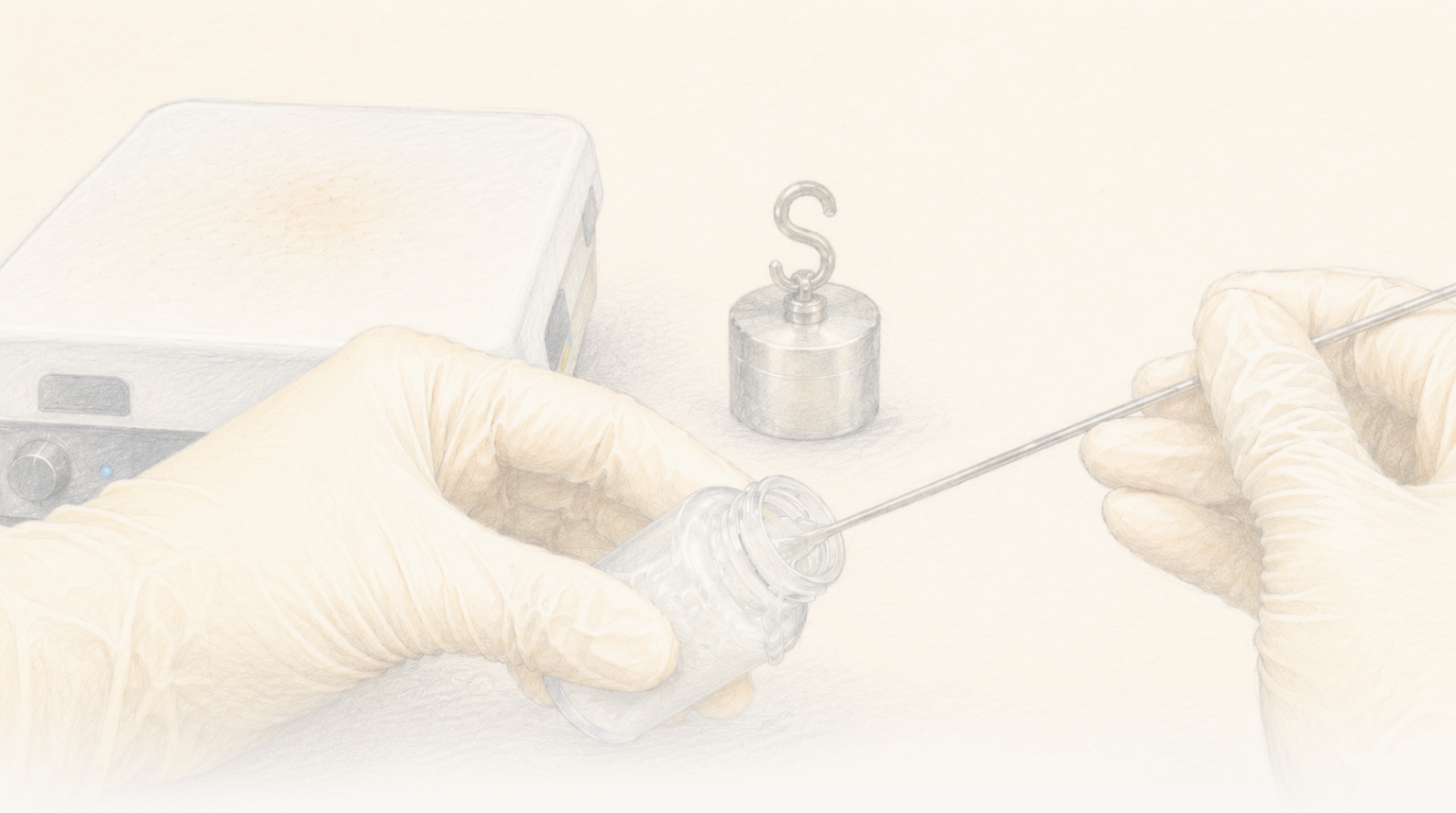


The Clean Paper

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

Malá molekula slepila neupravené PTFE a poté ji bylo možné smýt ethanolem

Článek v JACS popisuje fosfátová lepidla s fluorovaným crown-etherem, která v laboratorních smykových zkouškách lepí notoricky inertní PTFE a současně je lze odstranit omytím ethanolem. CyclicFP-fmoc dosáhl na neupraveném PTFE 1,3 MPa s tvárným kohezivním selháním a příbuzná varianta 2,3 MPa. Mechanismus podporují spektroskopické důkazy interakcí fluor–fluor u PTFE spolu s vodíkovými vazbami a π-skládáním uvnitř lepidla. Jde o slibný materiálový výsledek, nikoli zatím o komerční lepidlo, univerzální řešení recyklace ani úplné posouzení environmentální bezpečnosti.

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

K PTFE se z dobrého důvodu špatně lepí

Polytetrafluorethylen, známější jako PTFE a prodávaný mimo jiné pod obchodním názvem Teflon, je užitečný zčásti právě proto, že nechce s ničím interagovat. Má nízkou povrchovou energii. Mnohé kapaliny se na něm shlukují do kapek. Mnohá lepidla na něm selžou, pokud není povrch naleptán, zdrsněn, ošetřen plazmatem nebo spojen se speciálním primerem.

Tato odolnost je skvělá pro nepřilnavé povlaky a chemicky inertní součásti. Je však problémem, když chtějí technici spojit PTFE s jiným dílem bez trvalého poškození povrchu.

Článek v Journal of the American Chemical Society popisuje malé molekulární lepidlo, které k problému přistupuje neobvyklým směrem. Kohei Kikkawa, Abir Goswami a jejich kolegové představují fosfátové molekuly s fluorovaným crown-etherem, které dokážou silně přilnout k neupravenému PTFE, před selháním se tvárně deformovat a poté je lze z desek PTFE odstranit omytím ethanolem.

Hlavní molekula se nazývá **CyclicFP-fmoc**. Ve smykové zkoušce s přeplátovaným spojem držela neupravené desky PTFE s pevností lepeného spoje **1,3 ± 0,1 MPa** a prací potřebnou k odlepení **1300 N/m**. Protože 1 MPa odpovídá 1 newtonu na čtvereční milimetr, naměřené špičkové napětí 1,3 MPa představuje stejný tlak jako přibližně tíha 130gramového jablka působící na každý čtvereční milimetr. Jde o analogii na jednotku plochy, nikoli o sílu nebo geometrii kontaktu zkušebního vzorku. Uvedená práce odlepení 1300 N/m odpovídá 1300 joulům separační energie na čtvereční metr. Jako přímou vizuální demonstraci, nikoli technický údaj o nosnosti, článek ukazuje spoj o ploše 7 cm^2 nesoucí osm kilogramů. Spoj selhal uvnitř vrstvy lepidla, nikoli na rozhraní s PTFE. To je důležité: znamená to, že rozhraní nebylo ve zkoušce nejslabším místem.

Kresba tužkou podle fotografie z článku, na níž lepicí pásek nese zavěšená závaží (obrázek 2 vlevo). Nejde o původní fotografii, výkres v měřítku ani technické schéma nosnosti.

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

Výsledek neznamená, že „problém PTFE je vyřešen“. Jde o kontrolovaný laboratorní výsledek materiálového výzkumu. Je však názorným příkladem obtížné kombinace: silné přilnutí, tvárné selhání a odstranění otřením z povrchu proslulého odporem vůči lepení.

Proč jsou běžná pevnost a snadné odstranění ve vzájemném napětí

Lepidla obvykle přistupují na kompromis. Tuhá zesíťovaná polymerní lepidla mohou být pevná, ale často selhávají náhle a obtížně se čistě odstraňují. Měkčí lepidla podobná páskám se mohou natahovat a rozptylovat energii, ale obvykle obětují pevnost.

Tento kompromis je molekulární. Pevnost vyžaduje účinný přenos napětí. Tvárnost vyžaduje pohyb, přeskupování a disipaci energie. Snadné odstranění vyžaduje vazby, které lze přerušit bez zničení podkladu. Tyto požadavky táhnou různými směry.

Malé molekulární lepicí látky jsou lákavé, protože mohou být v principu odstranitelné a recyklovatelné. Nevytvářejí dlouhé propletené polymerní sítě, díky nimž jsou mnohá běžná lepidla houževnatá. To je zároveň jejich slabina: bez propletení malé molekuly běžně nedokážou zajistit tvárné lepení s vysokou pevností.

Článek v JACS se snaží nahradit polymerní propletení soustavou vratných nekovalentních interakcí. Molekula kombinuje oblast fluorovaného crown-etherfosfátu s urethanem navázanou skupinou fmoc. Jednoduše řečeno může její fluorovaný kruh interagovat s povrchem PTFE bohatým na fluor, urethanové skupiny mohou vytvářet vodíkové vazby se sousedními molekulami lepidla a ploché fluorenylové skupiny se mohou skládat na sebe. Cílem návrhu není jediná zázračná vazba. Jde o soubor slabých, vratných interakcí, které mohou spolupracovat:

- interakce fluor–fluor v blízkosti PTFE;
- vodíkové vazby mezi molekulami lepidla;
- π–π skládání mezi fluorenylovými skupinami;
- a dostatečná molekulární pohyblivost k uvolnění napětí namísto okamžitého prasknutí.

Co ukázala hlavní zkouška na PTFE

Autoři vložili CyclicFP-fmoc mezi desky PTFE, které nebyly povrchově upraveny ani očištěny, lepidlo zahřáli a před zkouškou nechali desky deset minut při pokojové teplotě.

Pro kvantitativní měření použili smykovou zkoušku přeplátovaného spoje. Desky PTFE slepené CyclicFP-fmoc dosáhly tahového napětí **1,3 ± 0,1 MPa**, uvedeného jako průměr ± směrodatná odchylka tří měření. Nanesení lepidla při teplotě kolem **50 °C** pomocí fénu vedlo k podobné hodnotě **1,1 ± 0,1 MPa**, takže nebylo nutné pouze vysokoteplotní tavení.

Autoři tyto hodnoty porovnali s komerčními epoxidovými, akrylátovými, silikonovými a urethanovými lepidly ve stejném uspořádání smykové zkoušky na PTFE. Kontrolní lepidla dosáhla přibližně **0,1 až 0,7 MPa**, oproti **1,3 ± 0,1 MPa** u CyclicFP-fmoc. Toto porovnání na stejném podkladu a stejnou metodou je informativnější než zařazení hodnot MPa z různých materiálů a zkušebních geometrií do jednoho žebříčku.

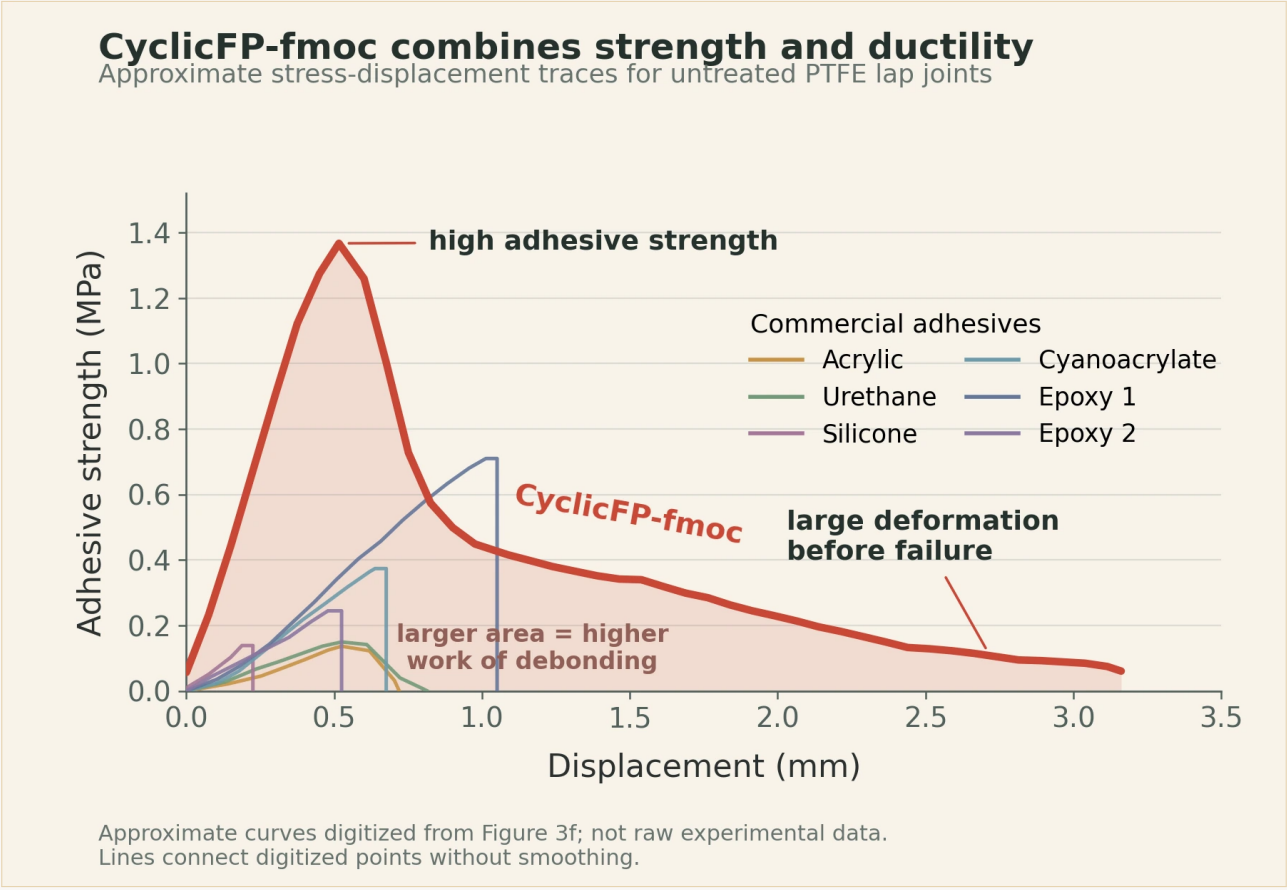
Hodnota zůstala podobná i po skladování. Po 30 dnech v okolních podmínkách činila pevnost spoje **1,3 ± 0,2 MPa**. Poté, co byly desky násilně odděleny, znovu překryty a zahřáty, dosáhla **1,2 ± 0,2 MPa**. I po deseti opakováních tohoto cyklu zůstala přibližně na **1,3 ± 0,3 MPa**.

Nejlepší variantou nebyla hlavní molekula. Příbuzná molekula se třemi skupinami fmoc, **CyclicFP-fmoc3**, dosáhla na PTFE **2,3 ± 0,2 MPa**. Článek se přesto výrazně zaměřuje na CyclicFP-fmoc, protože poskytuje úplnou kombinaci pevnosti, tvárnosti, mechanistických důkazů a odstranění otřením.

Tvárnost je druhou polovinou tvrzení

Samotná pevnost by nestačila. Křehké lepidlo může dosáhnout vysokého špičkového napětí a pak náhle selhat. Výraznějším tvrzením článku je, že se CyclicFP-fmoc chová také tvárně.

V křivkách smykové zkoušky dosáhl CyclicFP-fmoc maximálního napětí a poté s pokračujícím posunem napětí postupně ztrácel. Komerční lepidla testovaná v článku se chovala spíše jako křehké spoje: selhání nastalo krátce po dosažení špičkového napětí.



CyclicFP-fmoc kombinuje vysokou špičku napětí s dlouhým klesajícím úsekem za maximem; stínovaná plocha je redakční pomůckou znázorňující jeho větší práci odlepení. Přibližné křivky digitalizované z obrázku 3f; nejde o nezpracovaná experimentální data.

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

Autoři vyjádřili plochu pod křivkou napětí a posunutí jako práci odlepení. CyclicFP-fmoc poskytl na PTFE **1300 N/m**. Testovaná komerční lepidla dosahovala **26 až 314 N/m**.

Způsob selhání tomuto výkladu odpovídá. Spoje PTFE s CyclicFP-fmoc selhaly kohezivně, uvnitř lepidla. To naznačuje, že lepidlo mohlo rozptylovat energii vlastní deformací, zatímco rozhraní s PTFE zůstalo v těchto zkouškách pevnější než objemová vrstva lepidla.

Experimenty s relaxací napětí doplňují molekulární časovou škálu. Při 20 °C činila charakteristická relaxační doba **60 ms** a Arrheniova analýza poskytla aktivační energii **33,8 kJ/mol**. Jednoduše řečeno se

vrstva lepidla dokáže přeskupit dostatečně rychle, aby zmírnila náhlou koncentraci napětí, namísto chování jako statická křehká pevná látka.

Proč autoři považují fluor za důležitý

PTFE je vystavěn z vazeb uhlík–fluor. CyclicFP-fmoc nese fluorované crown-etherové skupiny. Autoři tvrdí, že **interakce F–F** pomáhají lepidlu vázat se k PTFE, zatímco jiné interakce pomáhají vrstvě lepidla držet pohromadě a deformovat se.

Tímto směrem ukazuje několik kontrolních experimentů. Když byly atomy fluoru v CyclicFP-fmoc nahrazeny atomy vodíku, výsledný CyclicP-fmoc se na PTFE vázal mnohem slaběji, přibližně **0,1 ± 0,0 MPa**. Lineární fluoroetherfosfát AcyclicFP-fmoc dosáhl pouze **0,3 ± 0,1 MPa**. Hůře si vedly také varianty postrádající jednotky pro π-skládání nebo vodíkové vazby.

Článek následně podporuje obraz interakcí spektroskopií a krystalovou strukturou. V krystalu CyclicFP-fmoc jsou atomy fluoru na sousedních molekulách vzdáleny **2,49 až 2,91 ångströmu**, tedy méně než van der Waalsův součet **2,94 ångströmu** pro dva atomy fluoru. FT-IR a NMR s proměnnou teplotou podporují přítomnost vodíkových vazeb, interakcí F–F a π–π skládání v amorfním lepidle.

Nejpřímější důkaz pro PTFE poskytují posuny ve spektrech **19F MAS NMR** v pevné fázi, když je CyclicFP-fmoc smíchán s nanočásticemi PTFE nebo tenkými listy PTFE. Nefluorovaná kontrola stejný posun nevytváří. To je důkaz, nikoli jen návrhové schéma, že fluorované části lepidla interagují s PTFE.

Přesto by se výsledek neměl zjednodušovat na tvrzení „vazby F–F řeší PTFE“. Vlastní model článku je vrstevnatější: interakce F–F na rozhraní pomáhají přilnutí k PTFE, zatímco vodíkové vazby a π–π skládání přispívají ke kohezi a tvárnosti uvnitř lepidla.

Odstranění otřením je skutečné, ale má své hranice

Výsledek odstranění je praktickým lákadlem. Autoři omyli oddělené desky PTFE ethanolem a ve své demonstraci uvádějí úplné odstranění CyclicFP-fmoc bez zbytků. Lepidlo také získali zpět a opakovaně je znovu použili, přičemž ve zkouškách opětovného použití udrželi pevnost přibližně **1,2 ± 0,1 MPa**.

To je důležité, protože běžná silná lepidla se často obtížně odstraňují beze zbytku. Lepidlo, které dokáže držet PTFE a později je možné smýt, by bylo užitečné při opravách, rozebírání a opětovném použití.

Hranice výsledku jsou však důležité. Článek testuje kontrolované vzorky, nikoli všechny znečištěné průmyslové povrchy, zvětralé spoje, expozice rozpouštědlům nebo podmínky dlouhodobého stárnutí. Odstranění ethanolem z desek PTFE není totéž jako prokázání úplného recyklačního procesu pro sestavy z mnoha materiálů.

Článek také uvádí, že CyclicFP-fmoc není „věčnou chemikálií“ PFAS. Toto tvrzení by se nemělo rozšiřovat na úplné posouzení environmentálních rizik. Perzistence, toxicita, měřítko výroby, cesty úniku a regulace jsou samostatné otázky.

Co tento výsledek nedokazuje

- **Neukazuje** lepicí výrobek připravený pro trh.
- **Neprokazuje**, že lze PTFE nyní spolehlivě lepit v každém průmyslovém prostředí bez přípravy povrchu.
- **Neukazuje**, že odstranění ethanolem funguje stejně dobře na každém podkladu, stavu povrchu nebo zestárlém spoji.
- **Neprokazuje**, že přilnutí vysvětlují samotné interakce F–F. Mechanismus článku kombinuje F–F, vodíkové vazby a π–π skládání.
- **Neukazuje** úplný postup recyklace plastů.
- **Nestanovuje** úplný environmentální nebo toxikologický bezpečnostní profil molekul lepidla.
- **Neznamená**, že jsou komerční lepidla obecně horší. Porovnání se týká konkrétních materiálů a uspořádání smykové zkoušky na PTFE testovaných v tomto článku.

Jak silný je výsledek?

Na laboratorní materiálový článek je výsledek silný, protože autoři neuvádějí pouze jediné vysoké číslo. Testují pevnost, tvárnost, odolnost během 30 dnů, toleranci k vodě, opakované slepení, odstranění ethanolem, molekulární varianty i spektroskopické důkazy navržených interakcí.

Nejpřesvědčivější je kombinace způsobu selhání a kontrol. Kdyby nejprve selhalo rozhraní s PTFE, tvrzení by bylo slabší. Místo toho spoj selhává uvnitř lepicí vrstvy. A když je fluorovaná cyklická struktura odstraněna nebo změněna, přilnutí k PTFE prudce klesá.

Otevřené zůstávají otázky měřítka a způsobu použití. Smykové zkoušky přeplátovaných spojů jsou standardizované a užitečné, reálné spoje však zažívají odlupování, nárazy, únavu, znečištění, teplotní cykly a kombinace materiálů. Molekula, která krásně funguje mezi kontrolovanými laboratorními deskami, se musí ještě proměnit ve formulaci, výrobní proces a soubor dat o trvanlivosti, než se stane technickým lepidlem.

Proč na tom záleží

PTFE leží na nepříjemné materiálové hranici. Jeho inertnost je vlastností, díky níž je cenný, a tatáž vlastnost znesnadňuje jeho začlenění do opravitelných nebo recyklovatelných sestav.

Článek nabízí chemicky specifickou cestu namísto hrubé síly. Místo zdrsnění nebo chemického

napadení povrchu PTFE navrhuje malou molekulu, která s tímto povrchem dokáže interagovat a současně udržuje tvárnou, vratnou lepicí vrstvu.

Pokud bude tato návrhová logika obecně použitelná, mohla by pomoci vytvořit lepidla, která se snadněji odstraňují a znovu používají, aniž by zcela obětovala mechanický výkon. V tom spočívá skutečný příslib: nikoli jedna molekula jako hotové lepidlo, ale molekulární strategie pro pevné, tvárné a rozpojitelné lepení.

Stručné shrnutí

Kikkawa, Goswami a jejich kolegové popisují malé fosfátové molekuly s fluorovaným crown-etherem jako lepidla pro PTFE a další podklady. Hlavní molekula CyclicFP-fmoc slepila neupravené desky PTFE ve smykové zkoušce pevností 1,3 ± 0,1 MPa, selhala kohezivně namísto na rozhraní s PTFE, vykázala práci odlepení 1300 N/m, zachovala výkon po skladování a opakovaném slepení a bylo ji možné z desek PTFE odstranit omytím ethanolem. Příbuzná varianta dosáhla 2,3 ± 0,2 MPa. Spektroskopie a kontrolní molekuly podporují mechanismus, v němž interakce F–F pomáhají na rozhraní s PTFE, zatímco vodíkové vazby a π–π skládání umožňují vrstvě lepidla rozptylovat napětí. Jde o slibnou laboratorní demonstraci pevného, tvárného a otřením odstranitelného lepení PTFE, nikoli zatím o komerční lepidlo, univerzální řešení recyklace ani úplné posouzení environmentální bezpečnosti.

Zdroje

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