The Clean Paper

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

एक छोटे molecule ने untreated PTFE को जोड़ा, फिर ethanol से धुल गया

JACS paper fluoro-crown ether phosphate adhesives report करता है जो laboratory lap-shear tests में notoriously inert PTFE से जुड़ते हैं और ethanol washing से हटाए जा सकते हैं। CyclicFP-fmoc untreated PTFE पर 1.3 MPa तक पहुँचा और related variant 2.3 MPa तक। यह promising materials result है, अभी commercial glue, universal recycling fix या complete environmental-safety assessment नहीं।

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 पर चीज़ें चिपकना कठिन है — और इसकी वजह है

पॉलीटेट्राफ़्लुओरोएथिलीन, जिसे आम तौर पर PTFE कहा जाता है और जो Teflon जैसे व्यापारिक नामों से भी बिकता है, कुछ हद तक इसलिए उपयोगी है क्योंकि वह आसानी से किसी चीज़ के साथ क्रिया नहीं करता। उसकी सतह ही ऊर्जा कम होती है। कई तरल उस पर बूँदें बनाकर रह जाते हैं और कई गोंद तब तक नहीं पकड़ते जब तक सतह को रासायनिक रूप से एच या खुरदरा न किया जाए, प्लाज़्मा उपचार न दिया जाए या कोई खास प्राइमर न लगाया जाए।

यही प्रतिरोध नॉन-स्टिक कोटिंग और रासायनिक रूप से निष्क्रिय पुर्ज़ों के लिए बहुत उपयोगी है। लेकिन जब इंजीनियर PTFE को किसी दूसरी चीज़ से जोड़ना चाहते हैं और सतह को स्थायी तौर पर भी नहीं पहुँचाना चाहते, तब यही गुण समस्या बन जाता है।

Journal of American Chemical Society में प्रकाशित एक शोधपत्र इस समस्या को असामान्य दिशा से हल करने की कोशिश करता है। Kohei Kikkawa, Abir Goswami और उनके सहयोगियों ने fluoro-crown ether phosphate नाम के छोटे अणुओं का वर्णन किया है, जो बिना उपचार किए PTFE से मजबूती से चिपक सकते हैं, टूटने से पहले लचीले ढंग से विकृत हो सकते हैं और बाद में एथेनॉल से धोकर PTFE प्लेटों से हटाए जा सकते हैं।

मुख्य अणु का नाम **CyclicFP-fmoc** है। लैप-शियर परीक्षणों में इसने बिना उपचार वाली PTFE प्लेटों को **1.3 ± 0.1 MPa** की चिपकने की मजबूती और **1300 N/m** के अलग करने के कार्य के साथ जोड़े रखा। क्योंकि 1 MPa बराबर 1 न्यूटन प्रति वर्ग मिलिमीटर होता है, 1.3 MPa का अधिकतम तनाव लगभग उस दबाव के बराबर है जो हर वर्ग मिलिमीटर पर 130 ग्राम के सेब के वजन से पड़े। यह केवल प्रति-क्षेत्रफल इकाई समझने की तुलना है; इससे परीक्षण नमूने पर लगी वास्तविक बल या संपर्क-ज्यामिति नहीं मिलती। 1300 N/m का अलग करने का कार्य प्रति वर्ग मीटर 1300 जूल पृथक्करण ऊर्जा के बराबर है। सीधे दृश्य प्रदर्शन के लिए — इंजीनियरिंग भार-रेटिंग के रूप में नहीं — शोधपत्र में 7 cm^2 का जोड़ 8 kg वजन संभालता दिखाया गया है। जोड़ PTFE इंटरफेस पर नहीं, एडहेसिव परत के भीतर टूटा। यह महत्वपूर्ण है, क्योंकि इन परीक्षणों में इंटरफेस कमजोर कड़ी नहीं था।

शोधपत्र कीउस तस्वीर पर आधारित पेंसिल चित्र जिसमें एडहेसिव पट्टीलटकाहुआ वजन संभाल रहीहै (Figure 2, left)। यह मूल फोटोग्राफ़, मानसुसार बनायागयाचित्र याइंजीनियरिंग भार-रेटिंग आरेख नहींहै।

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

इसकाअर्थ यह नहींकि “PTFE कीसमस्याहल होगई।” यह नियंत्रित प्रयोगशालामें कियागयासामग्रीनतीजाहै। लेकिन यह एक कठिन संयोजन कासाफ़ उदाहरण है: मजबूत चिपकाव, लचीलीवफिलताऔर ऐसीसतह से साफ़ हटायाजासकनाजो चिपकाव कावरिोध करने के लिए जानीजातीहै।

मजबूतीऔर आसानीसे हटनाअक्सर एक-दूसरे से क्योंटकराते हैं

एडहेसिव में आम तौर पर समझौताकरनापड़ताहै। कठोर, क्रॉस-लिंक्ड पॉलिमर गोंद मजबूत होसकते हैं, लेकिन वे अचानक टूट सकते हैं और उन्हें साफ़-साफ़ हटानाकठिन होताहै। नरम, टेप-जैसे एडहेसिव खिंच सकते हैं और ऊर्जासोख सकते हैं, लेकिन आम तौर पर उतने मजबूत नहींहोते।

यह समझौताआणविक स्तर पर पैदाहोताहै। मजबूतीके लिए तनाव काप्रभावीस्थानांतरण चाहिए। लचक के लिए अणुओं की गति, पुनर्व्यवस्थाऔर ऊर्जाकाअपव्यय चाहिए। आसानीसे हटने के लिए ऐसे बंधन चाहिए जिन्हें सब्सट्रेट कोनष्ट किए बिनातोड़ाजासके। ये माँगें अलग-अलग दिशाओं में खींचतीहैं।

छोटे-अणु वाले एडहेसिव आकर्षक हैं क्योंकि सिद्धांततः उन्हें हटाया और दोबारा इस्तेमाल किया जा सकता है। वे उन लंबे, उलझे पॉलिमर जालों का निर्माण नहीं करते जो कई पारंपरिक गोंदों को मजबूत और टूटने से पहले ऊर्जा सोखने योग्य बनाते हैं। लेकिन यही उनकी कमजोरी भी है: अणुओं के आपस में उलझने के बिना छोटे अणुओं से एक साथ लचीला और बहुत मजबूत चिपकने वाला पदार्थ बनाना अत्यंत कठिन होता है।

JACS शोधपत्र पॉलिमर के उलझने की जगह उलट सकने वाली गैर-सहसंयोजक अंतर्क्रियाओं का संयोजन इस्तेमाल करने की कोशिश करता है। अणु में फ्लोरीनयुक्त crown-ether phosphate क्षेत्र और urethane से जुड़ा fmoc समूह है। सरल भाषा में, उसका फ्लोरीनयुक्त छल्ला फ्लोरीन-समृद्ध PTFE सतह से अंतर्क्रिया कर सकता है, urethane समूह पास के एडहेसिव अणुओं के साथ हाइड्रोजन बंध बना सकते हैं, और सपाट fluorenyl समूह एक-दूसरे के ऊपर जम सकते हैं। लक्ष्य किसी एक “जादुई” बंधन पर निर्भर होना नहीं, बल्कि कई कमजोर और उलट सकने वाली अंतर्क्रियाओं को साथ काम करना है:

- PTFE के पास फ्लोरीन-फ्लोरीन अंतर्क्रियाएँ;
- एडहेसिव अणु के बीच हाइड्रोजन बॉन्डिंग;
- fluorenyl समूहों के बीच pi-pi stacking;
- और इतनी आणविक गतिशीलता कि तनाव सीधे दरार बनने के बजाय कुछ हद तक ढीला पड़ सके।

PTFE के मुख्य परीक्षण ने क्या दिखाया

लेखकों ने CyclicFP-fmoc को ऐसी PTFE प्लेटों के बीच रखा जिन्हें न सतह-उपचार दिया गया था, न साफ़ किया गया था; एडहेसिव को गरम किया और परीक्षण से पहले प्लेटों को कमरे के तापमान पर 10 मिनट छोड़ा।

मात्रात्मक परीक्षण के लिए उन्होंने लैप-शियर इस्तेमाल किया। CyclicFP-fmoc से जुड़ी PTFE प्लेटें **1.3 ± 0.1 MPa** तनाव तक पहुँचीं; यह तीन मापों के औसत ± मानक विचलन के रूप में रिपोर्ट किया गया। एडहेसिव को हेयर ड्रायर से लगभग **50 C** पर लगाने पर भी **1.1 ± 0.1 MPa** मिला, यानी इसे केवल बहुत ऊँचे तापमान पर पिघलाना ज़रूरी नहीं था।

लेखकों ने उसी PTFE लैप-शियर व्यवस्था में व्यावसायिक epoxy, acrylic, silicone और urethane एडहेसिव की तुलना की। इन नियंत्रणों ने लगभग **0.1 से 0.7 MPa** हासिल किया, जबकि CyclicFP-fmoc **1.3 ± 0.1 MPa** तक पहुँचा। एक ही सब्सट्रेट और एक ही विधि में की गई यह तुलना अलग-अलग सामग्रियों और परीक्षण-जंत्रियों से MPa मान उठाकर कोई क्रम-सूची बनाने से अधिक अर्थपूर्ण है।

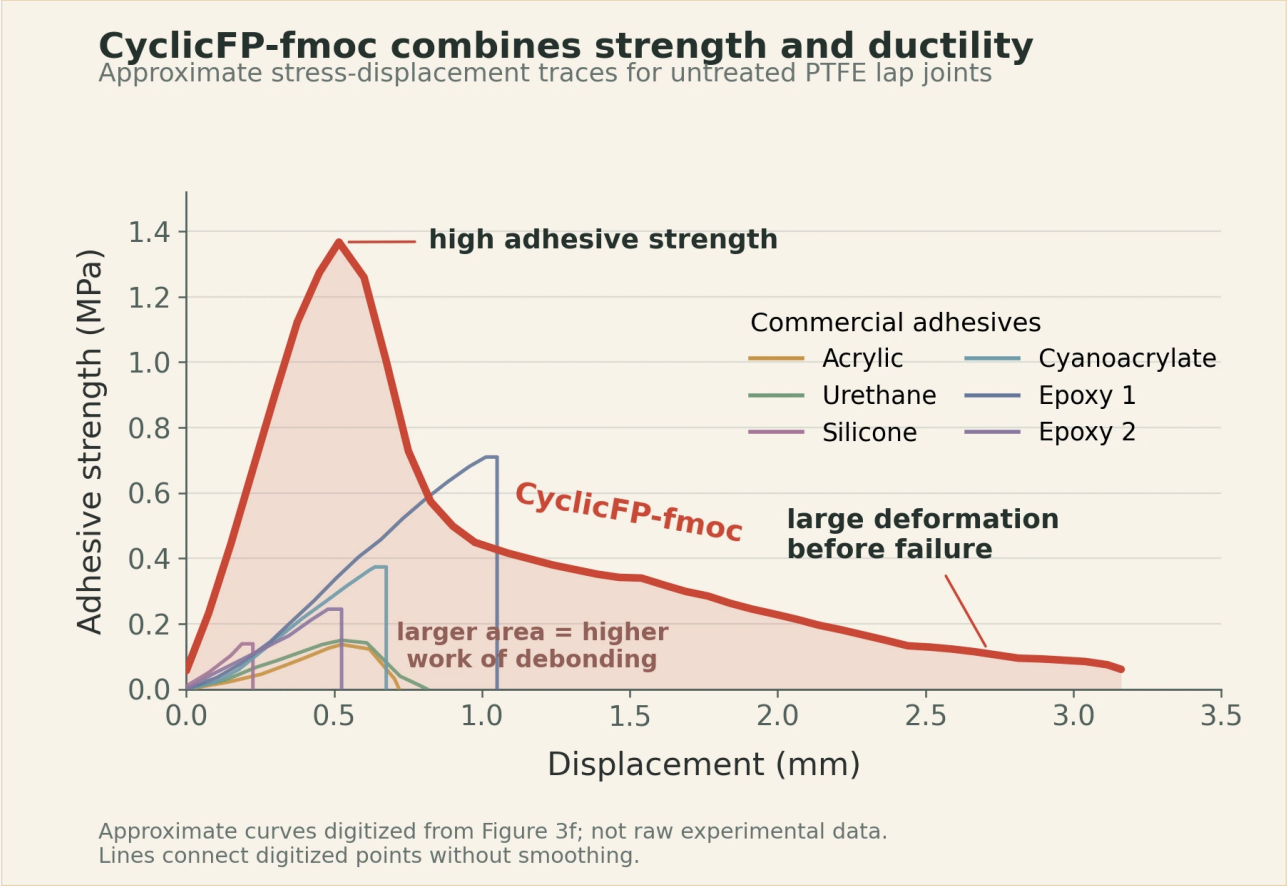
भंडारण के बाद संख्या लगभग वही रही। सामान्य वातावरण में 30 दिन रखने पर एडहेसिव मजबूती **1.3 ± 0.2 MPa** थी। प्लेटों को बलपूर्वक अलग करके, फिर एक-दूसरे पर चढ़ाकर और दोबारा गरम करने के बाद **1.2 ± 0.2 MPa** मिला। यह चक्र दस बार दोहराने के बाद भी मजबूती लगभग **1.3 ± 0.3 MPa** रही।

सबसे मजबूत वेरिएंट मुख्य अणु नहीं था। तीन fmoc समूह वाले संबंधित अणु **CyclicFP-fmoc3** ने PTFE पर **2.3 ± 0.2 MPa** हासिल किया। फिर भी शोधपत्र CyclicFP-fmoc पर ज़्यादा ध्यान देता है, क्योंकि उसमें मजबूती, लचक, तंत्र के पक्ष में साक्ष्य और साफ़ हटाए जा सकने का पूरा संयोजन दिखाया गया।

दूसरा आधा हिस्सा लचक है

केवल मजबूती काफ़ी नहीं होती। भंगुर एडहेसिव ऊँचे चरम तनाव तक पहुँचकर अचानक टूट सकता है। शोधपत्र का अधिक विशिष्ट दावा यह है कि CyclicFP-fmoc तनाव, यानी टूटने से पहले काफ़ी विकृत हो सकने वाले, तरीके से भी व्यवहार करता है।

लैप-शियर वक्रोंमें CyclicFP-fmoc अधिकतम तनाव तक पहुँचाऔर विस्थापन बढ़ते रहने पर तनाव धीरे-धीरे कम हुआ। शोधपत्र में परखे गए व्यावसायिक एडहेसिव अधिक भंगुर जोड़ की तरह व्यवहार करते थे: उनकीविफलताचरम तनाव के तुरंत बाद आ गई।



CyclicFP-fmoc में ऊँचाचरम तनाव और उसके बाद लंबी, धीरे-धीरे गिरतीपूँछ दोनोंदिखते हैं; छायांकित क्षेत्रफल बड़े अलगाव-कार्य कोसमझने के लिए संपादकीय संकेत है। वक्र Figure 3f कालगभग कियागयाडिजिटलीकरण हैं, मूल प्रयोगिक डेटानहीं।

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

लेखकोंने तनाव-विस्थापन वक्र के नीचे के क्षेत्रफल कोअलगाव-कार्य के रूप में मापा। PTFE पर CyclicFP-fmoc कामान 1300 N/m था। परखे गए व्यावसायिक एडहेसिव 26 से 314 N/m के बीच रहे।

विफलताकातरीकाभीइस व्याख्यासे मेल खाताहै। CyclicFP-fmoc वाले PTFE जोड़ में संसंजक विफलताहुई, यानीटूटन एडहेसिव के भीतर हुई। इसकाअर्थ है कि एडहेसिव परत अंदर विकृत होकर ऊर्जाकाअपव्यय कर सकी, जबकि इन परीक्षणोंमें PTFE इंटरफेस पूरीएडहेसिव परत से अधिक मजबूत रहा।

तनाव-रिलैक्सेशन प्रयोग आणविक समय-पैमानाभीबताते हैं। 20 °C पर विशिष्ट रिलैक्सेशन समय 60 ms थाऔर Arrhenius विश्लेषण ने 33.8 kJ/mol सक्रियण ऊर्जादी। सरल शब्दोंमें, एडहेसिव परत इतनीतेजीसे पुनर्व्यवस्थित होसकतीहै कि अचानक जमातनाव कोकुछ नरम कर सके, बजाय पूरीतरह स्थिर भंगुर ठोस कीतरह व्यवहार करने के।

लेखक क्योंमानते हैं कि फ्लोरीन महत्वपूर्ण है

PTFE कार्बन-फ्लोरीन बॉन्ड से बनाहै। CyclicFP-fmoc में फ्लोरीनयुक्त crown-ether समूह हैं। लेखकोंकातर्क है कि **F-F अंतर्क्रियाएँ** एडहेसिव कोPTFE से जुड़ने में मदद करते हैं, जबकि दूसरीअंतर्क्रियाएँ एडहेसिव परत कोएक साथ रखने और विकृत होने में मदद करतीहैं।

कई नियंत्रण प्रयोग इस दिशामें संकेत देते हैं। जब CyclicFP-fmoc के फ्लोरीन परमाणु कोहाइड्रोजन परमाणु से बदला गया, तोबनाहुआ CyclicP-fmoc PTFE से बहुत कमजोर जुड़ा, लगभग **0.1 ± 0.0 MPa**। वैसेकि fluoro-ether phosphate AcyclicFP-fmoc केवल **0.3 ± 0.1 MPa** तक पहुँचा। Pi-stacking याहाइड्रोजन-बॉन्डिंग इकाइयोंसे रिक्त वेरिएंट ने भी खराब प्रदर्शन किया।

फिर शोधपत्र स्पेक्ट्रोस्कोपीऔर क्रिस्टल संरचनासे अंतर्क्रियामॉडल कोसमर्थन देताहै। CyclicFP-fmoc क्रिस्टल में पड़ोसीअणुओं के फ्लोरीन परमाणु **2.49 से 2.91 आंग्स्ट्रॉम** कीदूरीपर हैं, जोदोफ्लोरीन परमाणुओं के **2.94 आंग्स्ट्रॉम** van der Waals योग से कम है। FT-IR और बदलते तापमान पर किए गए NMR माप अमोर्फ एडहेसिव में हाइड्रोजन बॉन्डिंग, F-F अंतर्क्रियाएँ और pi-pi stacking के पक्ष में साक्ष्य देते हैं।

PTFE के लिए सबसे सीधे साक्ष्य में ठोस-अवस्था **19F MAS NMR** स्पेक्ट्रातब खिसकते हैं जब CyclicFP-fmoc को PTFE नैनोकण यापतलीPTFE शीट्स के साथ मिलायाजाताहै। गैर-फ्लोरीनयुक्त नियंत्रण में वहीबदलाव नहींदिखता। यह केवल डिज़ाइन काखाकानहीं, बल्कि इस बात कासाक्ष्य है कि एडहेसिव के फ्लोरीनयुक्त हिस्से PTFE से अंतर्क्रियाकरते हैं।

फिर भीइसे “F-F बॉन्ड ने PTFE कीसमस्याहल कर दी” कहनागलत होगा। शोधपत्र काअपनामॉडल अधिक परतदार है: इंटरफेस पर F-F अंतर्क्रियाएँ PTFE चिपकाव में मदद करतीहैं, जबकि हाइड्रोजन बॉन्डिंग और pi-pi stacking एडहेसिव के भीतर संसंजन और लचक में योगदान देतीहैं।

एथेनॉल से साफ़ हटनाअसलीहै, लेकिन उसकीसीमाहै

इसे हटाए जासकने कानतीजाइसकाव्यावहारिक आकर्षण है। लेखकोंने अलग कीगई PTFE प्लेटोंकोएथेनॉल से धोयाऔर अपने प्रदर्शन में CyclicFP-fmoc कोबिनाअवशेष के पूरीतरह हटने कीरिपोर्ट दी। उन्होंने एडहेसिव कोवाष्प प्राप्त करके बार-बार पुनउपयोग भीकियाऔर पुनउपयोग परीक्षण में लगभग **1.2 ± 0.1 MPa** एडहेसिव मजबूतीबनाए रखी।

यह महत्वपूर्ण है, क्योंकि पारंपरिक मजबूत एडहेसिव कोसाफ़-साफ़ हटानाअक्सर कठिन होताहै। ऐसागोंद जोPTFE को पकड़ सके और बाद में धोकर हटायाजासके, मरम्मत, खोलकर अलग करने और पुनउपयोग के लिए उपयोगीहोसकताहै।

लेकिन सीमामहत्वपूर्ण है। शोधपत्र नियंत्रित नमूनोंकापरीक्षण करताहै, न कि हर दूषित औद्योगिक सतह, मौसम झेल चुके जोड़, वलियक के संपर्क यालंबे समय कीपुरानीअवस्थाका। PTFE प्लेटोंपर एथेनॉल से साफ़ हटनादिखाना कई सामग्रियोंसे बनीअसेंबलीके लिए पूरीपुनर्चक्रण प्रक्रियासाबित करने जैसानहींहै।

शोधपत्र यह भीकहताहै कि CyclicFP-fmoc कोई PFAS “forever chemical” नहींहै। इस कथन कोपूर्ण पर्यावरणीय-जोखिम आकलन में बदलनाठीक नहींहोगा। स्थायित्व, विषाक्तता, उत्पादन कापैमाना, पर्यावरण में निकलने के रास्ते और विनियमन अलग प्रश्न हैं।

यह क्यासाबित नहींकरता

- यह **नहीं**दखिताकि बाज़ार के लिए तैयार एडहेसिव उत्पाद बन चुकाहै।
- यह **नहीं**साबित करताकि अब PTFE कोहर औद्योगिक परिस्थिति में सतह कीतैयारीके बिनाभरोसेमंद ढंग से चिपकाया जासकताहै।
- यह **नहीं**दखिताकि एथेनॉल से हटनाहर सब्सट्रेट, सतह कीस्थिति यापुरसे जोड़ पर समान रूप से काम करेगा।
- यह **नहीं**साबित करताकि चिपकाव कोकेवल F-F अंतर्क्रियाओं से समझायाजासकताहै। शोधपत्र कातंत्र F-F, हाइड्रोजन बॉन्डिंग और pi-pi stacking कासंयोजन है।
- यह **नहीं**दखिताकि प्लास्टिक पुनर्चक्रण कीपूरीप्रक्रियातैयार है।
- यह एडहेसिव अणु कीपूरीपर्यावरणीय यावषि-विज्ञान संबंधीसुरक्षाप्रोफ़ाइल स्थापित **नहीं**करता।
- इसकाअर्थ यह भी**नहीं**कि विश्लेषणकिए एडहेसिव समान्यतःखराब हैं। तुलनाकेवल इस शोधपत्र में परखीगई सामग्रियों और PTFE लैप-शियर व्यवस्थाके लिए है।

परिणाम कितनामजबूत है?

एक प्रयोगशालासामग्रीशोधपत्र के लिए परिणाम मजबूत है, क्योंकि लेखक केवल एक ऊँचीसंख्यारिपोर्ट नहींकरते। वे मजबूती, लचक, 30 दिनोंकीटकिाऊपन, पानीसहने कीक्षमता, बार-बार दोबाराचिपकाना, एथेनॉल से हटना, आणविक वेरिएंट और प्रस्तावित अंतर्क्रियाओं के पक्ष में स्पेक्ट्रोस्कोपिक साक्ष्य — सभीकापरीक्षण करते हैं।

सबसे प्रभावशालीसंयोजन विफलताके तरीके और नियंत्रणोंकाहै। अगर PTFE इंटरफेस पहले टूटता, तोदबावकमजोर होता। इसके बजाय जोड़ एडहेसिव परत के भीतर टूटताहै। और जब फ्लोरीनयुक्त चक्रीय संरचनाहटई याबदलीजातीहै, तोPTFE चिपकाव तेजीसे गिरताहै।

बचे हुए प्रश्न पैमाने और उपयोग के हैं। लैप-शियर परीक्षण मानकीकृत और उपयोगीहैं, लेकिन वास्तविक जोड़ कोउखाड़ने वाले बल, आघात, थकान, दूषण, तापमान चक्र और मिलीजुलीसामग्रियोंकासामनाकरनापड़ताहै। नियंत्रित प्रयोगशाला प्लेटोंके बीच सुंदर ढंग से काम करने वाले अणु कोइंजीनियरिंग एडहेसिव बनने से पहले फॉर्मुलेशन, प्रक्रियाऔर टिकाऊपन के बड़े डेटासमूह में बदलनापड़ेगा।

यह क्योमायने रखताहै

PTFE सामग्रीविज्ञान कीएक कठिन सीमापर बैठताहै। उसकीरासायनिक निष्क्रियताहीगुण है जोउसे मूल्यवान बनाता है, और वहीगुण उसे मरम्मत योग्य यापुनर्चक्रण योग्य असेंबलीमें जोड़नाकठिन बनाताहै।

यह शोधपत्र कठोर सतह-उपचार के बजाय रासायनिक रूप से विशिष्ट रास्तासुझाताहै। PTFE कीसतह कोखुरदराकरने या रासायनिक रूप से क्षतिग्रस्त करने कीजगह यह ऐसाछोटाअणु डिज़ाइन करताहै जोउस सतह से अंतर्क्रियाकर सके और साथ हीलचीली, उलट सकने वालीएडहेसिव परत बनाए रखे।

यदि यह डिज़ाइन तर्क दूसरे तंत्रोंपर भीलागू होताहै, तोऐसे एडहेसिव बनाने में मदद मिल सकतीहै जिन्हें यांत्रिक प्रदर्शन पूरीतरह गँवाए बिनाहटानाऔर दोबाराइस्तेमाल करनाआसान हो। असलीसंभावनाकिसीएक अणु के तैयार गोंद बनने में नहीं, बल्कि मजबूत, लचीले और जरूरत पर अलग किए जासकने वाले चिपकाव कीआणविक रणनीति में है।

साफ़ सारांश

Kikkawa, Goswami और उनके सहयोगियोंने PTFE और दूसरे सब्सट्रेट के लिए fluoro-crown ether phosphate छोटे अणुओं कोएडहेसिव के रूप में रिपोर्ट किया। मुख्य अणु CyclicFP-fmoc ने बनिाउपचार वालीPTFE प्लेटोंकोलैप-शियर परीक्षण में 1.3 ± 0.1 MPa पर जोड़ा PTFE इंटरफेस पर नहींबल्कि एडहेसिव के भीतर संसंजक विफलतादिखाई, 1300 N/m अलगाव-कार्य दिया, भंडारण और बार-बार दोबाराचिपकाने के बाद प्रदर्शन बनाए रखाऔर एथेनॉल से धोकर PTFE से हटायाजासका। एक संबंधित वेरिएंट 2.3 ± 0.2 MPa तक पहुँचा। स्पेक्ट्रोस्कोपीऔर नियंत्रण अणु उस तंत्र कासमर्थन करते हैं जिसमें F-F अंतर्क्रियाएँ PTFE इंटरफेस पर मदद करतीहैं, जबकि हाइड्रोजन बॉन्डिंग और pi-pi stacking एडहेसिव परत कोतनाव काअपव्यय करने में मदद करतीहैं। यह PTFE पर मजबूत, लचीले और साफ़ हटाए जासकने वाले चिपकाव काआशाजनक प्रयोगशालाप्रदर्शन है — अभीव्यावसायिक गोंद, सार्वभौमिक पुनर्चक्रण समाधान यापूरा पर्यावरणीय-सुरक्षाआकलन नहीं।

स्रोत

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