-1232.
- [6] Davoudinejad A, Ribo M M, Pedersen D B, Islam A, Tosello G. Direct fabrication of bio-inspired gecko-like geometries with vat polymerization additive manufacturing method. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2018;28:085009.
- [7] Day P, Eason E V, Esparza N, Christensen D, Cutkosky M. Microwedge machining for the manufacture of directional dry adhesives. Journal of Micro and Nano-Manufacturing. 2013;1:011001.

- [8] Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, Novoselov K S, Zhukov A A, Shapoval S Y. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature materials*. 2003;2:461-463.
- [9] Modabberifar M, Spenko M. A shape memory alloy-actuated gecko-inspired robotic gripper. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;276:76-82.
- [10] Hosein Mirzaee R, Modabberifar M. A solenoid actuated gecko-like robotic gripper. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019;6:43-50.