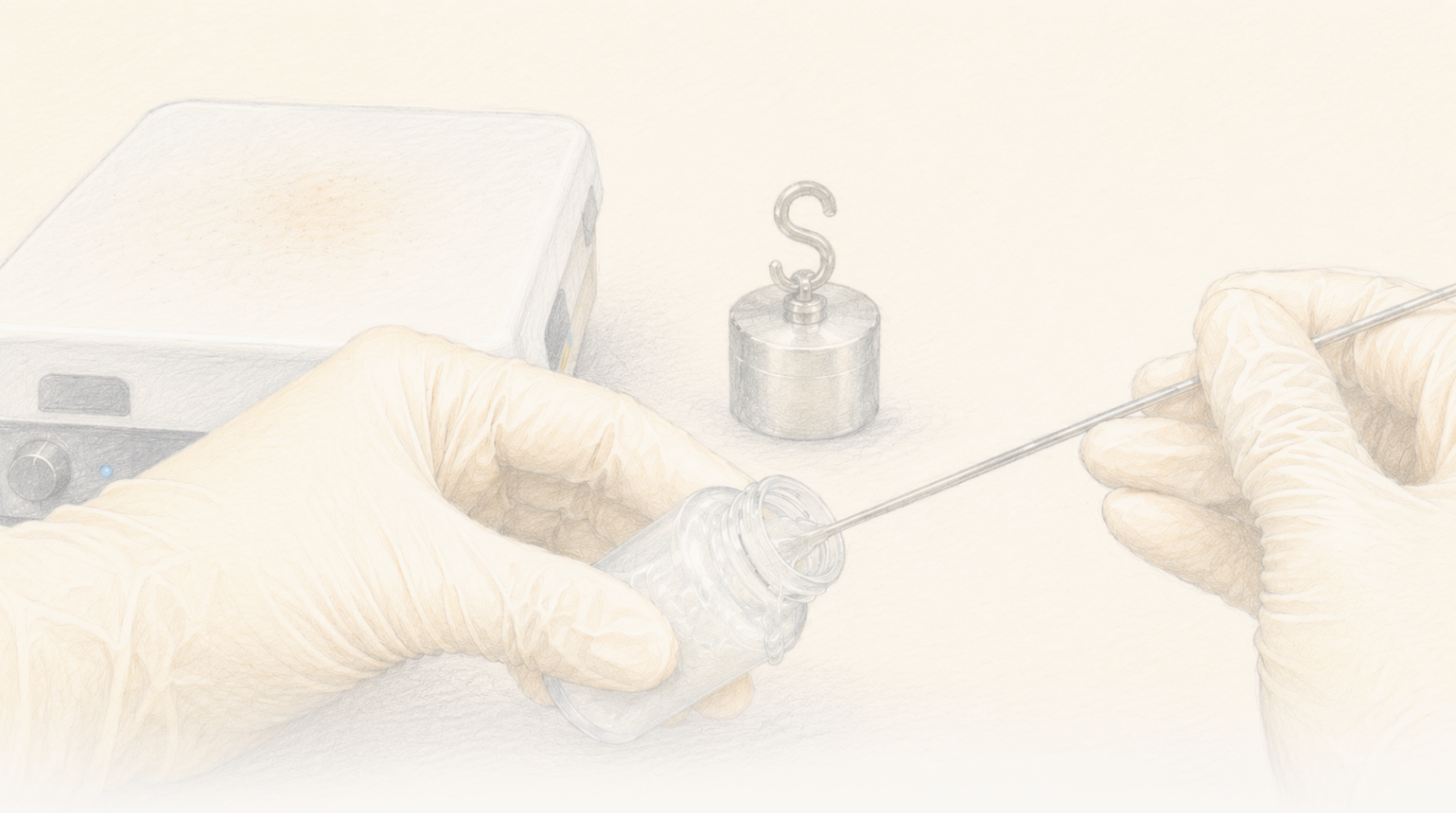


The Clean Paper

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

Ein kleines Molekül verklebte unbehandeltes PTFE und ließ sich anschließend mit Ethanol abwaschen

Eine JACS-Arbeit berichtet über Fluor-Kronenetherphosphat-Klebstoffe, die notorisch inertes PTFE in Labor-Überlappscherversuchen verbinden und dennoch durch Waschen mit Ethanol entfernbar bleiben. CyclicFP-fmoc erreichte auf unbehandeltem PTFE 1,3 MPa mit duktil-kohäsivem Versagen, eine verwandte Variante 2,3 MPa. Spektroskopische Befunde stützen einen Mechanismus aus Fluor-Fluor-Wechselwirkungen an PTFE sowie Wasserstoffbrücken und Pi-Stapelung im Klebstoff. Es ist ein vielversprechendes Materialergebnis, noch kein kommerzieller Klebstoff, keine universelle Recyclinglösung und keine vollständige Umwelt- und Sicherheitsbewertung.

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: 10.1021/jacs.6c07886

PTFE lässt sich aus gutem Grund schwer verkleben

Polytetrafluorethylen, besser bekannt als PTFE und unter Handelsnamen wie Teflon verkauft, ist unter anderem deshalb nützlich, weil es kaum wechselwirken will. Seine Oberflächenenergie ist niedrig. Viele Flüssigkeiten perlen darauf ab. Viele Klebstoffe versagen darauf, sofern die Oberfläche nicht geätzt, aufgeraut, plasmabehandelt oder mit einem Spezialprimer versehen wird.

Diese Widerstandsfähigkeit ist ausgezeichnet für Antihaftbeschichtungen und chemisch inerte Bauteile. Sie wird zum Problem, wenn Ingenieure PTFE mit einem anderen Teil verbinden möchten, ohne die Oberfläche dauerhaft zu beschädigen.

Eine Arbeit im Journal of the American Chemical Society berichtet über einen niedermolekularen Klebstoff, der dieses Problem aus ungewöhnlicher Richtung angeht. Kohei Kikkawa, Abir Goswami und Kollegen beschreiben Fluor-Kronenetherphosphat-Moleküle, die stark an unbehandeltem PTFE haften, sich vor dem Versagen duktil verformen und anschließend durch Waschen mit Ethanol von den PTFE-Platten entfernt werden können.

Das Leitmolekül heißt **CyclicFP-fmoc**. In Überlappscherversuchen hielt es unbehandelte PTFE-Platten mit einer Klebfestigkeit von **1,3 ± 0,1 MPa** und einer Ablösearbeit von **1300 N/m** zusammen. Da 1 MPa einem Newton pro Quadratmillimeter entspricht, ist die gemessene Spitzenspannung von 1,3 MPa derselbe Druck wie ungefähr das Gewicht eines 130-Gramm-Apfels auf jedem Quadratmillimeter. Das ist eine Analogie pro Flächeneinheit, nicht die Kraft oder Kontaktgeometrie des Prüfkörpers. Die angegebene Ablösearbeit von 1300 N/m entspricht 1300 Joule Trennenergie pro Quadratmeter. Für eine direkte visuelle Demonstration – nicht als technische Tragfähigkeitsangabe – zeigt die Arbeit eine Verbindung von 7 cm^2, die ein 8-Kilogramm-Gewicht trägt. Die Verbindung versagte innerhalb der Klebstoffschicht, nicht an der PTFE-Grenzfläche. Das ist wichtig: Die Grenzfläche war im Test nicht der Schwachpunkt.

Bleistiftdarstellung auf Grundlage der Fotografie in der Arbeit, auf der ein Klebestreifen aufgehängte Gewichte trägt (Abbildung 2, links). Sie ist weder das Originalfoto noch eine maßstabsgetreue Zeichnung oder ein technisches Belastungsdiagramm.

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

Das Ergebnis bedeutet nicht: „Das PTFE-Problem ist gelöst." Es ist ein kontrolliertes materialwissenschaftliches Laborergebnis. Doch es zeigt sauber eine schwierige Kombination: starke Haftung, duktiles Versagen und abwischbare Entfernung von einer Oberfläche, die für ihre Haftungsresistenz bekannt ist.

Warum gewöhnliche Festigkeit und leichte Entfernung einander entgegenstehen

Klebstoffe schließen gewöhnlich einen Kompromiss. Starre, vernetzte Polymerkleber können stark sein, versagen aber oft plötzlich und lassen sich schwer sauber entfernen. Weichere, klebebandartige Systeme können sich dehnen und Energie dissipieren, geben aber meist bei der Festigkeit nach.

Der Zielkonflikt ist molekular. Festigkeit verlangt effiziente Spannungsübertragung. Duktilität verlangt Bewegung, Umordnung und Energiedissipation. Leichte Entfernung verlangt Bindungen,

die gelöst werden können, ohne das Substrat zu zerstören. Diese Anforderungen ziehen in unterschiedliche Richtungen.

Niedermolekulare Klebstoffe sind attraktiv, weil sie prinzipiell entfernbar und recycelbar sein können. Sie bilden nicht die langen, verschlungenen Polymernetzwerke, die viele konventionelle Kleber zäh machen. Das ist zugleich ihre Schwäche: Ohne Verhakung liefern kleine Moleküle gewöhnlich nur schwer duktile Haftung mit hoher Festigkeit.

Die JACS-Arbeit versucht, Polymerverhakung durch einen Stapel reversibler nichtkovalenter Wechselwirkungen zu ersetzen. Das Molekül kombiniert einen fluorierten Kronenetherphosphat-Bereich mit einer urethangebundenen Fmoc-Gruppe. Vereinfacht gesagt kann sein fluorierter Ring mit der fluorreichen PTFE-Oberfläche wechselwirken, seine Urethangruppen können Wasserstoffbrücken zu benachbarten Klebstoffmolekülen bilden, und seine flachen Fluorenylgruppen können übereinanderstapeln. Das Designziel ist keine magische Einzelbindung, sondern ein Satz schwacher, reversibler Wechselwirkungen, die zusammenarbeiten können:

- Fluor-Fluor-Wechselwirkungen nahe PTFE;
- Wasserstoffbrücken zwischen Klebstoffmolekülen;
- Pi-Pi-Stapelung zwischen Fluorenylgruppen;
- und genügend molekulare Beweglichkeit, um Spannung abzubauen, statt sofort zu reißen.

Was der zentrale PTFE-Test zeigte

Die Autoren brachten CyclicFP-fmoc zwischen PTFE-Platten ein, die weder oberflächenbehandelt noch gereinigt worden waren, erwärmten den Klebstoff und ließen die Platten vor dem Test zehn Minuten bei Raumtemperatur stehen.

Für quantitative Prüfungen verwendeten sie Überlappschub. Mit CyclicFP-fmoc verklebte PTFE-Platten erreichten **1,3 ± 0,1 MPa** Zugspannung, angegeben als Mittelwert ± Standardabweichung aus drei Messungen. Das Aufbringen des Klebstoffs bei ungefähr **50 °C** mit einem Haartrockner ergab einen ähnlichen Wert von **1,1 ± 0,1 MPa**, statt ausschließlich ein Schmelzen bei hoher Temperatur zu erfordern.

Die Autoren verglichen diese Werte mit kommerziellen Epoxid-, Acryl-, Silikon- und Urethanklebstoffen im selben PTFE-Überlappscherversuch. Diese Kontrollen erreichten ungefähr **0,1 bis 0,7 MPa**, gegenüber **1,3 ± 0,1 MPa** für CyclicFP-fmoc. Dieser Vergleich auf demselben Substrat mit derselben Methode ist informativer, als MPa-Werte verschiedener Materialien und Prüfgeometrien in eine gemeinsame Rangliste zu setzen.

Der Wert blieb nach Lagerung ähnlich. Nach 30 Tagen unter Umgebungsbedingungen betrug die Klebfestigkeit **1,3 ± 0,2 MPa**. Nachdem die Platten gewaltsam getrennt, wieder überlappt und erneut erwärmt worden waren, lag sie bei **1,2 ± 0,2 MPa**. Selbst nach zehn Wiederholungen dieses Zyklus betrug sie noch ungefähr **1,3 ± 0,3 MPa**.

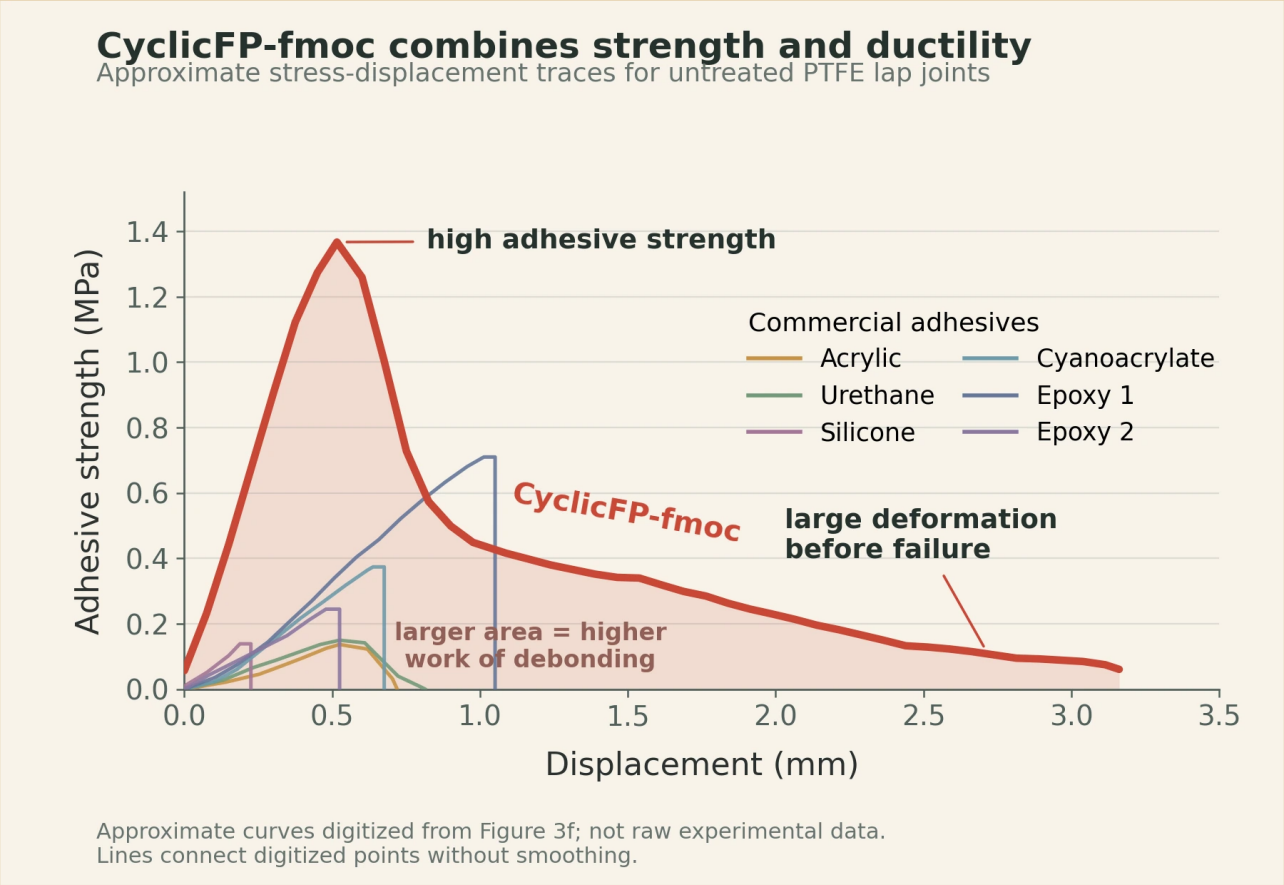
Die beste Variante war nicht das Leitmolekül. Ein verwandtes Molekül mit drei Fmoc-Gruppen,

CyclicFP-fmoc3, erreichte auf PTFE **2,3 ± 0,2 MPa**. Die Arbeit konzentriert sich dennoch stark auf CyclicFP-fmoc, weil es die vollständige Kombination aus Festigkeit, Duktilität, mechanistischer Evidenz und abwaschbarer Entfernung bietet.

Duktilität ist die andere Hälfte der Aussage

Festigkeit allein würde nicht genügen. Ein spröder Klebstoff kann eine hohe Spitzenspannung erreichen und anschließend plötzlich versagen. Die markantere Behauptung der Arbeit lautet, dass sich CyclicFP-fmoc zusätzlich duktil verhält.

In den Überlappschubkurven erreichte CyclicFP-fmoc seine maximale Spannung und verlor anschließend allmählich Spannung, während die Verschiebung weiter zunahm. Die in der Arbeit getesteten kommerziellen Klebstoffe verhielten sich eher wie spröde Verbindungen: Das Versagen folgte kurz nach ihrer Spitzenspannung.



CyclicFP-fmoc verbindet eine hohe Spannungsspitze mit einem langen Nachlauf nach dem Maximum; die schattierte Fläche ist eine redaktionelle Orientierung für seine größere Ablösearbeit. Die ungefähren Kurven wurden aus Abbildung 3f digitalisiert; es handelt sich nicht um experimentelle Rohdaten.

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS 2026, Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 4.0

Die Autoren quantifizierten die Fläche unter dieser Spannungs-Verschiebungs-Kurve als Ablösear-

beit. CyclicFP-fmoc erreichte auf PTFE **1300 N/m**. Die getesteten kommerziellen Klebstoffe lagen zwischen **26 und 314 N/m**.

Die Versagensart passt zu dieser Interpretation. PTFE-Verbindungen mit CyclicFP-fmoc versagten kohäsiv, also innerhalb des Klebstoffs. Das bedeutet, dass der Klebstoff Energie durch innere Verformung dissipieren konnte, während die PTFE-Grenzfläche in diesen Tests stärker blieb als die Klebstoffschicht selbst.

Spannungsrelaxationsversuche ergänzen die molekulare Zeitskala. Bei 20 °C betrug die charakteristische Relaxationszeit **60 ms**, und die Arrhenius-Analyse ergab eine Aktivierungsenergie von **33,8 kJ/mol**. Vereinfacht gesagt kann sich die Klebstoffschicht schnell genug umordnen, um eine plötzliche Spannungskonzentration abzumildern, statt sich wie ein statischer spröder Feststoff zu verhalten.

Warum die Autoren Fluor für wichtig halten

PTFE besteht aus Kohlenstoff-Fluor-Bindungen. CyclicFP-fmoc trägt fluorierte Kronenethergruppen. Die Autoren argumentieren, dass **F-F-Wechselwirkungen** dem Klebstoff helfen, an PTFE zu binden, während andere Wechselwirkungen die Klebstoffschicht zusammenhalten und verformbar machen.

Mehrere Kontrollexperimente weisen in diese Richtung. Wurden die Fluoratome in CyclicFP-fmoc durch Wasserstoff ersetzt, verband das resultierende CyclicP-fmoc PTFE deutlich schwächer, ungefähr mit **0,1 ± 0,0 MPa**. Ein linearer Fluoretherphosphat-Klebstoff, AcyclicFP-fmoc, erreichte nur **0,3 ± 0,1 MPa**. Varianten ohne Pi-Stapelungs- oder Wasserstoffbrückeneinheiten schnitten ebenfalls schlechter ab.

Anschließend stützt die Arbeit das Wechselwirkungsbild mit Spektroskopie und Kristallstruktur. In einem CyclicFP-fmoc-Kristall liegen Fluoratome benachbarter Moleküle **2,49 bis 2,91 Ångström** auseinander, also unter der **2,94-Ångström**-Van-der-Waals-Summe zweier Fluoratome. FT-IR und temperaturabhängige NMR stützen Wasserstoffbrücken, F-F-Wechselwirkungen und Pi-Pi-Stapelung im amorphen Klebstoff.

Am unmittelbarsten für PTFE verschieben sich Festkörper-**19F-MAS-NMR**-Spektren, wenn CyclicFP-fmoc mit PTFE-Nanopartikeln oder dünnen PTFE-Folien gemischt wird. Die nicht fluorierte Kontrolle erzeugt nicht dieselbe Verschiebung. Das ist Evidenz und nicht nur eine Designskizze dafür, dass die fluorierten Teile des Klebstoffs mit PTFE wechselwirken.

Dennoch sollte dies nicht zu „F-F-Bindungen lösen PTFE“ vereinfacht werden. Das eigene Modell der Arbeit ist vielschichtiger: Grenzflächennahe F-F-Wechselwirkungen helfen bei der Haftung an PTFE, während Wasserstoffbrücken und Pi-Pi-Stapelung zur Kohäsion und Duktilität im Klebstoff beitragen.

Der Klebstoff lässt sich tatsächlich abwaschen – allerdings nur unter begrenzten Bedingungen

Das Entfernungsergebnis ist der praktische Aufhänger. Die Autoren wuschen getrennte PTFE-Platten mit Ethanol und berichten in ihrer Demonstration eine vollständige Entfernung von CyclicFP-fmoc ohne Rückstände. Sie gewannen den Klebstoff außerdem zurück und verwendeten ihn wiederholt, wobei die Klebfestigkeit in Wiederverwendungsversuchen bei ungefähr **1,2 ± 0,1 MPa** blieb.

Das ist wichtig, weil herkömmliche starke Klebstoffe oft schwer sauber zu entfernen sind. Ein Klebstoff, der PTFE halten und später abgewaschen werden kann, wäre für Reparatur, Demontage und Wiederverwendung nützlich.

Doch die Grenze zählt. Die Arbeit testet kontrollierte Proben, nicht jede verschmutzte Industrieoberfläche, gealterte Verbindung, Lösungsmittelbelastung oder Langzeitalterung. Das Abwaschen mit Ethanol auf PTFE-Platten ist nicht gleichbedeutend mit einem vollständigen Recyclingverfahren für Baugruppen aus vielen Materialien.

Die Arbeit erklärt außerdem, CyclicFP-fmoc sei keine PFAS-„Ewigkeitschemikalie“. Diese Aussage darf nicht zu einer vollständigen Umweltrisikobewertung erweitert werden. Persistenz, Toxizität, Herstellung im Maßstab, Freisetzungspfade und Regulierung sind getrennte Fragen.

Was dies nicht beweist

- Es zeigt **kein** marktreifes Klebstoffprodukt.
- Es beweist **nicht**, dass sich PTFE nun in jeder industriellen Umgebung ohne Oberflächenvorbereitung zuverlässig verkleben lässt.
- Es zeigt **nicht**, dass die Entfernung mit Ethanol auf jedem Substrat, jeder Oberflächenbedingung oder jeder gealterten Verbindung gleich gut funktioniert.
- Es beweist **nicht**, dass F-F-Wechselwirkungen allein die Haftung erklären. Der Mechanismus der Arbeit verbindet F-F-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrücken und Pi-Pi-Stapelung.
- Es zeigt **keinen** vollständigen Kunststoffrecyclingprozess.
- Es etabliert **kein** vollständiges Umwelt- oder toxikologisches Sicherheitsprofil der Klebstoffmoleküle.
- Es bedeutet **nicht**, dass kommerzielle Klebstoffe allgemein schlechter sind. Die Vergleiche gelten spezifisch für die Materialien und die in dieser Arbeit getestete PTFE-Überlappschubgeometrie.

Wie belastbar ist das Ergebnis?

Für eine materialwissenschaftliche Laborarbeit ist das Ergebnis stark, weil die Autoren mehr als eine einzelne hohe Zahl berichten. Sie testen Festigkeit, Duktilität, Haltbarkeit über 30 Tage, Wassertoleranz, wiederholtes Wiederverkleben, Ethanolentfernung, molekulare Varianten und spektroskopis-

che Evidenz für die vorgeschlagenen Wechselwirkungen.

Am überzeugendsten ist die Kombination aus Versagensart und Kontrollen. Hätte die PTFE-Grenzfläche zuerst versagt, wäre die Behauptung schwächer. Stattdessen versagt die Verbindung innerhalb der Klebstoffschicht. Und wenn die fluorierte zyklische Struktur entfernt oder verändert wird, fällt die PTFE-Haftung stark ab.

Offen bleiben Maßstab und Anwendungsfall. Überlappscherversuche sind standardisiert und nützlich, doch reale Verbindungen erleben Schälkräfte, Stöße, Ermüdung, Verunreinigung, Temperaturzyklen und gemischte Materialien. Ein Molekül, das zwischen kontrollierten Laborplatten hervorragend funktioniert, muss noch zu einer Formulierung, einem Prozess und einem Haltbarkeitsdatensatz werden, bevor es ein technischer Klebstoff ist.

Warum es wichtig ist

PTFE liegt an einer schwierigen Materialgrenze. Seine Inertheit ist die Eigenschaft, die es wertvoll macht, und dieselbe Eigenschaft erschwert die Integration in reparierbare oder recycelbare Baugruppen.

Diese Arbeit bietet einen chemisch spezifischen statt brachialen Weg. Anstatt die PTFE-Oberfläche aufzurauen oder chemisch anzugreifen, entwirft sie ein kleines Molekül, das mit dieser Oberfläche wechselwirken und zugleich eine duktile, reversible Klebstoffschicht bilden kann.

Falls sich diese Designlogik verallgemeinern lässt, könnte sie helfen, leichter entfern- und wiederverwendbare Klebstoffe zu entwickeln, ohne die gesamte mechanische Leistung aufzugeben. Das ist das eigentliche Versprechen: nicht ein Molekül als fertiger Klebstoff, sondern eine molekulare Strategie für starke, duktile und lösbare Haftung.

Kurz zusammengefasst

Kikkawa, Goswami und Kollegen berichten über niedermolekulare Fluor-Kronenetherphosphate als Klebstoffe für PTFE und andere Substrate. Das Leitmolekül CyclicFP-fmoc verband unbehandelte PTFE-Platten in Überlappscherversuchen mit **1,3 ± 0,1 MPa**, versagte kohäsiv statt an der PTFE-Grenzfläche, zeigte eine Ablösearbeit von **1300 N/m**, behielt seine Leistung nach Lagerung und wiederholtem Wiederverkleben und ließ sich durch Waschen mit Ethanol von PTFE-Platten entfernen. Eine verwandte Variante erreichte **2,3 ± 0,2 MPa**. Spektroskopie und Kontrollmoleküle stützen einen Mechanismus, bei dem F-F-Wechselwirkungen an der PTFE-Grenzfläche helfen, während Wasserstoffbrücken und Pi-Pi-Stapelung der Klebstoffschicht beim Spannungsabbau helfen. Das Ergebnis ist eine vielversprechende Labordemonstration starker, duktiler und abwaschbarer PTFE-Haftung, noch kein kommerzieller Klebstoff, keine universelle Recyclinglösung und keine vollständige Umwelt- und Sicherheitsbewertung.

Quellen

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