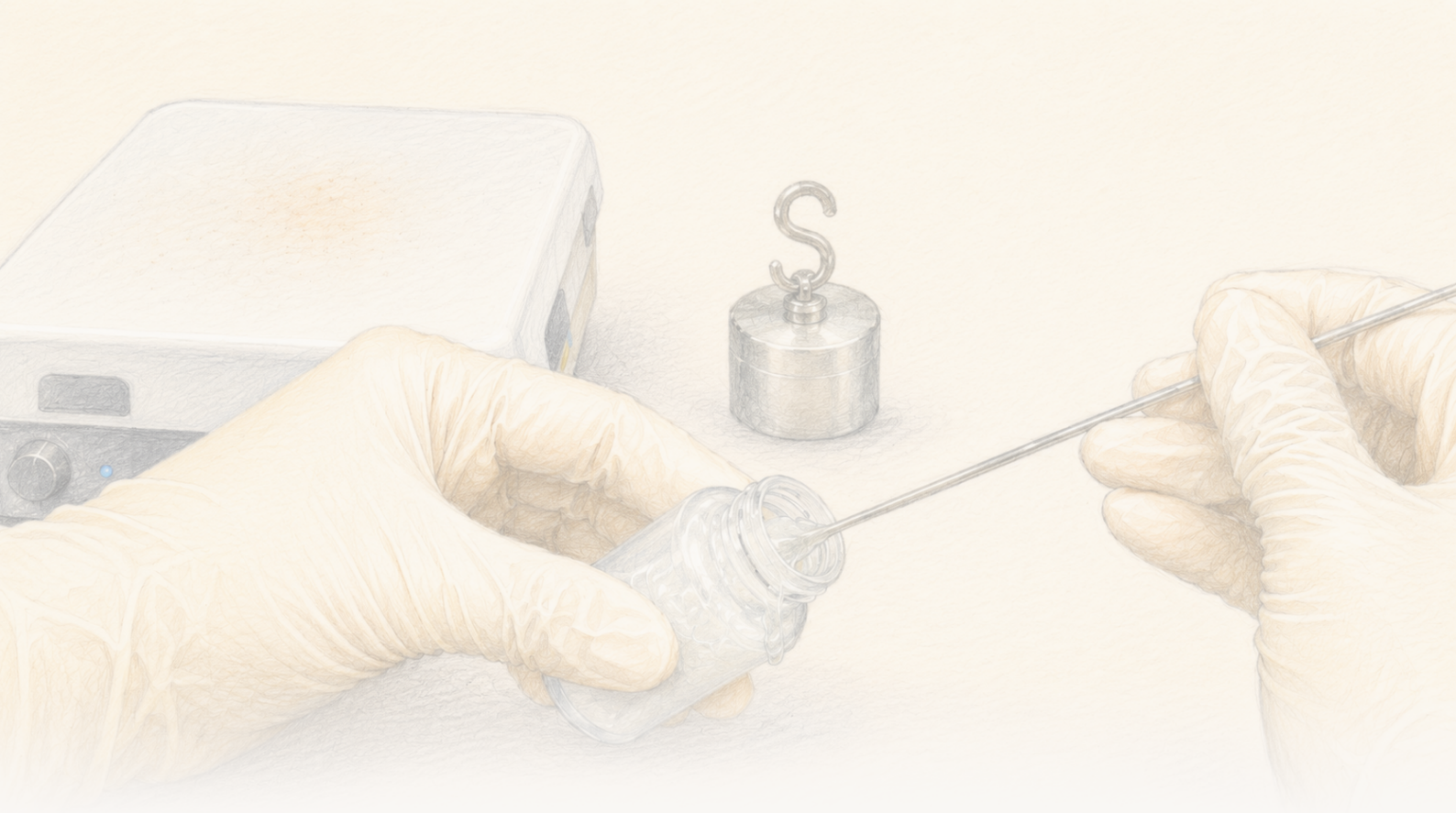


The Clean Paper

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

Une petite molécule a collé du PTFE non traité, puis s'est éliminée à l'éthanol

Un article de JACS décrit des adhésifs à base de phosphates de fluoro-éthers couronnes capables de coller du PTFE notoirement inerte lors d'essais de cisaillement à recouvrement en laboratoire, tout en restant éliminables par lavage à l'éthanol. CyclicFP-fmoc a atteint 1,3 MPa sur du PTFE non traité avec une rupture cohésive ductile, et une variante apparentée a atteint 2,3 MPa. Le mécanisme est étayé par des données spectroscopiques indiquant des interactions fluor-fluor à l'interface avec le PTFE, ainsi que des liaisons hydrogène et des empilements pi au sein de l'adhésif. C'est un résultat prometteur en science des matériaux, pas encore une colle commerciale, une solution universelle au recyclage ni une évaluation complète de la sécurité environnementale.

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

Le PTFE est difficile à coller pour une bonne raison

Le polytétrafluoroéthylène, mieux connu sous le sigle PTFE et commercialisé notamment sous le nom de Téflon, est utile en partie parce qu'il interagit très peu avec ce qui l'entoure. Son énergie de surface est faible. De nombreux liquides y forment des gouttes. Beaucoup de colles n'y adhèrent pas, sauf si la surface est attaquée chimiquement, rugosifiée, traitée au plasma ou associée à un primaire spécialisé.

Cette résistance est excellente pour les revêtements antiadhésifs et les pièces chimiquement inertes. Elle devient un problème lorsque des ingénieurs veulent assembler du PTFE à une autre pièce sans endommager définitivement sa surface.

Un article du Journal of the American Chemical Society s'attaque à ce problème par une voie inhabituelle, avec un adhésif constitué de petites molécules. Kohei Kikkawa, Abir Goswami et leurs collègues décrivent des phosphates de fluoro-éthers couronnes capables d'adhérer fortement à du PTFE non traité, de se déformer de manière ductile avant rupture, puis d'être retirés des plaques de PTFE par lavage à l'éthanol.

La molécule principale s'appelle **CyclicFP-fmoc**. Lors d'essais de cisaillement à recouvrement, elle a maintenu des plaques de PTFE non traité avec une résistance adhésive de **1,3 ± 0,1 MPa** et un travail de décohésion de **1 300 N/m**. Comme 1 MPa équivaut à 1 newton par millimètre carré, la contrainte maximale mesurée de 1,3 MPa correspond à peu près à la pression exercée par le poids d'une pomme de 130 grammes sur chaque millimètre carré. Il s'agit d'une analogie par unité de surface, pas de la force ni de la géométrie de contact de l'éprouvette. Le travail de décohésion rapporté, 1 300 N/m, équivaut à une énergie de séparation de 1 300 joules par mètre carré. Pour une démonstration visuelle directe — et non une spécification de charge d'ingénierie — l'article montre un joint de 7 cm^2 soutenant une masse de 8 kg. Le joint a cédé à l'intérieur de la couche adhésive, et non à l'interface avec le PTFE. C'est important : cela signifie que, dans cet essai, l'interface n'était pas le point faible.

Rendu au crayon inspiré de la photographie de l'article montrant la bande adhésive soutenant des poids suspendus — figure 2, à gauche. Il ne s'agit ni de la photographie originale, ni d'un dessin à l'échelle, ni d'un schéma de charge d'ingénierie.

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

Le résultat ne signifie pas que « le problème du PTFE est résolu ». Il s'agit d'un résultat contrôlé de science des matériaux en laboratoire. Mais il offre un exemple net d'une combinaison difficile : forte adhérence, rupture ductile et retrait par essuyage d'une surface célèbre pour résister à l'adhésion.

Pourquoi résistance et retrait facile s'opposent généralement

Les adhésifs reposent souvent sur un compromis. Les colles polymères rigides et réticulées peuvent être solides, mais elles cassent fréquemment de manière brutale et sont difficiles à enlever proprement. Les adhésifs plus souples, proches des rubans, peuvent s'étirer et dissiper de l'énergie, mais ils sacrifient généralement la résistance.

Ce compromis est moléculaire. La résistance exige un transfert efficace des contraintes. La ductilité exige du mouvement, des réarrangements et une dissipation d'énergie. Le retrait facile exige des

liaisons que l'on puisse rompre sans détruire le substrat. Ces besoins tirent dans des directions différentes.

Les adhésifs à petites molécules sont intéressants parce qu'ils peuvent, en principe, être retirés et recyclés. Ils ne forment pas les longs réseaux polymères enchevêtrés qui rendent beaucoup de colles conventionnelles tenaces. C'est aussi leur faiblesse : sans enchevêtrement, les petites molécules ont normalement du mal à produire une adhérence à la fois ductile et très résistante.

L'article de JACS cherche à remplacer l'enchevêtrement des polymères par un empilement d'interactions non covalentes réversibles. La molécule associe une région phosphate d'éther couronne fluoré à un groupe fmoc relié par un uréthane. En termes simples, son anneau fluoré peut interagir avec la surface du PTFE, riche en fluor ; ses groupes uréthane peuvent former des liaisons hydrogène avec les molécules adhésives voisines ; et ses groupes fluorényle plans peuvent s'empiler les uns sur les autres. L'objectif n'est pas une liaison magique unique, mais un ensemble d'interactions faibles et réversibles capables d'agir de concert :

- des interactions fluor-fluor à proximité du PTFE ;
- des liaisons hydrogène entre les molécules adhésives ;
- un empilement pi-pi entre les groupes fluorényle ;
- et une mobilité moléculaire suffisante pour relâcher les contraintes au lieu de fissurer immédiatement.

Ce qu'a montré le principal essai sur le PTFE

Les auteurs ont placé CyclicFP-fmoc entre des plaques de PTFE qui n'avaient été ni traitées en surface ni nettoyées, ont chauffé l'adhésif puis ont laissé les plaques à température ambiante pendant 10 minutes avant les essais.

Pour les mesures quantitatives, ils ont utilisé un essai de cisaillement à recouvrement. Les plaques de PTFE assemblées avec CyclicFP-fmoc ont atteint une contrainte de traction de **1,3 ± 0,1 MPa**, rapportée sous forme de moyenne ± écart-type pour trois mesures. L'application de l'adhésif à environ **50 °C** avec un sèche-cheveux a donné une valeur similaire, **1,1 ± 0,1 MPa**, sans nécessiter exclusivement une fusion à haute température.

Les auteurs ont comparé ces valeurs à celles d'adhésifs commerciaux époxy, acryliques, silicones et uréthanes dans le même montage de cisaillement à recouvrement sur PTFE. Ces témoins ont atteint environ **0,1 à 0,7 MPa**, contre **1,3 ± 0,1 MPa** pour CyclicFP-fmoc. Cette comparaison sur le même substrat et avec la même méthode est plus informative que de classer ensemble des valeurs en MPa provenant de matériaux et de géométries d'essai différents.

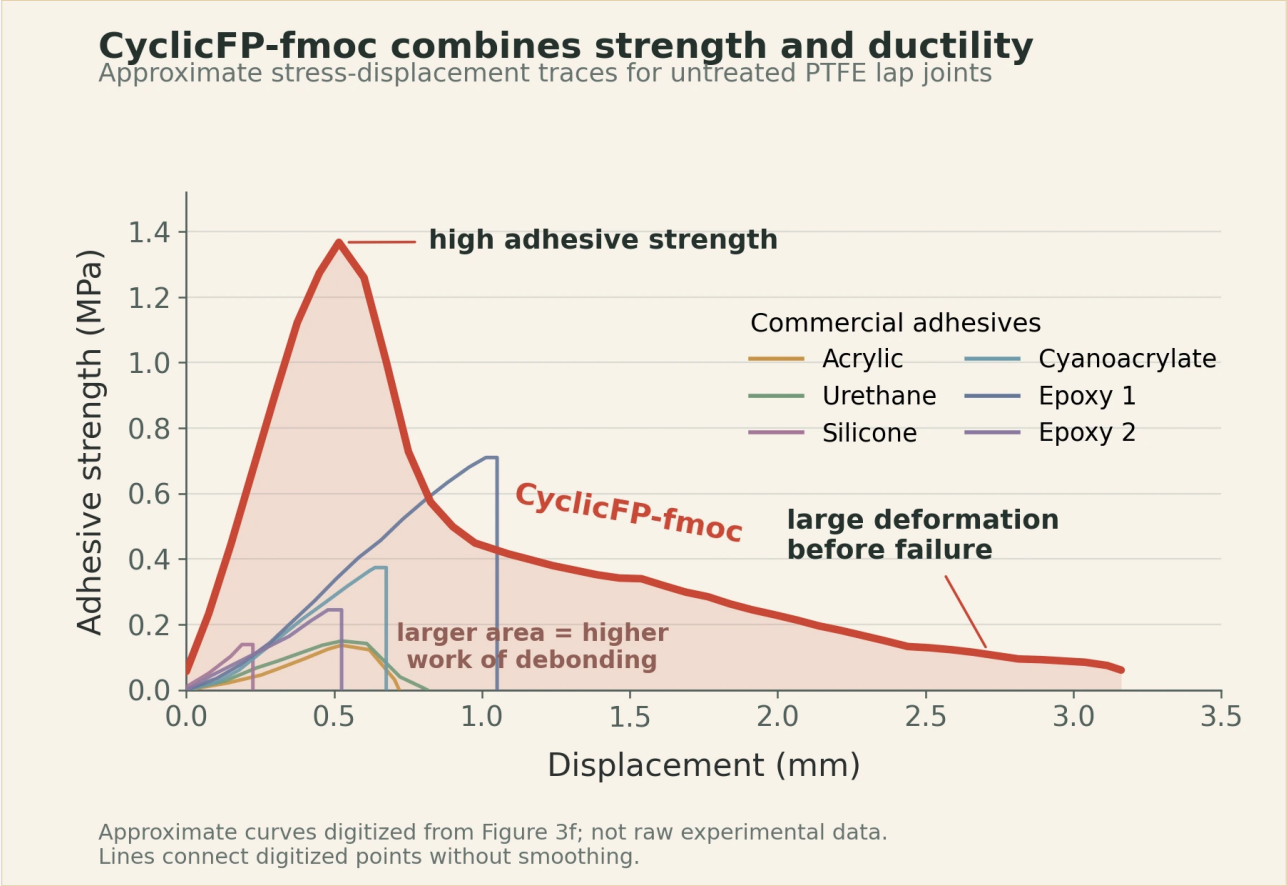
La valeur est restée similaire après stockage. Après 30 jours dans les conditions ambiantes, la résistance adhésive était de **1,3 ± 0,2 MPa**. Après séparation forcée des plaques, nouveau recouvrement et réchauffage, elle était de **1,2 ± 0,2 MPa**. Même après dix répétitions du cycle, elle restait d'environ **1,3 ± 0,3 MPa**.

La meilleure variante n'était pas la molécule principale. Une molécule apparentée portant trois groupes fmoc, **CyclicFP-fmoc3**, a atteint **2,3 ± 0,2 MPa** sur le PTFE. L'article se concentre néanmoins largement sur CyclicFP-fmoc, car elle réunit toute la combinaison recherchée : résistance, ductilité, éléments mécanistiques et retrait par essuyage.

La ductilité est l'autre moitié de l'affirmation

La résistance seule ne suffirait pas. Un adhésif cassant peut atteindre une contrainte maximale élevée puis rompre brutalement. L'affirmation la plus distinctive de l'article est que CyclicFP-fmoc présente aussi un comportement ductile.

Dans les courbes de cisaillement à recouvrement, CyclicFP-fmoc atteignait sa contrainte maximale puis perdait progressivement de la contrainte à mesure que le déplacement se poursuivait. Les adhésifs commerciaux testés dans l'article se comportaient davantage comme des joints cassants : la rupture survenait peu après leur contrainte maximale.



CyclicFP-fmoc associe un pic de contrainte élevé à une longue traîne après le maximum ; la zone ombrée est un guide éditorial illustrant son travail de décohésion supérieur. Courbes approximatives numérisées à partir de la figure 3f ; il ne s'agit pas des données expérimentales brutes.

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

Les auteurs ont quantifié l'aire sous cette courbe contrainte-déplacement sous forme de travail de décohésion. CyclicFP-fmoc a atteint **1 300 N/m** sur le PTFE. Les adhésifs commerciaux testés allaient de **26 à 314 N/m**.

Le mode de rupture correspond à cette interprétation. Les joints PTFE assemblés avec CyclicFP-fmoc ont rompu de manière cohésive, à l'intérieur de l'adhésif. Cela indique que l'adhésif pouvait dissiper de l'énergie en se déformant intérieurement, tandis que l'interface avec le PTFE restait plus résistante que le volume de la couche adhésive dans ces essais.

Les expériences de relaxation des contraintes apportent l'échelle de temps moléculaire. À 20 °C, le temps de relaxation caractéristique était de **60 ms**, et l'analyse d'Arrhenius donnait une énergie d'activation de **33,8 kJ/mol**. En termes simples, la couche adhésive peut se réarranger assez vite pour atténuer une concentration soudaine de contraintes, au lieu de se comporter comme un solide cassant et immobile.

Pourquoi les auteurs pensent que le fluor est important

Le PTFE est constitué de liaisons carbone-fluor. CyclicFP-fmoc porte des groupes éthers couronnes fluorés. Les auteurs avancent que des **interactions F-F** aident l'adhésif à se fixer au PTFE, tandis que d'autres interactions permettent à la couche adhésive de rester cohésive et de se déformer.

Plusieurs expériences témoins vont dans ce sens. Lorsque les atomes de fluor de CyclicFP-fmoc ont été remplacés par des atomes d'hydrogène, le composé obtenu, CyclicP-fmoc, a adhéré beaucoup plus faiblement au PTFE, autour de **0,1 ± 0,0 MPa**. Un phosphate de fluoro-éther linéaire, AcyclicFP-fmoc, n'a atteint que **0,3 ± 0,1 MPa**. Les variantes dépourvues d'unités d'empilement pi ou de liaison hydrogène se sont également révélées moins performantes.

L'article utilise ensuite la spectroscopie et la structure cristalline pour étayer ce tableau d'interactions. Dans un cristal de CyclicFP-fmoc, des atomes de fluor appartenant à des molécules voisines se trouvent à **2,49 à 2,91 ångströms** les uns des autres, une distance inférieure à la somme de van der Waals de **2,94 ångströms** pour deux atomes de fluor. La FT-IR et la RMN à température variable soutiennent la présence de liaisons hydrogène, d'interactions F-F et d'empilements pi-pi dans l'adhésif amorphe.

Plus directement pour le PTFE, les spectres de **RMN MAS du 19F à l'état solide** se décalent lorsque CyclicFP-fmoc est mélangé à des nanoparticules de PTFE ou à de fines feuilles de PTFE. Le témoin non fluoré ne produit pas le même déplacement. Il s'agit d'un élément expérimental — pas seulement d'un schéma de conception — montrant que les parties fluorées de l'adhésif interagissent avec le PTFE.

Il ne faudrait néanmoins pas simplifier cela en disant que « les liaisons F-F résolvent le problème du PTFE ». Le modèle proposé par l'article est plus stratifié : des interactions F-F interfaciales favorisent l'adhésion au PTFE, tandis que les liaisons hydrogène et les empilements pi-pi contribuent à la cohésion et à la ductilité au sein de l'adhésif.

Le retrait par essuyage est réel, mais circonscrit

Le résultat le plus accrocheur sur le plan pratique concerne le retrait. Les auteurs ont lavé à l'éthanol les plaques de PTFE séparées et rapportent, dans leur démonstration, une élimination complète de CyclicFP-fmoc sans résidu. Ils ont également récupéré et réutilisé l'adhésif à plusieurs reprises, en conservant une résistance d'environ **1,2 ± 0,1 MPa** lors des essais de réemploi.

C'est important, car les adhésifs conventionnels puissants sont souvent difficiles à retirer proprement. Une colle capable de maintenir du PTFE puis de s'éliminer par lavage pourrait être utile pour la réparation, le démontage et la réutilisation.

Mais les limites comptent. L'article teste des échantillons contrôlés, pas toutes les surfaces industrielles contaminées, tous les joints vieillis, toutes les expositions aux solvants ni toutes les conditions de vieillissement à long terme. Un retrait à l'éthanol sur des plaques de PTFE n'équivaut pas à la démonstration d'un procédé complet de recyclage pour des assemblages multimatériaux.

L'article affirme aussi que CyclicFP-fmoc n'est pas un « polluant éternel » de type PFAS. Cette phrase ne doit pas être étendue à une évaluation complète des risques environnementaux. La persistance, la toxicité, la fabrication à grande échelle, les voies de rejet et la réglementation sont des questions distinctes.

Ce que cela ne démontre pas

- Cela ne montre **pas** un produit adhésif prêt à être commercialisé.
- Cela ne prouve **pas** que le PTFE peut désormais être collé de manière fiable dans tous les contextes industriels sans préparation de surface.
- Cela ne montre **pas** que le retrait à l'éthanol fonctionne aussi bien sur tous les substrats, toutes les conditions de surface ou tous les joints vieillis.
- Cela ne prouve **pas** que les interactions F-F expliquent à elles seules l'adhésion. Le mécanisme proposé combine interactions F-F, liaisons hydrogène et empilements pi-pi.
- Cela ne montre **pas** un processus complet de recyclage des plastiques.
- Cela n'établit **pas** un profil complet de sécurité environnementale ou toxicologique pour les molécules adhésives.
- Cela ne signifie **pas** que les adhésifs commerciaux sont généralement moins bons. Les comparaisons sont propres aux matériaux et au montage de cisaillement à recouvrement sur PTFE testés dans cet article.

Quelle est la solidité du résultat ?

Pour un article de science des matériaux en laboratoire, le résultat est solide, car les auteurs ne se contentent pas d'un seul nombre élevé. Ils testent la résistance, la ductilité, la tenue après 30 jours,

la tolérance à l'eau, les réadhésions répétées, le retrait à l'éthanol, plusieurs variantes moléculaires et des éléments spectroscopiques appuyant les interactions proposées.

La combinaison la plus convaincante est celle du mode de rupture et des témoins. Si l'interface avec le PTFE avait rompu en premier, l'affirmation aurait été plus faible. Au contraire, le joint cède à l'intérieur de la couche adhésive. Et lorsque la structure cyclique fluorée est supprimée ou modifiée, l'adhésion au PTFE chute fortement.

Les questions restantes concernent l'échelle et le cas d'usage. Les essais de cisaillement à recouvrement sont normalisés et utiles, mais les joints réels subissent aussi pelage, chocs, fatigue, contamination, cycles de température et assemblages de matériaux différents. Une molécule qui fonctionne remarquablement entre des plaques contrôlées en laboratoire doit encore devenir une formulation, un procédé et un ensemble de données de durabilité avant de devenir un adhésif d'ingénierie.

Pourquoi c'est important

Le PTFE occupe une frontière délicate en science des matériaux. Son inertie est la propriété qui le rend précieux, et cette même propriété le rend difficile à intégrer dans des assemblages réparables ou recyclables.

Cet article propose une voie chimiquement ciblée plutôt qu'une approche brutale. Au lieu de rugosifier ou d'attaquer chimiquement la surface du PTFE, il conçoit une petite molécule capable d'interagir avec cette surface tout en maintenant une couche adhésive ductile et réversible.

Si cette logique de conception se généralise, elle pourrait aider à créer des adhésifs plus faciles à retirer et à réutiliser sans sacrifier toutes leurs performances mécaniques. Voilà la véritable promesse : non pas une molécule déjà prête à devenir une colle, mais une stratégie moléculaire pour obtenir une adhésion à la fois forte, ductile et désassemblable.

Résumé clair

Kikkawa, Goswami et leurs collègues décrivent des petites molécules de type phosphate de fluoroéther couronne comme adhésifs pour le PTFE et d'autres substrats. La molécule principale, CyclicFP-fmoc, a assemblé des plaques de PTFE non traité à **1,3 ± 0,1 MPa** lors d'essais de cisaillement à recouvrement, a rompu de manière cohésive plutôt qu'à l'interface avec le PTFE, a présenté un travail de décohésion de **1 300 N/m**, a conservé ses performances après stockage et réadhésions répétées, et pouvait être retirée des plaques de PTFE par lavage à l'éthanol. Une variante apparentée a atteint **2,3 ± 0,2 MPa**. La spectroscopie et les molécules témoins soutiennent un mécanisme où les interactions F-F favorisent l'interface avec le PTFE, tandis que les liaisons hydrogène et les empilements pi-pi aident la couche adhésive à dissiper les contraintes. Le résultat est une démonstration de laboratoire prometteuse d'une adhésion forte, ductile et éliminable par essuyage sur le PTFE, mais pas encore une colle commerciale, une solution universelle au recyclage ni une évaluation complète de la sécu-

rité environnementale.

Sources

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