



The CLEAN PAPER

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

ایک چھوٹے سالے نے PTFE untreated کو مضبوطی سے جوڑا، پھر ethanol سے دھل گیا

ایک JACS مقالہ phosphate ether fluoro-crown چپکنے والے مادے کی رپورٹ دیتا ہے جو تجربہ گاہ lap-shear جانچیں میں مشہور طور پر غیر فعال PTFE کو جوڑتے ہیں اور ethanol سے دھو کر ہٹائے بھی جاسکتے ہیں۔ CyclicFP-fmoc نے PTFE untreated پر لچک دار cohesive ناکافی کے ساتھ 3.1 MPa حاصل کیا، جبکہ متعلقہ 3.2 MPa variant تک پہنچا۔ طریقہ کار کی حمایت PTFE پر فلورین-فلورین تعاملات اور چپکنے والا مادہ کے اندر ہائیڈروجن بندش و pi-stacking کے spectroscopic شواہد سے ہوتی ہے۔ یہ امید افزا مواد نتیجہ ہے، ابھی fix recycling universal glue، commercial یا مکمل حفاظت-assessment environmental نہیں۔

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: 6c07886.jacs/1021.10

PTFE سے چیزیں چپکانا مشکل ہے، اور اس کی ایک اچھی وجہ ہے

Polytetrafluoroethylene، جسے عموماً PTFE کہا جاتا ہے اور Teflon سمیت مختلف تجارتی ناموں سے فروخت کیا جاتا ہے، جزوی طور پر اسی لیے مفید ہے کہ اس کی سطح دوسری چیزوں کے ساتھ آسانی سے تعامل نہیں کرتی۔ اس کی سطح توانائی کم ہے۔ بہت سے مائع اس پر قطرے بنالیتے ہیں۔ بہت سی گوندیں اس وقت تک ناکام رہتی ہیں جب تک سطح کو roughen etch یا علاج-plasma نہ دیا جائے یا کوئی مخصوص primer استعمال نہ ہو۔

یہ مزاحمت coatings nonstick اور کیمیائی طور پر غیر فعال حصوں کے لیے بہت اچھی ہے۔ مسئلہ تب بنتا ہے جب انجینئر PTFE کو کسی دوسرے حصے سے جوڑنا چاہتے ہیں مگر سطح کو مستقل نقصان نہیں پہنچانا چاہتے۔

جریدہ American the of کیمیائی Society میں شائع ایک مقالہ اس مسئلے کو غیر معمولی رخ سے حل کرنے کی کوشش کرتا ہے۔ Goswami Abir Kikkawa، Kohei اور phosphate ether fluoro-crown کے چھوٹے سالمات بیان کرتے ہیں جو بغیر پیشگی علاج کے PTFE سے مضبوطی سے چپک سکتے ہیں، ٹوٹنے سے پہلے لچک دار انداز میں بگڑتے ہیں، اور بعد میں PTFE پلیٹوں سے ethanol سے دھو کر ہٹائے جا سکتے ہیں۔

اہم سالمے کا نام CyclicFP-fmoc ہے۔ لیپ شیئر جانچیں میں اس نے بغیر پیشگی علاج کے PTFE پلیٹوں کو 1.0 ± 3.1 MPa چپکنے کی مضبوطی اور 1300 N/m جدا کرنے کا کام کے ساتھ جوڑے رکھا۔ چونکہ 1 MPa، 1 newton فی مربع ملی میٹر کے برابر ہے، 3.1 MPa کا peak تناؤ تقریباً ایسا دباؤ ہے جیسے ہر مربع ملی میٹر پر 130 گرام کے سیب کا وزن ہو۔ یہ صرف فی اکائی رقبہ سمجھانے کی مثال ہے، آزمائشی نمونے کی حقیقی قوت یا رابطہ جیومیٹری نہیں۔ رپورٹ شدہ 1300 N/m جدا کرنے کا کام فی مربع میٹر 1300 joules علیحدگی توانائی کے برابر ہے۔ انجینئرنگ rating load کے بجائے ایک براہ راست بصری نمونہ عمل میں مقالہ 7 cm^2 کا جوڑ 8 kg وزن سنبھالتے ہوئے دکھاتا ہے۔ جوڑ PTFE انٹرفیس پر نہیں بلکہ خود چپکنے والی تہ کے اندر ٹوٹا۔ یہ اہم ہے: اس آزمائش میں کمزور مقام انٹرفیس نہیں تھا۔



مقالے کی تصویر (شکل 2، بائیں) سے متاثرہ rendering pencil جس میں چپکنے والا مادہ strip معلق وزن اٹھا رہی ہے۔ یہ اصل photograph، drawing یا انجینئرنگ diagram load-rating کے مطابق پیمانے کے مطابق نہیں ہے۔

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

نتیجہ یہ نہیں کہ PTFE کا مسئلہ حل ہو گیا۔ یہ کنٹرول شدہ تجربہ گاہ مواد نتیجہ ہے۔ لیکن یہ ایک مشکل امتزاج کی واضح مثال ہے: مضبوط، adhesion، لچک دار ناکامی اور ایسی سطح سے صاف ہٹایا جانا جو چپکنے کی مزاحمت کے لیے مشہور ہے۔

عام طور پر مضبوطی اور آسانی سے ہٹایا جانا ایک دوسرے کے خلاف کیوں جاتے ہیں

چپکنے والے مادے عموماً کسی نہ کسی سمجھوتے پر قائم ہوتے ہیں۔ سخت وابستہ polymer cross-glues مضبوط ہو سکتی ہیں، مگر اکثر اچانک ٹوٹتی ہیں اور صاف ہٹانا مشکل ہوتا ہے۔ نرم tape-like چپکنے والے مادے کھینچ سکتی ہیں اور توانائی منتشر کر سکتی ہیں، مگر عموماً مضبوطی قربان کرتی ہیں۔

یہ trade-off سلامتی سطح پر ہے۔ مضبوطی کے لیے تناؤ کا مؤثر انتقال چاہیے۔ لچک پذیری کے لیے حرکت، دوبارہ ترتیب اور توانائی کے ضیاع کی گنجائش چاہیے۔ آسان اخراج کے لیے ایسے بندھن چاہیے جو سطح کو تباہ کیے بغیر توڑے جا سکیں۔ یہ تقاضے مختلف سمتوں میں کھینچتے ہیں۔

چھوٹے سالماتی چپکنے والے مادے دلچسپ ہیں کیونکہ اصولی طور پر انہیں ہٹایا اور دوبارہ استعمال کیا جا سکتا ہے۔ وہ وہ لمبے، الجھے polymer نیٹ ورکس نہیں بناتے جو بہت سی روایتی گوندوں کو toughness دیتے ہیں۔ یہی ان کی کمزوری بھی ہے: کوائٹم الجھاؤ کے بغیر چھوٹے سالمات عموماً لچک دار اور زیادہ adhesion strength دینے میں مشکل محسوس کرتے ہیں۔

JACS مقالہ polymer کوائٹم الجھاؤ کی جگہ interactions noncovalent reversible کی کئی تہیں استعمال کرنے کی کوشش کرتا ہے۔ سالمہ ایک phosphate crown-ether fluorinated حصے کو وابستہ-fmoc urethane گروہ کے ساتھ جوڑتا ہے۔ سادہ الفاظ میں، اس کا fluorine ring fluorinated سے بھرپور PTFE سطح کے ساتھ تعامل کر سکتا ہے، urethane گروہ پڑوسی چپکنے والا مادہ سالمات سے bonds hydrogen بنا سکتے ہیں، اور جیسے fluorenyl گروہ ایک دوسرے کے اوپر stack ہو سکتے ہیں۔ مقصد کسی ایک "جادوئی" bond پر انحصار نہیں، بلکہ کمزور اور interactions reversible کا ایک تعاون ہے:

- PTFE کے قریب فلورین-فلورین تعاملات؛
- چپکنے والا مادہ سالمات کے درمیان ہائیڈروجن بندش؛
- fluorenyl گروہ کے درمیان بائی-پائی تہہ بندی؛
- اور اتنی سالماتی mobility کہ تہ فوراً crack ہونے کے بجائے تناؤ کو relax کر سکے۔

مرکزی PTFE آزمائش نے کیا دکھایا

مصنفین نے CyclicFP-fmoc کو ایسی PTFE پلیٹوں کے درمیان رکھا جنہیں نہ سطح علاج دی گئی تھی نہ صاف کیا گیا تھا، چپکنے والا مادہ کو گرم کیا اور جانچ سے پہلے پلیٹوں کو کمرے کے درجہ حرارت پر 10 منٹ کے لیے چھوڑ دیا۔

مقداری جانچ کے لیے shear lap استعمال کیا گیا۔ CyclicFP-fmoc سے جڑی PTFE پلیٹوں نے کھنچاؤ کا تناؤ میں 1.0 ± 3.1 MPa حاصل کیا، جو تین پیمائشوں کے mean $\pm$ معیاری انحراف کے طور پر رپورٹ ہوا۔ dryer hair سے چپکنے والا مادہ کو تقریباً 50 C پر لگانے سے بھی ملتی جلتی قدر، 1.1 ± 1.0 MPa، ملی، یعنی صرف زیادہ-درجہ حرارت melting کی ضرورت نہیں تھی۔

مصنفین نے اسی PTFE لیپ شیٹر setup میں یہ قدریں تجارتی، epoxy، silicone acrylic اور urethane چپکنے والے مادے سے موازنہ کیں۔ ان کنٹرولز نے تقریباً 1.0 سے 7.0 MPa حاصل کیا، جبکہ CyclicFP-fmoc نے 1.0 ± 3.1 MPa۔ ایک ہی سطح اور ایک ہی طریقے کا یہ موازنہ مختلف مواد اور جانچ geometries کے MPa اعداد کو ایک عمومی ranking میں رکھنے سے کہیں زیادہ معنی خیز ہے۔

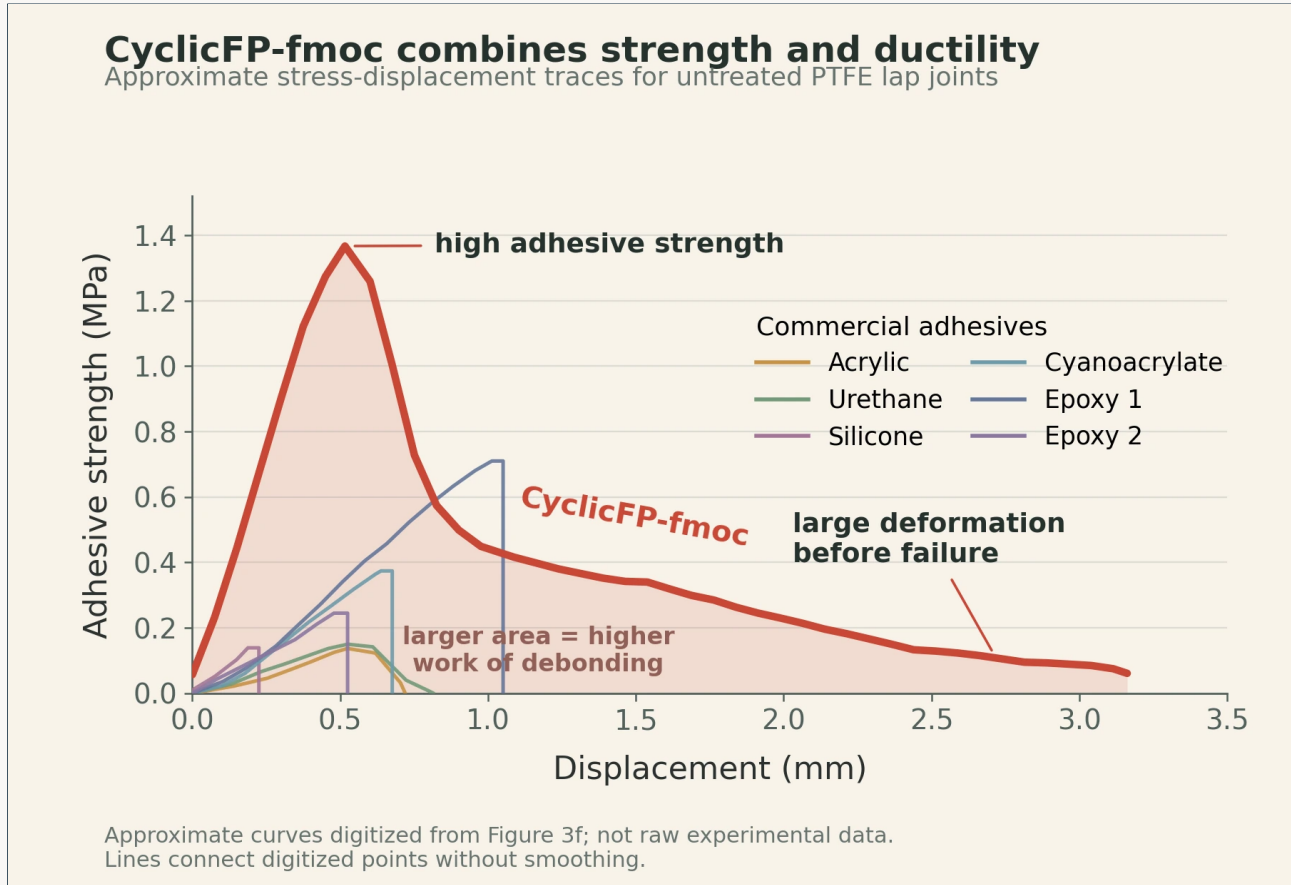
ذخیرہ کے بعد بھی عدد قریب رہا۔ ambient حالات میں 30 دن کے بعد چپکنے کی مضبوطی 2.0 ± 3.1 MPa تھی۔ پلیٹوں کو زبردستی الگ کرنے، دوبارہ overlap کرنے اور reheating کے بعد 2.1 ± 2.0 MPa strength رہی۔ یہ چکر دس بار دہرانے پر بھی تقریباً 3.1 ± 3.0 MPa ملا۔

سب سے بہتر متبادل سالمہ مرکزی سالمہ نہیں تھا۔ تین fmoc گروہ والا متعلقہ سالمہ، CyclicFP-fmoc3، PTFE پر 2.0 ± 3.2 MPa تک پہنچا۔ پھر بھی مقالہ CyclicFP-fmoc پر زیادہ توجہ دیتا ہے کیونکہ اس میں strength، لچک پذیری، طریقہ کار کے شواہد اور دھو کر ہٹائی جا سکنے والی اخراج کا پورا مجموعہ موجود ہے۔

دعوے کا دوسرا نصف لچک پذیری ہے

صرف strength کافی نہیں ہوتی۔ brittle چپکنے والا مادہ ایک بلند peak تناؤ تک پہنچ کر اچانک ناکام ہو سکتا ہے۔ مقالے کا زیادہ امتیازی دعوے یہ ہے کہ CyclicFP-fmoc لچک دار رویہ بھی دکھاتا ہے۔

لیپ شیئر منحنی میں CyclicFP-fmoc پہلے maximum تناؤ تک پہنچا اور پھر منتقلی بڑھنے کے ساتھ تناؤ بتدریج کم ہوا۔ مقالے میں آزمائے گئے تجارتی چپکنے والے مادے زیادہ brittle joints کی طرح برتاؤ کرتے تھے: ان میں peak تناؤ کے فوراً بعد ناکامی آگیا۔



CyclicFP-fmoc ایک بلند تناؤ peak کے ساتھ peak کے بعد لمبا tail دکھاتا ہے، shaded علاقہ اس کے زیادہ جدا کرنے کا کام کو سمجھانے کے لیے editorial رہنما ہے۔ منحنیات شکل 3f سے تقریباً digitize کیے گئے ہیں؛ یہ raw تجرباتی اعداد و شمار نہیں ہیں۔

Chart by The Clean Paper; approximate values digitized from Kikkawa et al., JACS, 2026 Figure 3f (source figure not relicensed) CC BY 0.4

مصنّفین نے تناؤ-نقل مکانی منحنی کے نیچے کے رقبے کو جدا کرنے کا کام کے طور پر ناپا۔ PTFE پر CyclicFP-fmoc نے 1300 N/m دیا۔ آزمائے گئے تجارتی چپکنے والے مادے 26 سے 314 N/m کے درمیان تھے۔

ناکامی طریقہ بھی اسی تشریح کے مطابق تھا۔ CyclicFP-fmoc والے PTFE joints اندرونی تہ سے، یعنی چپکنے والا مادہ کے اندر، ٹوٹے۔ اس کا مطلب ہے کہ چپکنے والا مادہ اندرونی طور پر deform ہو کر توانائی پھیلا کر کم کر سکتا تھا، جبکہ ان جانچیں میں PTFE انٹرفیس جمعی رکاوٹ چپکنے والی تہ سے مضبوط رہا۔

تناؤ-relaxation تجربات سالماتی timescale بھی دیتے ہیں۔ C 20 پر relaxation characteristic وقت 60 ms تھی، اور Arrhenius تجزیہ نے فعال سازی کی توانائی 8.33 kJ/mol دی۔ سادہ الفاظ میں چپکنے والی تہ اچانک تناؤ ارتکاز کو نرم کرنے کے لیے کافی تیزی سے خود کو دوبارہ ترتیب دے سکتی ہے، بجائے اس کے کہ ایک جامد brittle ٹھوس کی طرح فوراً ٹوٹ جائے۔

مصنفین کے خیال میں fluorine کیوں اہم ہے

PTFE کاربن-bonds fluorine سے بنا ہے۔ CyclicFP-fmoc میں crown-ether fluorinated گروہ ہیں۔ مصنفین کا استدلال ہے کہ F-F تعاملات چپکنے والا مادہ کو PTFE سے جڑنے میں مدد دیتی ہیں، جبکہ دیگر interactions چپکنے والی تہ کو خود ساتھ رکھنے اور deform ہونے میں مدد دیتے ہیں۔

کئی کنٹرول تجربات اسی سمت اشارہ کرتے ہیں۔ CyclicFP-fmoc کے fluorine ایٹم کو hydrogen سے بدلنے پر بننے والا CyclicP-PTFE fmoc سے بہت کمزور، تقریباً 1.0 ± 0.0 MPa، جڑا۔ AcyclicFP-fmoc، phosphate، fluoro-ether linear صرف 3.0 MPa ± 1.0 تک پہنچا۔ تہ pi-بندی یا باہمی hydrogen-بندش اکائیاں سے محروم متبادل صورتیں بھی خراب کارکردگی دکھاتے تھے۔

اس کے بعد مقالہ طیف نگاری اور بلور ساخت سے picture interaction کی حمایت کرتا ہے۔ CyclicFP-fmoc بلور میں پڑوسی سالمات کے fluorine ایٹم 49.2 سے 91.2 انگسٹروم کے فاصلے پر ہیں، جو دو fluorine ایٹم کے 94.2 انگسٹروم Waals der van sum سے کم ہے۔ FT-IR اور متغیر-درجہ حرارت amorphous NMR چپکنے والا مادہ میں ہائیڈروجن بندش، F-F تعاملات اور پائی-پائی تہ بندی کی حمایت کرتے ہیں۔

PTFE کے لیے سب سے براہ راست شواہد میں ٹھوس-حالت NMR MAS 19F طیف اس وقت تبدیلی ہوتے ہیں جب CyclicFP-fmoc کو nanoparticles PTFE یا باریک PTFE چادریں کے ساتھ ملایا جاتا ہے۔ nonfluorinated کنٹرول وہی تبدیلی پیدا نہیں کرتا۔ یہ صرف ڈیزائن sketch نہیں، بلکہ اس بات کا شواہد ہے کہ چپکنے والا مادہ کے fluorinated حصے PTFE سے تعامل کرتے ہیں۔

پھر بھی اسے "F-F bonds" نے PTFE کا مسئلہ حل کر دیا" میں سادہ نہیں کرنا چاہیے۔ خود مقالے کا ماڈل زیادہ تہ دار ہے: F-F interfacial تعاملات PTFE adhesion میں مدد دیتی ہیں، جبکہ ہائیڈروجن بندش اور پائی-پائی تہ بندی چپکنے والا مادہ کے اندر cohesion اور لچک پذیری میں حصہ ڈالتی ہیں۔

Ethanol سے صاف ہٹایا جانا حقیقی ہے، مگر اس کی حدود ہیں

اخراج نتیجہ عملی طور پر سب سے پرکشش حصہ ہے۔ مصنفین نے الگ کی گئی PTFE پلیٹوں کو ethanol سے دھویا اور اپنی نمونہ عمل میں CyclicFP-fmoc کو residue کے بغیر مکمل طور پر ہٹنے کی رپورٹ دی۔ انہوں نے چپکنے والا مادہ کو بازیافت کر کے بار بار reuse بھی کیا، اور جانچیں میں چپکنے کی مضبوطی تقریباً 2.1 ± 1.0 MPa برقرار رہی۔

یہ اہم ہے کیونکہ روایتی مضبوط چپکنے والے مادے کو صاف ہٹانا اکثر مشکل ہوتا ہے۔ ایسی گوند جو PTFE کو پکڑ سکے اور بعد میں دھل جائے، disassembly repair اور reuse کے لیے مفید ہو سکتی ہے۔

لیکن حد واضح رہنی چاہیے۔ مقالہ کنٹرول شدہ نمونے آزماتا ہے، ہر contaminated صنعتی سطح، weathered مشترک، solvent سامنا یا طویل مدتی aging حالت نہیں۔ PTFE پلیٹیں پر ethanol دھو کر ہٹائی جا سکنے والی یہ ثابت کرنے کے برابر نہیں کہ مختلف مواد سے بنی assemblies کے لیے مکمل ری سائیکلنگ عمل موجود ہے۔

مقالہ یہ بھی کہتا ہے کہ CyclicFP-fmoc کوئی "forever PFAS" کیمیائی نہیں۔ اس بیان کو مکمل ماحولیاتی-خطرہ جائزہ سمجھنا درست نہیں ہوگا۔ برقرار رہنا، زہریت، تیاری پیانہ، اخراج pathways اور regulation الگ سوال ہیں۔

یہ کیا ثابت نہیں کرتا

- یہ market-ready چپکنے والا مادہ پروڈکٹ نہیں دکھاتا۔
- یہ ثابت نہیں کرتا کہ ہر صنعتی ترتیب میں سطح preparation کے بغیر PTFE کو قابل اعتماد طور پر چپکایا جا سکتا ہے۔
- یہ نہیں دکھاتا کہ ethanol اخراج ہر سطح، ہر سطح حالت یا aged مشترک پریکساں کام کرے گا۔
- یہ ثابت نہیں کرتا کہ adhesion کی پوری وجہ صرف F-F تعاملات ہیں۔ مقالے کا طریقہ کار F-F ہائیڈروجن بندش اور پائی-پائی تہ بندی کو ملاتا ہے۔
- یہ مکمل ری-plastic سائیکلنگ workflow نہیں دکھاتا۔
- یہ چپکنے والا مادہ سالمات کے لیے مکمل ماحولیاتی یا toxicological حفاظت خا کہ قائم نہیں کرتا۔
- اس کا مطلب یہ نہیں کہ تجارتی چپکنے والے مادے عمومی طور پر بدتر ہیں۔ موازنہ اسی مقالے میں آزمائے گئے مواد اور PTFE لپ شیئر setup تک محدود ہے۔

نتیجہ کتنا مضبوط ہے؟

ایک تجربہ گاہ مواد مقالے کے طور پر نتیجہ مضبوط ہے کیونکہ مصنفین صرف ایک بلند عدد رپورٹ نہیں کرتے۔ وہ strength، لچک پذیری، 30 دن کی durability، پانی tolerance، دہرایا گیا دوبارہ چپکاؤ، ethanol اخراج، سالماتی متبادل صورتیں اور مجوزہ interactions کے طیفی شواہد سب جانچتے ہیں۔

سب سے قائل کن مجموعہ ناکامی طریقہ اور کنٹرولز کا ہے۔ اگر PTFE انٹرفیس پہلے ٹوٹ جاتا تو دعویٰ کمزور ہوتا۔ اس کے بجائے مشترک چپکنے والی تہ کے اندر ناکام ہوتا ہے۔ اور جب cyclic fluorinated ساخت کو ہٹایا یا بدلا جاتا ہے تو PTFE adhesion تیزی سے گرتی ہے۔

باقی سوال پیمانہ اور استعمال صورت کے ہیں۔ لپ شیئر جانچیں standardized اور مفید ہیں، مگر حقیقی joints، peel، impact، تھکن، آلودگی، درجہ حرارت چکر اور ملے جلے مواد دیکھتے ہیں۔ کنٹرول شدہ تجربہ گاہ پلیٹیں کے درمیان خوب کام کرنے والا سالمہ انجینئرنگ چپکنے والا مادہ بننے سے پہلے ترکیب، عمل اور durability ڈیٹا سیٹ مانگا ہے۔

یہ کیوں اہم ہے

PTFE مواد کی ایک عجیب حد پر کھڑا ہے۔ اس کی inertness ہی اسے قیمتی بناتی ہے، اور یہی خاصیت repairable یا recyclable assemblies میں اسے شامل کرنا مشکل کرتی ہے۔

یہ مقالہ brute-force کے بجائے chemically مخصوص راستہ پیش کرتا ہے۔ PTFE سطح کو roughen یا chemically حملہ کرنے کے بجائے، ایک چھوٹا سالمہ ڈیزائن کیا گیا ہے جو اس سطح سے تعامل کر سکتا ہے اور ساتھ ہی لچک دار، reversible چپکنے والی تہ برقرار رکھتا ہے۔

اگر یہ ڈیزائن logic عام ہو سکے تو ایسی چپکنے والے مادے بنانے میں مدد مل سکتی ہے جنہیں میکانی کارکردگی مکمل طور پر قربان کیے بغیر آسانی سے ہٹایا اور دوبارہ استعمال کیا جا سکے۔ اصل وعدہ ایک تیار شدہ گوند کے طور پر ایک سالمہ نہیں، بلکہ مضبوط، لچک دار اور adhesion debondable کے لیے سالماتی حکمت عملی ہے۔

صاف خلاصہ

Goswami Kikkawa اور ساتھی phosphate ether fluoro-crown کے چھوٹے سالمات کو PTFE اور دوسری سطحوں کے لیے چپکنے والے مادے کے طور پر رپورٹ کرتے ہیں۔ مرکزی سالمہ CyclicFP-fmoc نے بغیر پیشگی علاج کے PTFE پلیٹوں کو لیپ شیئر آزمائش میں 1.0 ± 3.1 MPa پر جوڑا، جوڑ PTFE کی سرحد پر کھلنے کے بجائے خود چپکنے والی تہ کے اندر ٹوٹا، جدا کرنے کا کام 1300 N/m رہا، ذخیرے اور بار بار دوبارہ چپکانے کے بعد کارکردگی قائم رہی، اور ethanol سے دھو کر PTFE سے مادہ ہٹایا جا سکا۔ متعلقہ متبادل سالمہ 2.0 ± 3.2 MPa تک پہنچا۔ طیف نگاری اور کنٹرول سالمات ایسے طریقہ کار کی حمایت کرتے ہیں جس میں F-F تعاملات PTFE سطح سے چپکنے میں مدد دیتے ہیں، جبکہ bonding hydrogen اور $\pi-\pi$ تہ بندی چپکنے والی تہ میں تناؤ کو پھیلانے میں مدد کرتی ہیں۔ یہ PTFE کے لیے مضبوط، لچک دار اور دھو کر ہٹائی جا سکنے والی چپکاہٹ کا امید افزا تجربہ گاہی مظاہرہ ہے؛ ابھی تجارتی گوند، ہمہ گیر ری سائیکلنگ حل یا مکمل ماحولیاتی و حفاظتی جائزہ نہیں۔

ماخذ

Wipe-Off Easy Allowing Yet PTFE, to Adhesion Ductile and Strong with Adhesives Small-Molecule al., et Kikkawa
(2026) 29145-29138, 148 Society Chemical American the of Journal Removal,
<https://doi.org/10.1021/jacs.6c07886>