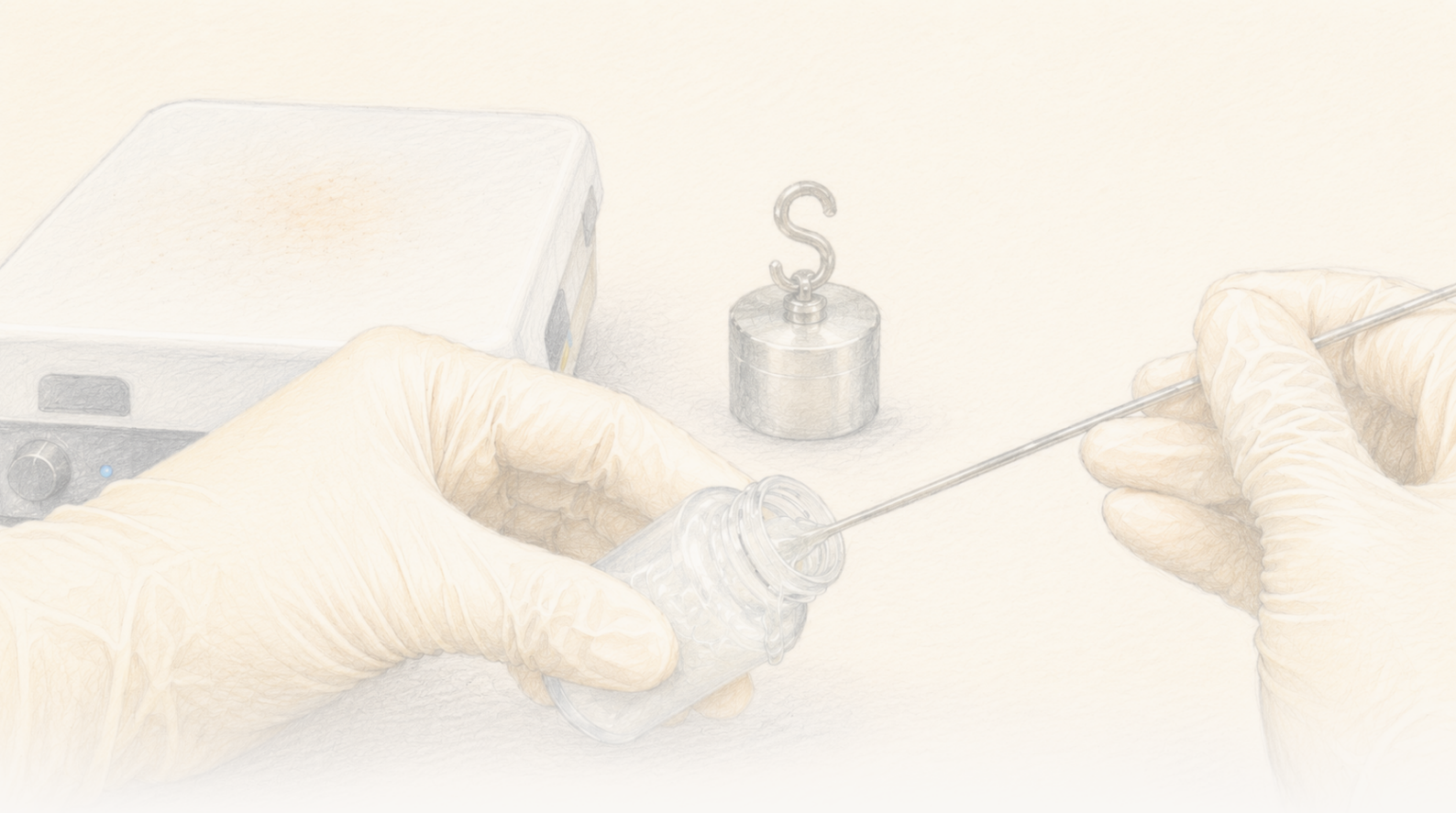


The Clean Paper

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

Una piccola molecola ha incollato il PTFE non trattato, poi è stata rimossa con etanolo

Un articolo su JACS descrive adesivi a base di fosfati di fluoro-crown etere capaci di unire il PTFE, notoriamente inerte, in prove di taglio su giunto sovrapposto, pur restando rimovibili mediante lavaggio con etanolo. CyclicFP-fmoc ha raggiunto 1,3 MPa sul PTFE non trattato con una rottura coesiva duttile, mentre una variante correlata ha raggiunto 2,3 MPa. Il meccanismo è sostenuto da prove spettroscopiche di interazioni fluoro-fluoro all'interfaccia con il PTFE, insieme a legami a idrogeno e impilamento π all'interno dell'adesivo. È un risultato promettente nel campo dei materiali, non ancora una colla commerciale, una soluzione universale per il riciclo o una valutazione completa della sicurezza ambientale.

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

Il PTFE è difficile da incollare per un motivo

Il politetrafluoroetilene, meglio conosciuto come PTFE e venduto anche con nomi commerciali come Teflon, è utile in parte proprio perché tende a non interagire. Ha una bassa energia superficiale. Molti liquidi formano gocce sulla sua superficie. Molte colle non vi aderiscono, a meno che il materiale venga inciso, irruvidito, trattato al plasma o abbinato a un primer specializzato.

Questa resistenza è eccellente per i rivestimenti antiaderenti e i componenti chimicamente inerti. Diventa un problema quando gli ingegneri vogliono unire il PTFE a un altro pezzo senza danneggiarne permanentemente la superficie.

Un articolo sul Journal of the American Chemical Society affronta il problema da una direzione insolita con un adesivo costituito da piccole molecole. Kohei Kikkawa, Abir Goswami e colleghi descrivono molecole di fosfato di fluoro-crown etere capaci di aderire con forza al PTFE non trattato, deformarsi in modo duttile prima della rottura e poi essere rimosse dalle piastre di PTFE mediante lavaggio con etanolo.

La molecola principale si chiama **CyclicFP-fmoc**. Nelle prove di taglio su giunto sovrapposto ha tenuto insieme piastre di PTFE non trattato con una resistenza adesiva di **1,3 ± 0,1 MPa** e un lavoro di distacco di **1.300 N/m**. Poiché 1 MPa equivale a 1 newton per millimetro quadrato, lo sforzo massimo misurato di 1,3 MPa corrisponde alla pressione esercitata all'incirca dal peso di una mela da 130 grammi su ciascun millimetro quadrato. È un'analogia riferita all'unità di superficie, non alla forza o alla geometria di contatto del provino. Il lavoro di distacco riportato, 1.300 N/m, equivale a 1.300 joule di energia di separazione per metro quadrato. Come dimostrazione visiva diretta, e non come valore nominale di carico ingegneristico, l'articolo mostra un giunto di 7 cm^2 che sostiene un peso di 8 kg. Il giunto ha ceduto all'interno dello strato adesivo, non all'interfaccia con il PTFE. È un dettaglio importante: significa che, nella prova, l'interfaccia non era il punto debole.

Disegno a matita basato sulla fotografia dell'articolo che mostra la striscia adesiva mentre sostiene pesi sospesi (Figura 2, a sinistra). Non è la fotografia originale, un disegno in scala o uno schema di portata ingegneristica.

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

Il risultato non significa che «il problema del PTFE è risolto». È un risultato controllato di laboratorio nel campo dei materiali. Ma costituisce un esempio nitido di una combinazione difficile da ottenere: forte adesione, rottura duttile e rimozione mediante lavaggio da una superficie celebre proprio per la sua resistenza all'adesione.

Perché grande resistenza e facile rimozione sono in conflitto

Gli adesivi di solito accettano un compromesso. Le colle polimeriche rigide e reticolate possono essere forti, ma spesso cedono bruscamente e sono difficili da rimuovere in modo pulito. Gli adesivi più morbidi, simili a nastri, possono allungarsi e dissipare energia, ma in genere sacrificano la resistenza.

Il compromesso è molecolare. La resistenza richiede un trasferimento efficiente degli sforzi. La duttilità richiede movimento, riorganizzazione e dissipazione di energia. La facile rimozione richiede legami che possano essere spezzati senza distruggere il substrato. Queste esigenze tirano in direzioni

diverse.

Gli adesivi costituiti da piccole molecole sono interessanti perché, almeno in linea di principio, possono essere rimovibili e riciclabili. Non formano le lunghe reti polimeriche aggrovigliate che rendono tenaci molte colle convenzionali. Ma questa è anche la loro debolezza: senza aggrovigliamento, le piccole molecole normalmente faticano a offrire un'adesione insieme resistente e duttile.

L'articolo su JACS cerca di sostituire l'aggrovigliamento polimerico con una serie di interazioni non covalenti reversibili. La molecola combina una regione fosfato di crown etere fluorurato con un gruppo fmoc collegato da un'unità uretanica. In termini semplici, il suo anello fluorurato può interagire con la superficie del PTFE ricca di fluoro, i gruppi uretanici possono formare legami a idrogeno con le molecole adesive vicine e i gruppi fluorenilici piatti possono impilarsi tra loro. L'obiettivo non è un singolo legame miracoloso, ma un insieme di interazioni deboli e reversibili capaci di cooperare:

- interazioni fluoro-fluoro vicino al PTFE;
- legami a idrogeno tra le molecole dell'adesivo;
- impilamento π-π tra i gruppi fluorenilici;
- e una mobilità molecolare sufficiente a rilassare gli sforzi anziché produrre immediatamente una frattura.

Che cosa ha mostrato la principale prova sul PTFE

Gli autori hanno collocato CyclicFP-fmoc tra piastre di PTFE che non erano state né trattate superficialmente né pulite, hanno riscaldato l'adesivo e lasciato le piastre a temperatura ambiente per 10 minuti prima della prova.

Per la misura quantitativa hanno usato una prova di taglio su giunto sovrapposto. Le piastre di PTFE unite con CyclicFP-fmoc hanno raggiunto uno sforzo di trazione di **1,3 ± 0,1 MPa**, riportato come media ± deviazione standard di tre misure. Applicando l'adesivo a circa **50 °C** con un asciugacapelli si è ottenuto un valore simile, **1,1 ± 0,1 MPa**, senza dover ricorrere esclusivamente alla fusione ad alta temperatura.

Gli autori hanno confrontato questi valori con adesivi commerciali epossidici, acrilici, siliconici e uretanici nello stesso assetto di taglio su PTFE. I controlli hanno raggiunto circa **0,1–0,7 MPa**, rispetto a **1,3 ± 0,1 MPa** per CyclicFP-fmoc. Un confronto sullo stesso substrato e con lo stesso metodo è più informativo di una classifica che affianchi valori in MPa ottenuti con materiali e geometrie di prova differenti.

Il valore è rimasto simile dopo la conservazione. Dopo 30 giorni in condizioni ambientali, la resistenza adesiva era di **1,3 ± 0,2 MPa**. Dopo aver separato forzatamente le piastre, averle sovrapposte di nuovo e averle riscaldate, la resistenza era di **1,2 ± 0,2 MPa**. Anche dopo dieci ripetizioni del ciclo si ottenevano circa **1,3 ± 0,3 MPa**.

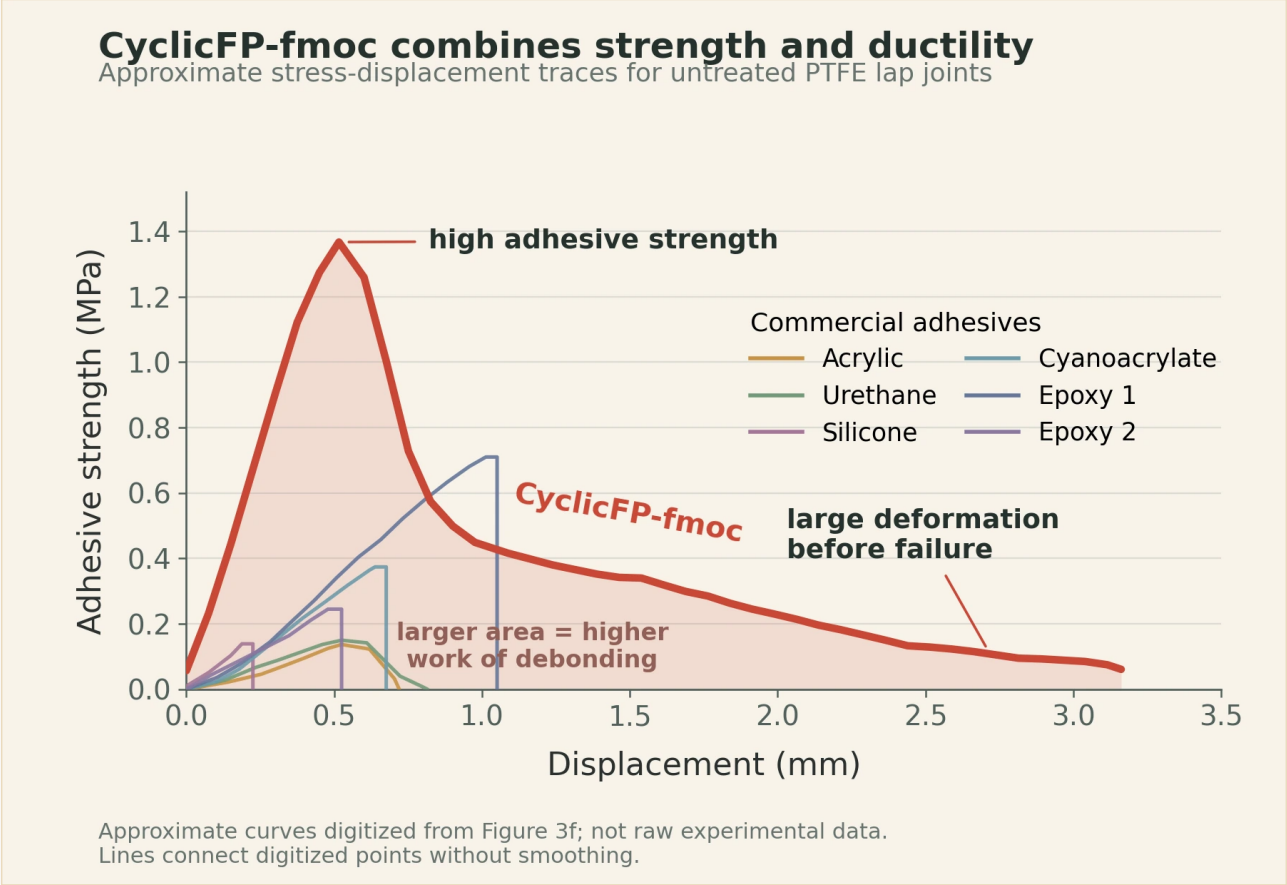
La variante migliore non era la molecola principale. Una molecola correlata con tre gruppi fmoc, **CyclicFP-fmoc3**, ha raggiunto **2,3 ± 0,2 MPa** sul PTFE. L'articolo si concentra comunque soprattutto

su CyclicFP-fmoc perché offre l'intera combinazione di resistenza, duttilità, prove del meccanismo e rimozione mediante lavaggio.

La duttilità è la seconda metà dell'affermazione

La sola resistenza non basterebbe. Un adesivo fragile può raggiungere un alto picco di sforzo e poi rompersi improvvisamente. L'affermazione più distintiva dell'articolo è che CyclicFP-fmoc si comporta anche in modo duttile.

Nelle curve di taglio su giunto sovrapposto, CyclicFP-fmoc raggiungeva lo sforzo massimo e poi lo perdeva gradualmente mentre lo spostamento continuava. Gli adesivi commerciali esaminati nell'articolo si comportavano più come giunti fragili: la rottura seguiva poco dopo il picco di sforzo.



CyclicFP-fmoc combina un alto picco di sforzo con una lunga coda successiva al picco; l'area ombreggiata è una guida editoriale al suo maggiore lavoro di distacco. Curve approssimative digitalizzate dalla Figura 3f; non sono dati sperimentali grezzi.

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

Gli autori hanno quantificato l'area sotto la curva sforzo-spostamento come lavoro di distacco. CyclicFP-fmoc ha fornito **1.300 N/m** sul PTFE. Gli adesivi commerciali provati erano compresi tra **26 e 314 N/m**.

La modalità di rottura è coerente con questa interpretazione. I giunti in PTFE con CyclicFP-fmoc hanno ceduto in modo coesivo, all'interno dell'adesivo. Ciò suggerisce che l'adesivo potesse dissipare energia deformandosi internamente, mentre in queste prove l'interfaccia con il PTFE restava più resistente dello strato adesivo nel suo complesso.

Gli esperimenti di rilassamento degli sforzi aggiungono una scala temporale molecolare. A 20 °C, il tempo caratteristico di rilassamento era di **60 ms** e l'analisi di Arrhenius ha fornito un'energia di attivazione di **33,8 kJ/mol**. In termini semplici, lo strato adesivo può riorganizzarsi abbastanza rapidamente da attenuare una concentrazione improvvisa di sforzo, anziché comportarsi come un solido fragile e statico.

Perché gli autori ritengono importante il fluoro

Il PTFE è costituito da legami carbonio-fluoro. CyclicFP-fmoc contiene gruppi crown etere fluorurati. Gli autori sostengono che le **interazioni F-F** aiutino l'adesivo a legarsi al PTFE, mentre altre interazioni contribuiscono a tenere insieme e a rendere deformabile lo strato adesivo.

Diversi esperimenti di controllo indicano questa direzione. Quando gli atomi di fluoro di CyclicFP-fmoc sono stati sostituiti con atomi di idrogeno, il composto risultante, CyclicP-fmoc, ha aderito al PTFE molto più debolmente, con circa **0,1 ± 0,0 MPa**. Un fosfato di fluoro-etere lineare, AcyclicFP-fmoc, ha raggiunto soltanto **0,3 ± 0,1 MPa**. Anche le varianti prive delle unità responsabili dell'impilamento π o dei legami a idrogeno hanno funzionato peggio.

L'articolo usa poi la spettroscopia e la struttura cristallina per sostenere il quadro delle interazioni. In un cristallo di CyclicFP-fmoc, gli atomi di fluoro di molecole vicine si trovano a **2,49–2,91 ångström**, distanze inferiori alla somma dei raggi di van der Waals di due atomi di fluoro, pari a **2,94 ångström**. FT-IR e NMR a temperatura variabile sostengono la presenza di legami a idrogeno, interazioni F-F e impilamento π-π nell'adesivo amorfo.

Per il PTFE, la prova più diretta viene dagli spettri di **NMR MAS allo stato solido del 19F**, che mostrano uno spostamento quando CyclicFP-fmoc viene miscelato con nanoparticelle o sottili fogli di PTFE. Il controllo non fluorurato non produce lo stesso spostamento. È una prova, non soltanto uno schema progettuale, che le regioni fluorurate dell'adesivo interagiscono con il PTFE.

Il risultato non va comunque semplificato in «i legami F-F risolvono il PTFE». Il modello proposto dall'articolo è più stratificato: le interazioni F-F all'interfaccia favoriscono l'adesione al PTFE, mentre i legami a idrogeno e l'impilamento π-π contribuiscono alla coesione e alla duttilità all'interno dell'adesivo.

La rimozione mediante lavaggio è reale, ma circoscritta

La possibilità di rimuoverlo è il principale richiamo pratico. Gli autori hanno lavato con etanolo le piastre di PTFE dopo averle separate e riferiscono, nella loro dimostrazione, la completa elimi-

nazione di CyclicFP-fmoc senza residui. Hanno inoltre recuperato e riutilizzato più volte l'adesivo, mantenendo nei test di riuso una resistenza di circa **1,2 ± 0,1 MPa**.

È importante perché gli adesivi convenzionali molto resistenti sono spesso difficili da eliminare in modo pulito. Una colla capace di tenere insieme il PTFE e di essere successivamente rimossa mediante lavaggio sarebbe utile per riparazione, smontaggio e riuso.

Ma il confine è importante. L'articolo esamina campioni controllati, non ogni superficie industriale contaminata, giunto invecchiato, esposizione a solventi o condizione di invecchiamento a lungo termine. La rimozione con etanolo da piastre di PTFE non equivale alla dimostrazione di un intero processo di riciclo per assemblaggi composti da molti materiali.

L'articolo afferma inoltre che CyclicFP-fmoc non è una sostanza PFAS «eterna». Questa affermazione non va estesa fino a diventare una valutazione completa del rischio ambientale. Persistenza, tossicità, produzione su larga scala, vie di rilascio e regolamentazione sono domande distinte.

Che cosa questo studio non dimostra

- **Non** mostra un prodotto adesivo pronto per il mercato.
- **Non** dimostra che ora il PTFE possa essere incollato in modo affidabile in ogni contesto industriale senza preparazione superficiale.
- **Non** mostra che la rimozione con etanolo funzioni altrettanto bene su ogni substrato, condizione superficiale o giunto invecchiato.
- **Non** dimostra che le sole interazioni F-F spieghino l'adesione. Il meccanismo proposto combina interazioni F-F, legami a idrogeno e impilamento π-π.
- **Non** mostra un processo completo di riciclo della plastica.
- **Non** stabilisce un profilo completo di sicurezza ambientale o tossicologica per le molecole adesive.
- **Non** significa che gli adesivi commerciali siano generalmente peggiori. I confronti riguardano i materiali e lo specifico assetto di taglio su PTFE esaminati nell'articolo.

Quanto è solido il risultato?

Per un lavoro di laboratorio sui materiali, il risultato è solido perché gli autori non si limitano a riportare un singolo valore elevato. Esaminano resistenza, duttilità, durata dopo 30 giorni, tolleranza all'acqua, ripetute riadesioni, rimozione con etanolo, varianti molecolari e prove spettroscopiche delle interazioni proposte.

La combinazione più convincente è quella tra modalità di rottura ed esperimenti di controllo. Se avesse ceduto per prima l'interfaccia con il PTFE, l'affermazione sarebbe stata più debole. Il giunto si rompe invece all'interno dello strato adesivo. E quando la struttura ciclica fluorurata viene eliminata o modificata, l'adesione al PTFE diminuisce nettamente.

Restano aperte le domande relative alla scala e al caso d'uso. Le prove di taglio su giunto sovrapposto sono standardizzate e utili, ma i giunti reali subiscono pelatura, urti, fatica, contaminazione, cicli termici e contatto tra materiali diversi. Una molecola che funziona magnificamente tra piastre controllate in laboratorio deve ancora diventare una formulazione, un processo e un insieme di dati sulla durata prima di trasformarsi in un adesivo ingegneristico.

Perché è importante

Il PTFE occupa una posizione scomoda nel mondo dei materiali. La sua inerzia è la caratteristica che lo rende prezioso, e la stessa caratteristica ne rende difficile l'integrazione in assemblaggi riparabili o riciclabili.

L'articolo offre una via chimicamente specifica anziché basata sulla forza bruta. Invece di irruvidire o aggredire chimicamente la superficie del PTFE, progetta una piccola molecola capace di interagire con quella superficie mantenendo uno strato adesivo duttile e reversibile.

Se questa logica progettuale si rivelasse generalizzabile, potrebbe contribuire alla creazione di adesivi più facili da rimuovere e riutilizzare senza rinunciare a tutte le prestazioni meccaniche. È questa la vera promessa: non una singola molecola come colla già finita, ma una strategia molecolare per un'adesione forte, duttile e reversibile.

In breve

Kikkawa, Goswami e colleghi descrivono piccole molecole di fosfato di fluoro-crown etere come adesivi per il PTFE e altri substrati. La molecola principale, CyclicFP-fmoc, ha unito piastre di PTFE non trattato con una resistenza di $1{,}3 \pm 0{,}1$ MPa nelle prove di taglio su giunto sovrapposto, ha ceduto in modo coesivo anziché all'interfaccia con il PTFE, ha mostrato un lavoro di distacco di 1.300 N/m, ha mantenuto le prestazioni dopo conservazione e ripetute riadesioni ed è stata rimossa dalle piastre di PTFE mediante lavaggio con etanolo. Una variante correlata ha raggiunto $2{,}3 \pm 0{,}2$ MPa. La spettroscopia e le molecole di controllo sostengono un meccanismo nel quale le interazioni F-F favoriscono l'interfaccia con il PTFE, mentre i legami a idrogeno e l'impilamento π-π aiutano lo strato adesivo a dissipare gli sforzi. Il risultato è una promettente dimostrazione di laboratorio di un'adesione forte, duttile e rimovibile dal PTFE mediante lavaggio, non ancora una colla commerciale, una soluzione universale per il riciclo o una valutazione completa della sicurezza ambientale.

Fonti

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