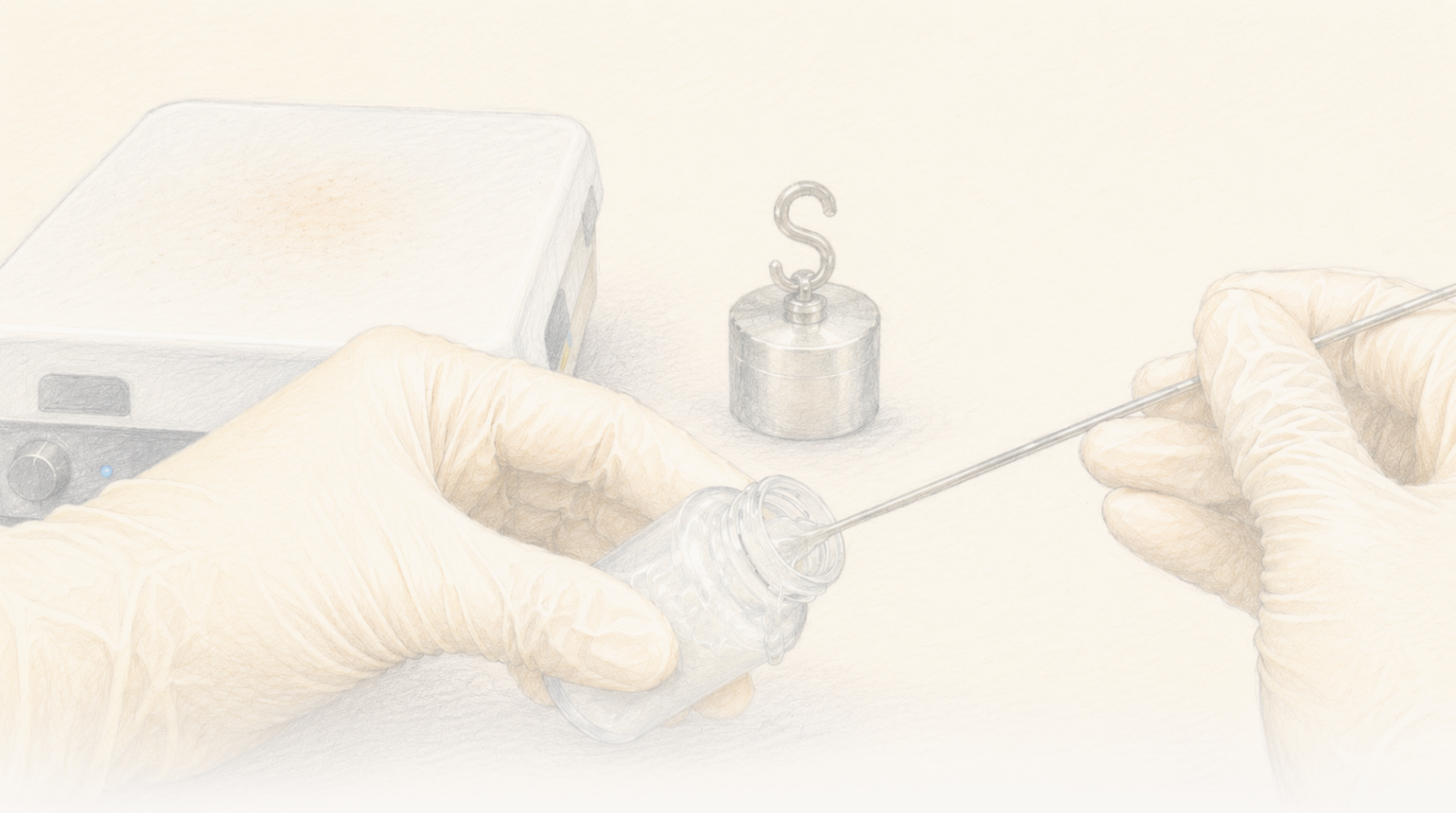


The Clean Paper

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

Una molécula pequeña pegó PTFE sin tratar y después se eliminó con etanol

Un artículo de JACS describe adhesivos de fosfato de fluoroéter corona que unen el PTFE, notoriamente inerte, en pruebas de cizallamiento por solape de laboratorio y siguen siendo retirables mediante lavado con etanol. CyclicFP-fmoc alcanzó 1,3 MPa sobre PTFE sin tratar con fallo cohesivo dúctil, y una variante relacionada llegó a 2,3 MPa. El mecanismo está respaldado por evidencia espectroscópica de interacciones flúor-flúor con el PTFE, además de enlaces de hidrógeno y apilamiento pi dentro del adhesivo. Es un resultado prometedor de materiales, todavía no un pegamento comercial, una solución universal de reciclaje ni una evaluación completa de seguridad ambiental.

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

El PTFE es difícil de pegar por una razón

El politetrafluoroetileno, más conocido como PTFE y vendido bajo nombres comerciales como Teflon, resulta útil en parte porque no quiere interactuar. Su energía superficial es baja. Muchos líquidos forman gotas sobre él. Muchos adhesivos fallan a menos que la superficie se ataque químicamente, se vuelva rugosa, se trate con plasma o se combine con una imprimación especializada.

Esa resistencia es excelente para revestimientos antiadherentes y piezas químicamente inertes. Se convierte en un problema cuando los ingenieros quieren unir PTFE a otra pieza sin dañar permanentemente la superficie.

Un artículo del Journal of the American Chemical Society aborda el problema desde una dirección inusual mediante un adhesivo de moléculas pequeñas. Kohei Kikkawa, Abir Goswami y sus colegas describen moléculas de fosfato de fluoroéter corona capaces de adherirse con fuerza a PTFE sin tratar, deformarse de manera dúctil antes de fallar y después retirarse de las placas de PTFE lavándolas con etanol.

La molécula principal se llama **CyclicFP-fmoc**. En pruebas de cizallamiento por solape, mantuvo unidas placas de PTFE sin tratar con una resistencia adhesiva de **1,3 ± 0,1 MPa** y un trabajo de despegado de **1300 N/m**. Como 1 MPa equivale a 1 newton por milímetro cuadrado, la tensión máxima medida de 1,3 MPa representa la misma presión que aproximadamente el peso de una manzana de 130 gramos actuando sobre cada milímetro cuadrado. Es una analogía por unidad de área, no la fuerza ni la geometría de contacto de la probeta. El trabajo de despegado comunicado, 1300 N/m, equivale a 1300 julios de energía de separación por metro cuadrado. Como demostración visual directa, no como clasificación de carga de ingeniería, el artículo muestra una unión de 7 cm^2 sosteniendo un peso de 8 kg. La unión falló dentro de la capa adhesiva, no en la interfaz con el PTFE. Esto importa: significa que la interfaz no era el punto débil en la prueba.

Representación a lápiz basada en la fotografía del artículo donde una tira adhesiva sostiene pesos suspendidos —Figura 2, izquierda—. No es la fotografía original, un dibujo a escala ni un diagrama de capacidad de carga de ingeniería.

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

El resultado no significa que «el problema del PTFE esté resuelto». Es un resultado controlado de laboratorio en ciencia de materiales. Pero ofrece un ejemplo limpio de una combinación difícil: adhesión fuerte, fallo dúctil y retirada mediante limpieza de una superficie famosa por resistirse a ser pegada.

Por qué la resistencia ordinaria y la retirada fácil suelen estar reñidas

Los adhesivos suelen hacer una concesión. Los pegamentos poliméricos rígidos y reticulados pueden ser fuertes, pero a menudo fallan de forma repentina y son difíciles de retirar limpiamente. Los adhesivos más blandos, semejantes a cintas, pueden estirarse y disipar energía, pero normalmente sacrifican resistencia.

La compensación es molecular. La resistencia exige una transferencia eficaz de tensiones. La ductil-

idad exige movimiento, reorganización y disipación de energía. La retirada fácil exige enlaces que puedan romperse sin destruir el sustrato. Estos requisitos tiran en direcciones distintas.

Los adhesivos de moléculas pequeñas resultan atractivos porque, en principio, pueden ser retirables y reciclables. No forman las largas redes poliméricas entrelazadas que vuelven tenaces a muchos pegamentos convencionales. Esa es también su debilidad: sin entrelazamiento, las moléculas pequeñas suelen tener dificultades para proporcionar una adhesión dúctil y de alta resistencia.

El artículo de JACS intenta sustituir el entrelazamiento de polímeros por una pila de interacciones no covalentes reversibles. La molécula combina una región fluorada de fosfato de éter corona con un grupo fmoc unido por uretano. En términos sencillos, su anillo fluorado puede interactuar con la superficie rica en flúor del PTFE, sus grupos uretano pueden formar enlaces de hidrógeno con moléculas adhesivas vecinas y sus grupos fluorenilo planos pueden apilarse entre sí. El objetivo del diseño no es un único enlace mágico, sino un conjunto de interacciones débiles y reversibles capaces de cooperar:

- interacciones flúor-flúor cerca del PTFE;
- enlaces de hidrógeno entre moléculas adhesivas;
- apilamiento pi-pi entre grupos fluorenilo;
- y suficiente movilidad molecular para relajar la tensión en lugar de agrietarse de inmediato.

Qué mostró la prueba principal con PTFE

Los autores colocaron CyclicFP-fmoc entre placas de PTFE que no habían sido tratadas superficialmente ni limpiadas, calentaron el adhesivo y dejaron las placas a temperatura ambiente durante 10 minutos antes de probarlas.

Para la medición cuantitativa utilizaron cizallamiento por solape. Las placas de PTFE unidas con CyclicFP-fmoc alcanzaron una tensión de tracción de **1,3 ± 0,1 MPa**, expresada como media ± desviación estándar de tres mediciones. Aplicar el adhesivo a unos **50 C** con un secador de pelo produjo un valor parecido, **1,1 ± 0,1 MPa**, por lo que no requería únicamente fusión a alta temperatura.

Los autores compararon estos valores con adhesivos comerciales epoxi, acrílicos, de silicona y de uretano dentro del mismo montaje de cizallamiento por solape sobre PTFE. Los controles alcanzaron aproximadamente entre **0,1 y 0,7 MPa**, frente a **1,3 ± 0,1 MPa** para CyclicFP-fmoc. Esta comparación con el mismo sustrato y el mismo método aporta más información que colocar en una clasificación valores en MPa obtenidos de materiales y geometrías de ensayo diferentes.

La cifra siguió siendo parecida tras el almacenamiento. Después de 30 días en condiciones ambientales, la resistencia adhesiva era de **1,3 ± 0,2 MPa**. Tras separar a la fuerza las placas, volver a solaparlas y recalentarlas, la resistencia fue de **1,2 ± 0,2 MPa**. Incluso después de repetir ese ciclo diez veces, seguía siendo de aproximadamente **1,3 ± 0,3 MPa**.

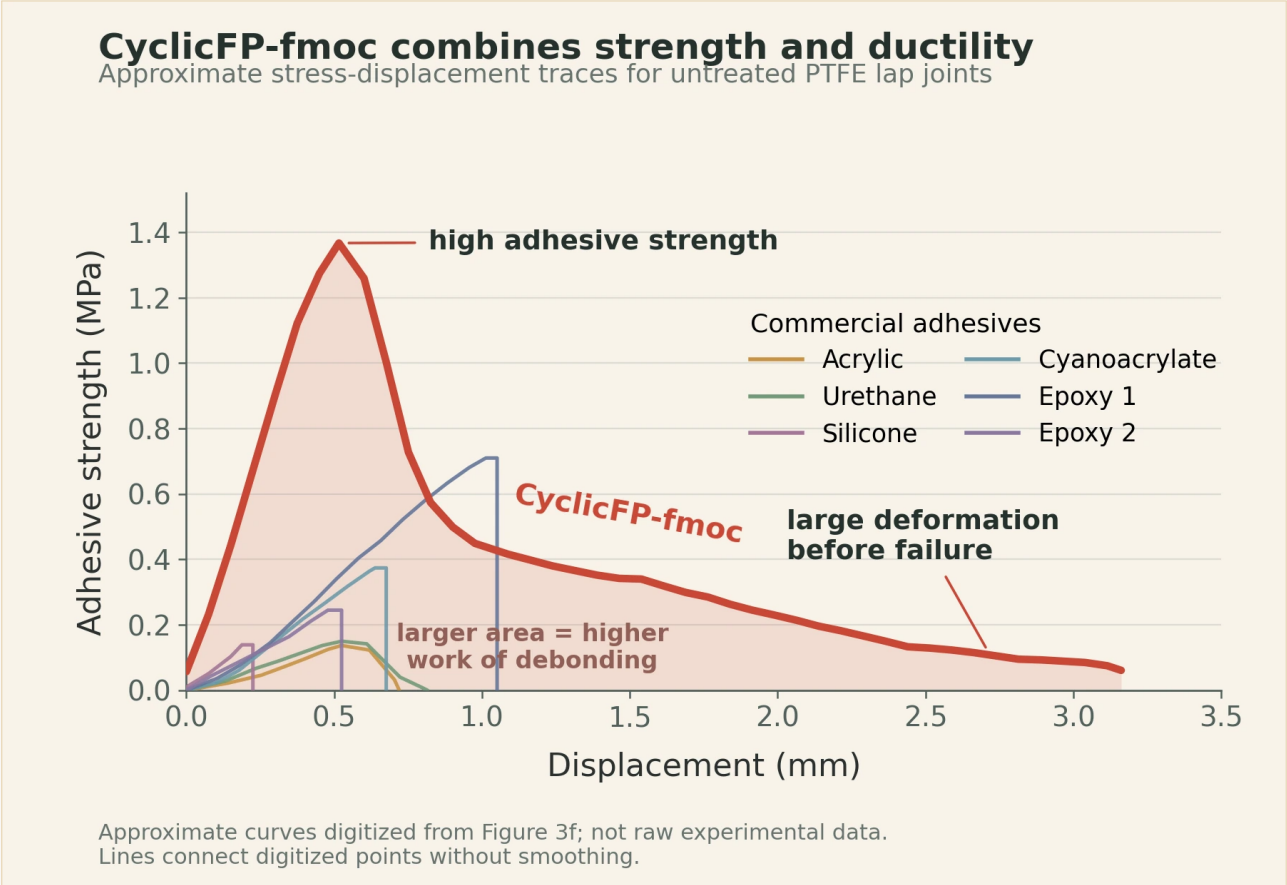
La mejor variante no fue la molécula principal. Una molécula relacionada con tres grupos fmoc,

CyclicFP-fmoc3, alcanzó **2,3 ± 0,2 MPa** sobre PTFE. El artículo sigue centrando gran parte de la atención en CyclicFP-fmoc porque ofrece la combinación completa de resistencia, ductilidad, evidencia mecanística y retirada mediante limpieza.

La ductilidad es la segunda mitad de la afirmación

La resistencia por sí sola no bastaría. Un adhesivo frágil puede alcanzar una tensión máxima elevada y después fallar de golpe. La afirmación más distintiva del artículo es que CyclicFP-fmoc también se comporta de forma dúctil.

En las curvas de cizallamiento por solape, CyclicFP-fmoc alcanzó su tensión máxima y después fue perdiendo tensión gradualmente mientras continuaba el desplazamiento. Los adhesivos comerciales probados en el artículo se comportaron más como uniones frágiles: el fallo se produjo poco después de su tensión máxima.



CyclicFP-fmoc combina un pico elevado de tensión con una larga cola posterior al pico; el área sombreada es una guía editorial de su mayor trabajo de despegado. Curvas aproximadas digitalizadas a partir de la Figura 3f; no son datos experimentales brutos.

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

Los autores cuantificaron el área bajo esa curva tensión-desplazamiento como trabajo de despegado.

CyclicFP-fmoc dio **1300 N/m** sobre PTFE. Los adhesivos comerciales probados se situaron entre **26 y 314 N/m**.

El modo de fallo concuerda con esta interpretación. Las uniones de PTFE con CyclicFP-fmoc fallaron de manera cohesiva, dentro del propio adhesivo. Esto implica que el adhesivo podía disipar energía deformándose internamente, mientras que la interfaz con PTFE seguía siendo más fuerte que la capa adhesiva en volumen dentro de estas pruebas.

Los experimentos de relajación de tensiones añaden la escala temporal molecular. A 20 C, el tiempo de relajación característico fue de **60 ms**, y el análisis de Arrhenius produjo una energía de activación de **33,8 kJ/mol**. En términos sencillos, la capa adhesiva puede reorganizarse lo bastante deprisa como para suavizar una concentración repentina de tensión en lugar de comportarse como un sólido frágil estático.

Por qué creen los autores que importa el flúor

El PTFE está formado por enlaces carbono-flúor. CyclicFP-fmoc contiene grupos fluorados de éter corona. Los autores sostienen que las **interacciones F-F** ayudan al adhesivo a unirse al PTFE, mientras que otras interacciones ayudan a que la capa adhesiva permanezca cohesionada y se deforme.

Varios experimentos de control apuntan en esa dirección. Cuando se sustituyeron por hidrógeno los átomos de flúor de CyclicFP-fmoc, el CyclicP-fmoc resultante se unió al PTFE con mucha menor fuerza, alrededor de **0,1 ± 0,0 MPa**. Un fosfato de fluoroéter lineal, AcyclicFP-fmoc, alcanzó solo **0,3 ± 0,1 MPa**. Las variantes sin unidades de apilamiento pi o sin unidades de enlace de hidrógeno también rindieron peor.

El artículo utiliza después espectroscopia y estructura cristalina para respaldar la imagen de interacciones. En un cristal de CyclicFP-fmoc, los átomos de flúor de moléculas vecinas están separados entre **2,49 y 2,91 ångströms**, menos que la suma de van der Waals de **2,94 ångströms** para dos átomos de flúor. La FT-IR y la RMN de temperatura variable respaldan enlaces de hidrógeno, interacciones F-F y apilamiento pi-pi dentro del adhesivo amorfo.

De forma más directa para el PTFE, los espectros de **RMN MAS de 19F** en estado sólido se desplazan cuando CyclicFP-fmoc se mezcla con nanopartículas de PTFE o láminas finas de PTFE. El control no fluorado no produce el mismo desplazamiento. Es una prueba, no solo un esquema de diseño, de que las partes fluoradas del adhesivo interactúan con el PTFE.

Aun así, no debería simplificarse como «los enlaces F-F resuelven el PTFE». El propio modelo del artículo tiene más capas: las interacciones F-F interfaciales ayudan a la adhesión al PTFE, mientras que los enlaces de hidrógeno y el apilamiento pi-pi contribuyen a la cohesión y ductilidad dentro del adhesivo.

La retirada con una limpieza es real, pero está delimitada

El resultado de retirada es el gancho práctico. Los autores lavaron con etanol placas de PTFE ya separadas y comunican la eliminación completa de CyclicFP-fmoc sin residuos en su demostración. También recuperaron adhesivo y lo reutilizaron repetidamente, manteniendo una resistencia adhesiva de aproximadamente **1,2 ± 0,1 MPa** en las pruebas de reutilización.

Esto importa porque los adhesivos fuertes convencionales suelen ser difíciles de retirar limpiamente. Un pegamento capaz de sujetar PTFE y después eliminarse mediante lavado sería útil para reparación, desmontaje y reutilización.

Pero la frontera importa. El artículo prueba muestras controladas, no todas las superficies industriales contaminadas, uniones envejecidas, exposiciones a disolventes o condiciones de envejecimiento a largo plazo. La retirada con etanol de placas de PTFE no equivale a demostrar un proceso completo de reciclaje para conjuntos fabricados con muchos materiales.

El artículo también afirma que CyclicFP-fmoc no es una «sustancia química eterna» PFAS. Esa afirmación no debería ampliarse hasta convertirla en una evaluación completa del riesgo ambiental. Persistencia, toxicidad, escala de fabricación, vías de liberación y regulación son cuestiones independientes.

Lo que esto no demuestra

- **No** muestra un producto adhesivo listo para el mercado.
- **No** demuestra que ahora pueda pegarse PTFE de forma fiable en cualquier entorno industrial sin preparación superficial.
- **No** demuestra que la retirada con etanol funcione igual de bien en todos los sustratos, estados superficiales o uniones envejecidas.
- **No** demuestra que las interacciones F-F expliquen por sí solas la adhesión. El mecanismo del artículo combina F-F, enlaces de hidrógeno y apilamiento pi-pi.
- **No** muestra un flujo completo de reciclaje de plásticos.
- **No** establece un perfil completo de seguridad ambiental o toxicológica de las moléculas adhesivas.
- **No** significa que los adhesivos comerciales sean peores en general. Las comparaciones son específicas de los materiales y del montaje de cizallamiento por solape sobre PTFE probados en el artículo.

¿Qué solidez tiene el resultado?

Para un artículo de materiales de laboratorio, el resultado es sólido porque los autores hacen algo más que comunicar una cifra elevada. Prueban resistencia, ductilidad, durabilidad durante 30 días, tolerancia al agua, readhesión repetida, retirada con etanol, variantes moleculares y evidencia espec-

troscópica de las interacciones propuestas.

La combinación más persuasiva es el modo de fallo junto con los controles. Si la interfaz con PTFE hubiera fallado primero, la afirmación sería más débil. En cambio, la unión falla dentro de la capa adhesiva. Y cuando se elimina o modifica la estructura cíclica fluorada, la adhesión al PTFE disminuye con fuerza.

Las preguntas restantes son la escala y el caso de uso. Las pruebas de cizallamiento por solape son estandarizadas y útiles, pero las uniones reales sufren pelado, impactos, fatiga, contaminación, ciclos de temperatura y materiales mixtos. Una molécula que funciona muy bien entre placas controladas de laboratorio todavía debe convertirse en una formulación, un proceso y un conjunto de datos de durabilidad antes de ser un adhesivo de ingeniería.

Por qué importa

El PTFE se encuentra en una frontera incómoda de los materiales. Su inercia es la característica que lo vuelve valioso, y esa misma característica dificulta integrarlo en conjuntos reparables o reciclables.

Este artículo ofrece una ruta químicamente específica, no basada en la fuerza bruta. En lugar de rugosizar o atacar químicamente la superficie del PTFE, diseña una molécula pequeña capaz de interactuar con esa superficie mientras mantiene una capa adhesiva dúctil y reversible.

Si esa lógica de diseño se generaliza, podría ayudar a construir adhesivos más fáciles de retirar y reutilizar sin renunciar a todo el rendimiento mecánico. Esa es la verdadera promesa: no una molécula como pegamento terminado, sino una estrategia molecular para una adhesión fuerte, dúctil y desmontable.

En pocas palabras

Kikkawa, Goswami y sus colegas describen moléculas pequeñas de fosfato de fluoroéter corona como adhesivos para PTFE y otros sustratos. La molécula principal, CyclicFP-fmoc, unió placas de PTFE sin tratar con 1,3 ± 0,1 MPa en pruebas de cizallamiento por solape, falló de forma cohesiva y no en la interfaz con el PTFE, mostró un trabajo de despegado de 1300 N/m, conservó el rendimiento después del almacenamiento y la readhesión repetida y pudo retirarse de placas de PTFE lavándolas con etanol. Una variante relacionada alcanzó 2,3 ± 0,2 MPa. La espectroscopia y las moléculas de control respaldan un mecanismo en el que las interacciones F-F ayudan a la interfaz con PTFE, mientras que los enlaces de hidrógeno y el apilamiento pi-pi ayudan a la capa adhesiva a disipar tensiones. El resultado es una demostración de laboratorio prometedora de adhesión fuerte, dúctil y retirable del PTFE, pero todavía no un pegamento comercial, una solución universal de reciclaje ni una evaluación completa de seguridad ambiental.

Fuentes

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