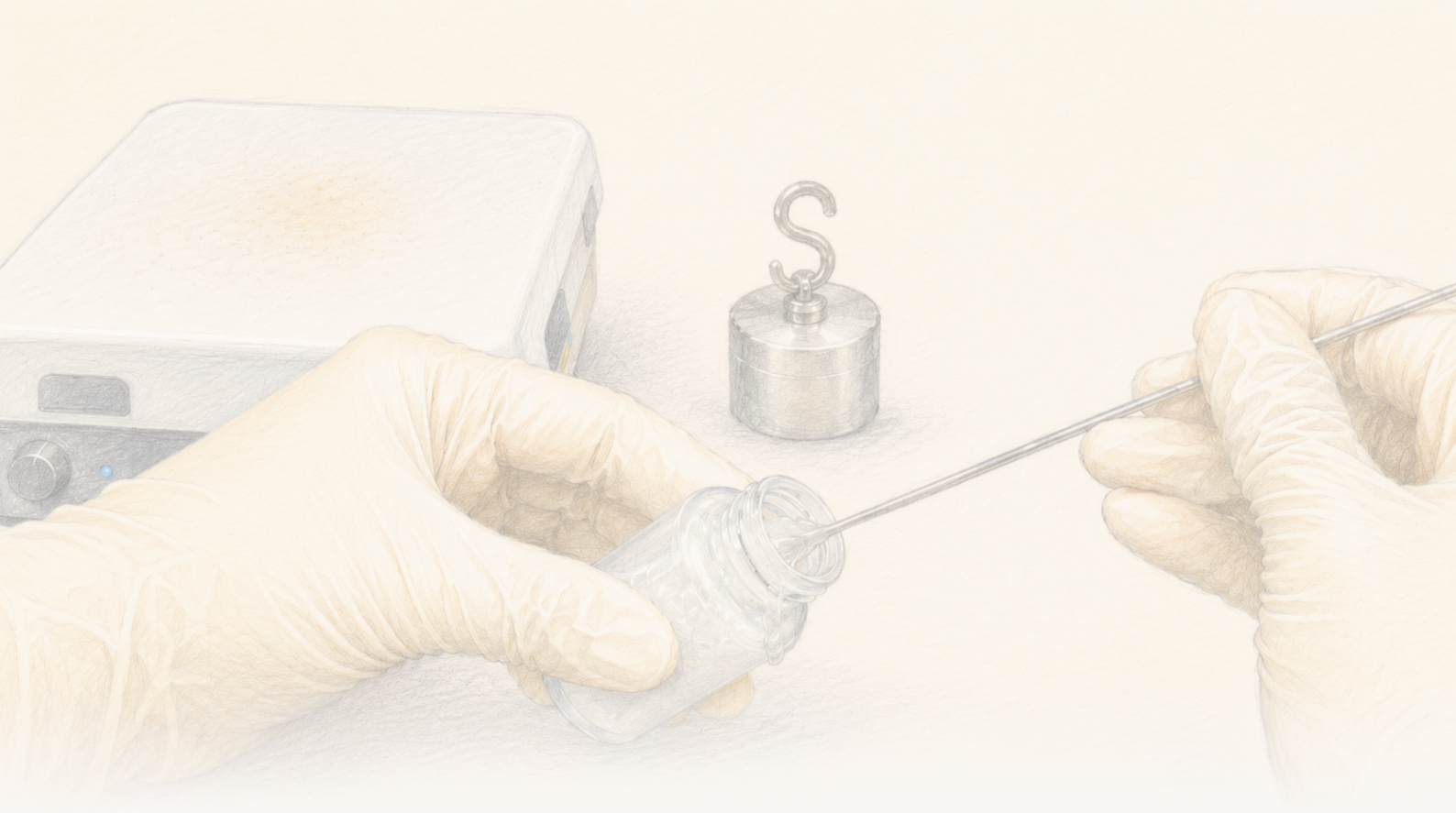


The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

جزيء صغير لصق PTFE غير المعالج ثم أزيل بالغسل بالإيثانول

تصف ورقة في *JACS* مواد لاصقة من فوسفات إيثر تاجي مفلور تستطيع ربط *PTFE* المعروف بخموله في اختبارات قص بالتراكب مخبرية، مع بقائها قابلة للإزالة بالغسل بالإيثانول. وصل *CyclicFP-fmoc* إلى 3.1 *MPa* على *PTFE* غير المعالج مع فشل تماسكي مطيل، ووصل متغير قريب إلى 3.2 *MPa*. وتدعم الأدلة الطيفية آلية تشمل تفاعلات فلور-فلور عند *PTFE*، إلى جانب الروابط الهيدروجينية وتراص π داخل المادة اللاصقة. إنها نتيجة مواد واعدة، لكنها ليست بعد غراءً تجارياً ولا حلاً عاماً لإعادة التدوير ولا تقييماً كاملاً للسلامة البيئية.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Michele Renda and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Allowing Easy Wipe-Off Removal,* Kohei Kikkawa, Abir Goswami, Kiyoshi Morishita, Hao Wang, Takashi Nakamura, and Takuzo Aida, Journal of the American Chemical Society ,148 -29138 29145 (2026) · DOI: 6c07886.jacs/1021.10

يصعب لصق PTFE لسبب وجيه

بولي تترافلوروإيثيلين، المعروف أكثر باسم PTFE والمباع تحت أسماء تجارية منها Teflon، مفيد جزئياً لأنه لا يميل إلى التفاعل. طاقة سطحه منخفضة. كثير من السوائل تتكور فوقه. وكثير من المواد اللاصقة تفشل عليه ما لم يُحفر السطح أو يُخشّن أو يُعالج بالبلازما أو يُستخدم معه أساس لاصق متخصص.

هذه المقاومة ممتازة للطلاءات غير اللاصقة والأجزاء الخاملة كيميائياً. لكنها تصبح مشكلة عندما يريد المهندسون وصل PTFE بجزء آخر من دون إتلاف سطحه بصورة دائمة.

تصف ورقة في Society Chemical American the of Journal مادة لاصقة جزيئية صغيرة تتعامل مع هذه المشكلة من زاوية غير معتادة. فقد وصف Kikkawa Kohei وGoswami Abir وزملاؤهما جزيئات فوسفات إيثر تاجي مفلورة تستطيع الالتصاق بقوة بـPTFE غير المعالج، والتشوه بصورة مطيلة قبل الفشل، ثم إزالتها من ألواح PTFE بالغسل بالإيثانول.

الجزيء الرئيسي يسمى **CyclicFP-fmoc**. في اختبارات القص بالتراكب، ربط ألواح PTFE غير المعالجة بقوة التصاق بلغت **3.1 ± 1.0 MPa** وبشغل فصل بلغ **1300 N/m**. وبما أن 1 MPa يساوي 1 نيوتن لكل مليمتر مربع، فإن إجهاد الذروة المقاس البالغ 3.1 MPa يعادل الضغط الناتج تقريباً عن وزن تفاحة كتلتها 130 غراماً موزعاً على كل مليمتر مربع. هذه مقارنة لكل وحدة مساحة، وليست القوة أو هندسة التلامس في عينة الاختبار. أما شغل الفصل المبلغ عنه، 1300 N/m، فيعادل 1300 جول من طاقة الفصل لكل متر مربع. ولعرض بصري مباشر، لا كتقييم هندسي للحمل، تُظهر الورقة وصلة مساحتها 7 cm^2 وهي تحمل وزناً قدره 8 كغ. وقد حدث الفشل داخل طبقة المادة اللاصقة، لا عند واجهة PTFE. وهذا مهم: فهو يعني أن الواجهة لم تكن نقطة الضعف في الاختبار.

رسم بالقلم مستند إلى صورة الورقة لشريط لاصق يحمل أوزاناً معلقة (الشكل 2، يسار). ليس الصورة الأصلية، ولا رسماً بمقياس، ولا مخططاً هندسياً لتصنيف الحمل.

AI-generated adaptation — The Clean Paper; source photograph: Kikkawa et al., JACS ,2026 Figure 2 (left) Fair-use assertion

النتيجة ليست أن «مشكلة PTFE حُلّت». إنها نتيجة مواد مخبرية مضبوطة. لكنها مثال واضح على جمع خصائص يصعب اجتماعها: التصاق قوي، وفشل مطيل، وإزالة بالمسح من سطح مشهور بمقاومته للالتصاق.

لماذا تتعارض القوة العادية مع سهولة الإزالة؟

تعقد المواد اللاصقة عادة صفقة. فاللواصق البوليمرية الصلبة المتشابكة يمكن أن تكون قوية، لكنها غالباً ما تفشل فجأة ويصعب إزالتها بصورة نظيفة. أما المواد اللاصقة الأكثر ليونة والشبيهة بالشريط فيمكنها أن تتمدد وتبدد الطاقة، لكنها تخلى عادة عن بعض القوة.

هذا التنازل متجذر في المستوى الجزيئي. فالقوة تحتاج إلى نقل فعال للإجهاد. والمطيلية تحتاج إلى الحركة وإعادة الترتيب وتبديد الطاقة. وسهولة الإزالة تحتاج إلى روابط يمكن كسرها من دون تدمير الركيزة. وهذه المتطلبات تسحب في اتجاهات مختلفة.

المواد اللاصقة الجزيئية الصغيرة جذابة لأنها قد تكون، من حيث المبدأ، قابلة للإزالة وإعادة التدوير. فهي لا تكوّن الشبكات البوليمرية الطويلة والمتشابكة التي تمنح كثيراً من اللواصق التقليدية متانتها. لكن هذه أيضاً نقطة ضعفها: فمن دون التشابك، تواجه الجزيئات الصغيرة عادة صعوبة في تحقيق التصاق قوي ومطيل في الوقت نفسه.

تحاول ورقة JACS استبدال التشابك البوليمري بمجموعة من التفاعلات غير التساهمية القابلة للعكس. يجمع الجزيء منطقة فوسفات إيثر تاجي مفلورة مع مجموعة fmoc مرتبطة عبر يوريثان. وبعبارات بسيطة، يمكن للحلقة المفلورة أن تتفاعل مع سطح PTFE الغني بالفلور، ويمكن لمجموعات اليوريثان أن تكوّن روابط هيدروجينية مع جزيئات لاصقة مجاورة، ويمكن لمجموعات الفلورينيل المسطحة أن تتراص فوق بعضها. الهدف التصميمي ليس رابطة سحرية واحدة، بل مجموعة من التفاعلات الضعيفة والقابلة للعكس التي تعمل معاً:

- تفاعلات فلور-فلور قرب PTFE؛
- روابط هيدروجينية بين جزيئات المادة اللاصقة؛
- تراص π-π بين مجموعات الفلورينيل؛
- وحركة جزيئية كافية لتخفيف الإجهاد بدلاً من التشقق فوراً.

ما الذي أظهره اختبار PTFE الرئيسي؟

وضع المؤلفون CyclicFP-fmoc بين ألواح PTFE لم تُعالج سطحياً ولم تُنظف، ثم سخنوا المادة اللاصقة وتركوا الألواح في درجة حرارة الغرفة لمدة 10 دقائق قبل الاختبار.

للاختبار الكمي، استخدموا القص بالتراكب. ووصلت ألواح PTFE المرتبطة بـCyclicFP-fmoc إلى **3.1 ± 1.0 MPa** من إجهاد الشد، وهي قيمة أبلغ عنها كمتوسط ± انحراف معياري لثلاثة قياسات. كما أعطى تطبيق المادة اللاصقة عند نحو **50 °C** باستخدام مجفف شعر قيمة مشابهة بلغت **1.1 ± 1.0 MPa**، بدلاً من اشتراط الصهر عند درجات حرارة مرتفعة فقط.

قارن المؤلفون هذه القيم بمواد لاصقة تجارية من الإيبوكسي والأكريليك والسيليكون واليوريثان في إعداد القص بالتراكب نفسه على PTFE. وصلت تلك الضوابط إلى نحو **1.0 إلى 7.0 MPa**، مقابل **3.1 ± 1.0 MPa** لـCyclicFP-fmoc. وهذه المقارنة على الركيزة نفسها وبالطريقة

نفسها أكثر فائدة من وضع قيم MPa مأخوذة من مواد وهندسات اختبار مختلفة في ترتيب واحد.

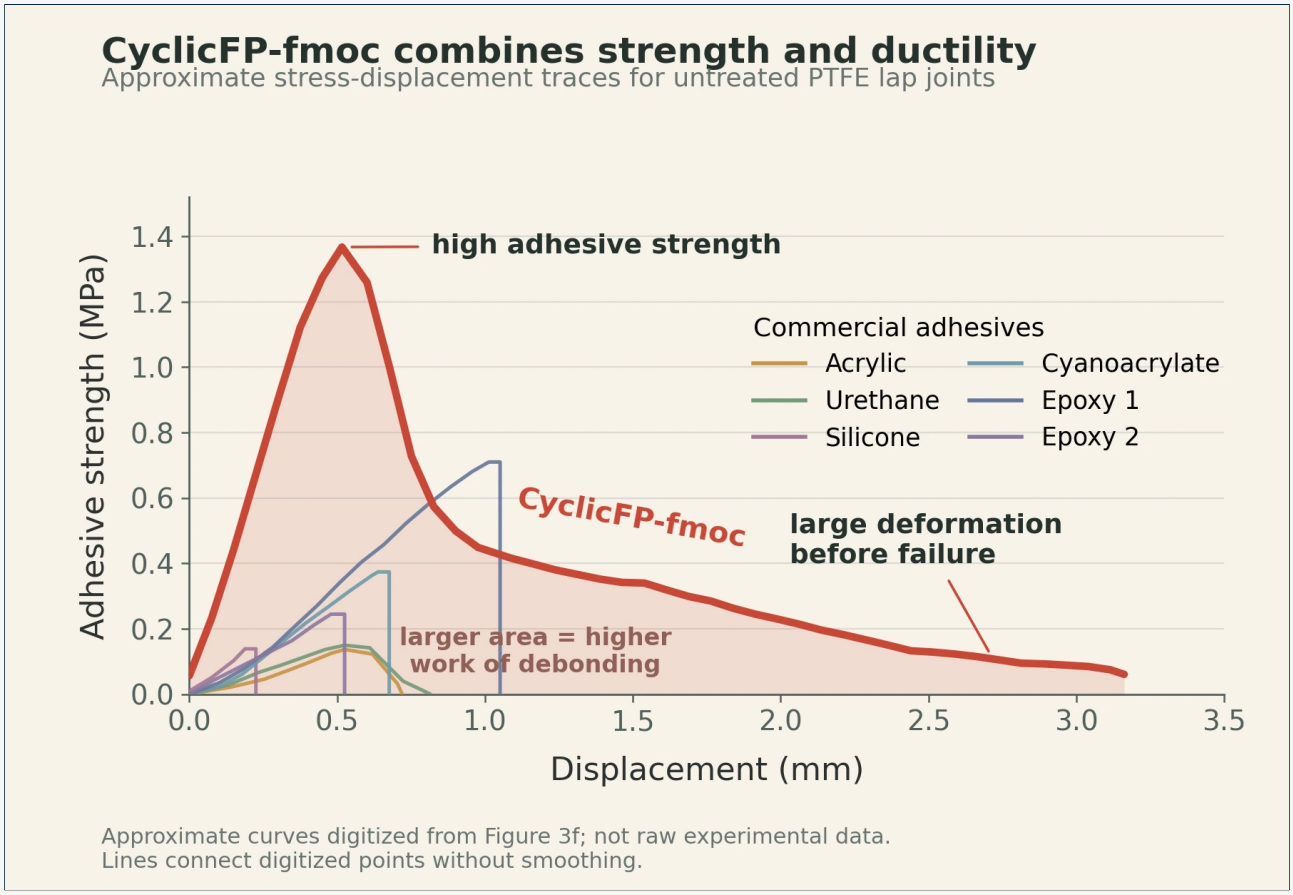
وظلت القيمة مشابهة بعد التخزين. بعد 30 يوماً في الظروف المحيطة، بلغت قوة الالتصاق **3.1 ± 2.0 MPa**. وبعد فصل الألواح بالقوة، وإعادة تراكبها وتسخينها، بلغت القوة **2.1 ± 2.0 MPa**. وحتى بعد تكرار هذه الدورة عشر مرات، بقيت القيمة نحو **3.1 ± 3.0 MPa**.

ولم يكن أفضل متغير هو الجزيء الرئيسي. فقد وصل جزيء قريب يحمل ثلاث مجموعات fmoc، **CyclicFP-fmoc3**، إلى **3.2 ± 2.0 MPa** على PTFE. ومع ذلك تركز الورقة كثيراً على CyclicFP-fmoc لأنه يجمع القوة والمطيلية والدليل الآلي وإمكانية الإزالة بالمسح.

المطيلية هي النصف الثاني من الادعاء

القوة وحدها لا تكفي. فالمادة اللاصقة الهشة يمكن أن تصل إلى إجهاد ذروة مرتفع ثم تفشل فجأة. والادعاء الأكثر تميزاً في الورقة هو أن CyclicFP-fmoc يتصرف أيضاً بصورة مطيلة.

في منحنيات القص بالتراكب، وصل CyclicFP-fmoc إلى أقصى إجهاد ثم بدأ يفقد الإجهاد تدريجياً مع استمرار الإزاحة. أما المواد اللاصقة التجارية المختبرة في الورقة فتصرفت بصورة أقرب إلى الوصلات الهشة: حدث الفشل بعد وقت قصير من بلوغ إجهاد الذروة.



يجمع CyclicFP-fmoc بين قمة إجهاد مرتفعة وذيل طويل بعد القمة؛ والمنطقة المظللة دليل تحريري على شغل الفصل الأكبر. المنحنيات تقريبية ورُقمنت من الشكل 3f؛ وليست بيانات تجريبية خاماً.

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS ,2026 Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 0.4

قدّر المؤلفون المساحة تحت منحنى الإجهاد-الإزاحة بوصفها شغل الفصل. أعطى CyclicFP-fmoc **1300 N/m** على PTFE. أما المواد اللاصقة التجارية المختبرة فتراوحت بين **26** و**314 N/m**.

ويتوافق نمط الفشل مع هذا التفسير. فقد فشلت وصلات PTFE مع CyclicFP-fmoc فشلاً تماسكياً، أي داخل المادة اللاصقة نفسها. وهذا يعني أن المادة اللاصقة استطاعت تبديد الطاقة عبر التشوه داخلياً، بينما بقيت واجهة PTFE أقوى من طبقة المادة اللاصقة المجمية في هذه الاختبارات.

وتضيف تجارب استرخاء الإجهاد مقياساً زمنياً جزيئياً. عند 20 °C كان زمن الاسترخاء المميز **60 ms**، وأعطى تحليل أرهينيوس طاقة تنشيط قدرها **8.33 kJ/mol**. وبعبارات بسيطة، تستطيع طبقة المادة اللاصقة إعادة ترتيب نفسها بسرعة كافية لتخفيف تركّز مفاجئ للإجهاد بدلاً من التصرف كجسم هش ثابت.

لماذا يعتقد المؤلفون أن الفلور مهم؟

يتكون PTFE من روابط كربون-فلور. ويحمل CyclicFP-fmoc مجموعات إيثر تاجي مفلورة. ويرى المؤلفون أن **تفاعلات F-F** تساعد المادة اللاصقة على الارتباط بـPTFE، بينما تساعد تفاعلات أخرى طبقة المادة اللاصقة على التماسك والتشوه.

وتشير عدة تجارب ضابطة في هذا الاتجاه. فعندما استُبدلت ذرات الفلور في CyclicFP-fmoc بذرات هيدروجين، ارتبط المركب الناتج CyclicP-fmoc بـPTFE بصورة أضعف بكثير، بنحو **1.0 ± 0.0 MPa**. ووصل فوسفات إيثر مفلور خطي، AcyclicFP-fmoc، إلى **3.0 ± 1.0 MPa** فقط. كما كان أداء المتغيرات التي تفتقر إلى وحدات التراص π أو الروابط الهيدروجينية أسوأ.

ثم تستخدم الورقة التحليل الطيفي والبنية البلورية لدعم صورة التفاعلات. ففي بلورة CyclicFP-fmoc، تقع ذرات الفلور في الجزيئات المتجاورة على مسافات **49.2 إلى 91.2 أنغستروم**، وهي أقصر من مجموع نصفَي قطر فان دير فالس لذرتي فلور والبالغ **94.2 أنغستروم**. كما يدعم FT-IR وNMR المتغير مع درجة الحرارة وجود الروابط الهيدروجينية وتفاعلات F-F وتراص π-π في المادة اللاصقة غير المتبلورة.

والدليل الأكثر مباشرة بالنسبة إلى PTFE يأتي من أطياف **NMR MAS 19F** بالحالة الصلبة، التي تتغير عندما يُخلط CyclicFP-fmoc مع جسيمات PTFE النانوية أو صفائح PTFE الرقيقة. ولا ينتج الضابط غير المفلور الانزياح نفسه. وهذا دليل، لا مجرد رسم تصميمي، على أن الأجزاء المفلورة من المادة اللاصقة تتفاعل مع PTFE.

ومع ذلك، لا ينبغي اختزال النتيجة في عبارة «روابط F-F تحل مشكلة PTFE». فنموذج الورقة نفسه أكثر تركيباً: تساعد التفاعلات البينية F-F على الالتصاق بـPTFE، بينما تساهم الروابط الهيدروجينية وتراص π-π في التماسك والمطيلية داخل المادة اللاصقة.

الإزالة بالمسح حقيقية، لكنها محدودة النطاق

نتيجة الإزالة هي الجانب العملي الأكثر جذباً. فقد غسل المؤلفون ألواح PTFE المفصولة بالإيثانول وأبلغوا عن إزالة كاملة لـCyclicFP-fmoc من دون بقايا في عرضهم. كما استعادوا المادة اللاصقة وأعادوا استخدامها مرات عدة، مع الحفاظ على قوة التصاق تقارب **2.1 ± 1.0 MPa** في اختبارات إعادة الاستخدام.

وهذا مهم لأن المواد اللاصقة القوية التقليدية غالباً ما يصعب إزالتها بصورة نظيفة. فمادة لاصقة تمسك PTFE ثم يمكن غسلها لاحقاً قد تكون مفيدة في الإصلاح والتفكيك وإعادة الاستخدام.

لكن الحدود مهمة. تختبر الورقة عينات مضبوطة، لا كل سطح صناعي ملوث أو وصلة متقادمة أو تعرض للمذيبات أو حالة شيخوخة طويلة الأمد. كما أن المسح بالإيثانول على ألواح PTFE ليس مساوياً لإثبات عملية إعادة تدوير كاملة لتجميعات مصنوعة من مواد متعددة.

وتقول الورقة أيضاً إن CyclicFP-fmoc ليس من مواد PFAS «الكيميائية الأبدية». ولا ينبغي توسيع هذا القول ليصبح تقييماً كاملاً للمخاطر البيئية. فالثبات والسمية وحجم التصنيع ومسارات الانبعاث والتنظيم أسئلة منفصلة.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة؟

- إنها لا تعرض منتجاً لاصقاً جاهزاً للسوق.
- إنها لا تثبت أن PTFE يمكن الآن لصقه بصورة موثوقة في كل بيئة صناعية من دون تحضير السطح.
- إنها لا تُظهر أن الإزالة بالإيثانول تعمل بالكفاءة نفسها على كل ركيزة أو حالة سطح أو وصلة متقادمة.
- إنها لا تثبت أن تفاعلات F-F وحدها تفسر الالتصاق. آلية الورقة تجمع بين F-F والروابط الهيدروجينية وتراص π-π.
- إنها لا تعرض سير عمل كاملاً لإعادة تدوير البلاستيك.
- إنها لا تثبت ملفاً بيئياً أو سمياً كاملاً لسلامة الجزيئات اللاصقة.
- وهي لا تعني أن المواد اللاصقة التجارية أسوأ عموماً. المقارنات خاصة بالمواد وإعداد القص بالتراكب على PTFE المستخدم في هذه الورقة.

ما مدى قوة النتيجة؟

بالنسبة إلى ورقة مواد مخبرية، النتيجة قوية لأن المؤلفين يفعلون أكثر من مجرد الإبلاغ عن رقم مرتفع واحد. فهم يختبرون القوة والمطيلية والمتانة خلال 30 يوماً، وتحمل الماء، وإعادة الالتصاق المتكرر، والإزالة بالإيثانول، ومتغيرات جزيئية، وأدلة طيفية على التفاعلات المقترحة.

أكثر ما يقنع هو الجمع بين نمط الفشل والضوابط. لو أن واجهة PTFE فشلت أولاً لكان الادعاء أضعف. لكن الوصلة تفشل داخل طبقة المادة اللاصقة. وعندما تُزال البنية الحلقية المفلورة أو تُغيّر، تنخفض قوة الالتصاق بـPTFE بشدة.

الأسئلة المتبقية تتعلق بالمقياس وحالة الاستخدام. اختبارات القص بالتراكب معيارية ومفيدة، لكن الوصلات الواقعية تتعرض للتقشير والصدمات والتعب والتلوث ودورات الحرارة ومواد مختلطة. والجزيء الذي يعمل بصورة ممتازة بين ألواح مخبرية مضبوطة ما زال بحاجة إلى أن يصبح تركيبة وعملية ومجموعة بيانات متانة قبل أن يتحول إلى مادة لاصقة هندسية.

لماذا يهم هذا؟

يقع PTFE عند حد محرج في علم المواد. فخمولُه هو الخاصية التي تجعله قيماً، والخاصية نفسها تجعل دمجه في تجميعات قابلة للإصلاح أو إعادة التدوير أمراً صعباً.

تقدم هذه الورقة مساراً نوعياً كيميائياً بدلاً من الحلول العنيفة. فبدلاً من تخشين سطح PTFE أو مهاجمته كيميائياً، تصمم جزيئاً صغيراً يستطيع التفاعل مع ذلك السطح مع الحفاظ على طبقة لاصقة مطيلة وقابلة للعكس.

إذا أمكن تعميم هذا المنطق التصميمي، فقد يساعد على تطوير مواد لاصقة أسهل في الإزالة وإعادة الاستخدام من دون التضحية بكل الأداء الميكانيكي. وهذا هو الوعد الحقيقي: ليس جزيئاً واحداً كغراء نهائي، بل استراتيجية جزيئية لتحقيق التصاق قوي ومطيل وقابل للفصل.

الخلاصة الواضحة

أبلغ Kikkawa وGoswami وزملاؤهما عن جزيئات صغيرة من فوسفات إيثر تاجي مفلور بوصفها مواد لاصقة لـPTFE وركائز أخرى. ربط الجزيء الرئيسي، CyclicFP-fmoc، ألواح PTFE غير المعالجة بقوة **3.1 ± 1.0 MPa** في اختبارات القص بالتراكب، وفشل تماسكياً داخل المادة اللاصقة لا عند واجهة PTFE، وأظهر شغل فصل قدره **1300 N/m**، وحافظ على الأداء بعد التخزين وإعادة الالتصاق المتكرر، ويمكن إزالته من ألواح PTFE بالغسل بالإيثانول. ووصل متغير قريب إلى **3.2 ± 2.0 MPa**. تدعم الأطياف والجزيئات الضابطة آلية تساعد فيها تفاعلات F-F على واجهة PTFE، بينما تساعد الروابط الهيدروجينية وتراص π-π طبقة المادة اللاصقة على تبديد الإجهاد. النتيجة عرض مخبري واعد لالتصاق قوي ومطيل وقابل للمسح على PTFE، لكنها ليست بعد غراءً تجارياً، ولا حلاً عاماً لإعادة التدوير، ولا تقييماً بيئياً كاملاً للسلامة.

المصادر

Kikkawa, et al., Small-Molecule Adhesives with Strong and Ductile Adhesion to PTFE, Yet Easy Wipe-Off Removal, Journal of the American Chemical Society, 148, 29138-29145 (2026). https://doi.org/10.1021/jacs.6c07886