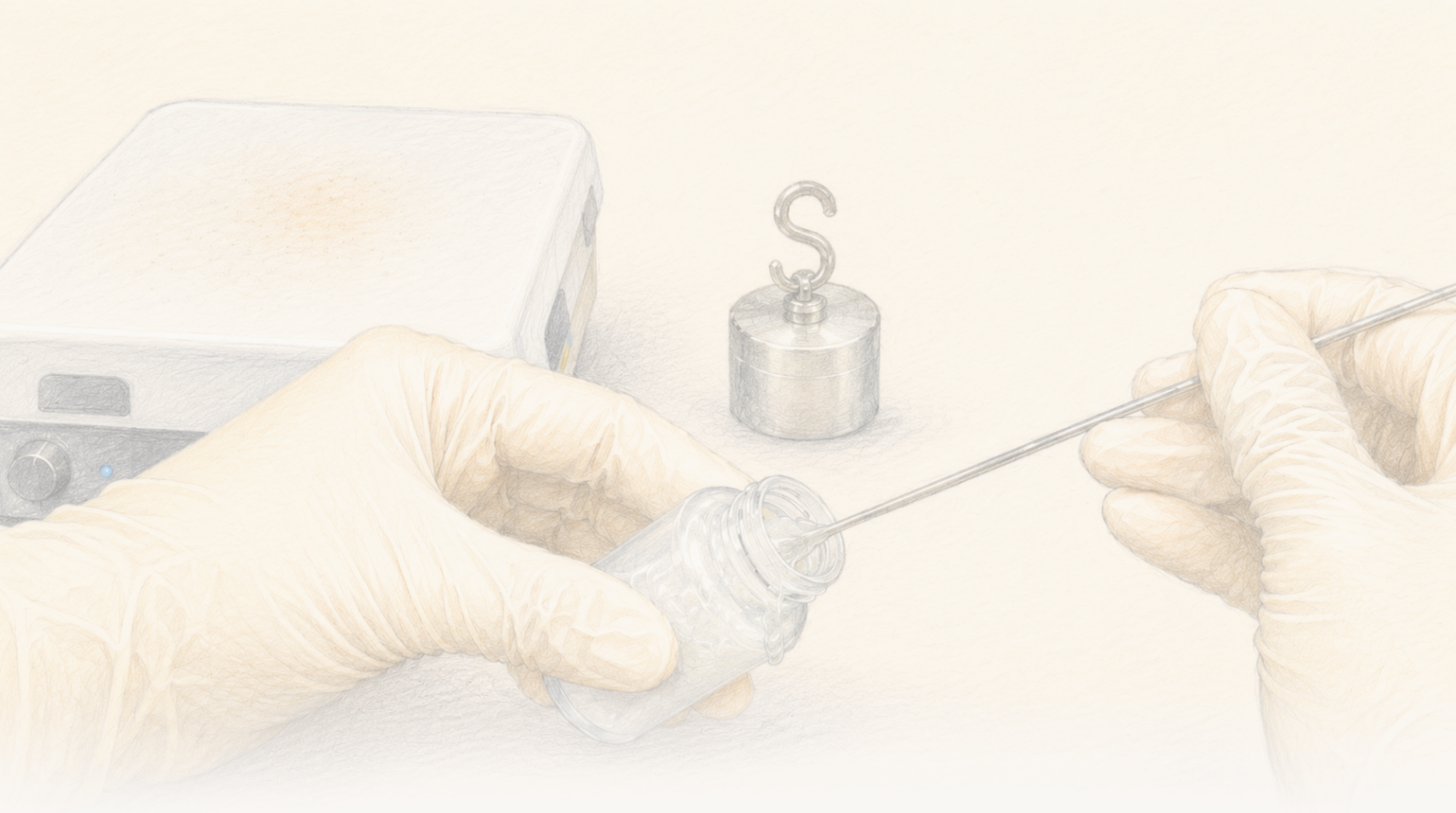


The Clean Paper

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

Kiçik molekul emal olunmamış PTFE-ni yapışdırdı, sonra etanolla yuyulub çıxdı

JACS məqaləsi laboratoriya lap-shear sınaqlarında yapışması ilə məşhur dərəcədə çətin olan PTFE-ni birləşdirən və etanolla yuyularaq çıxarıla bilən flüor-kraun-efir fosfat yapışdırıcılarını təqdim edir. CyclicFP-fmoc emal olunmamış PTFE üzərində sünek koheziyalı qırılma ilə 1,3 MPa-a, əlaqəli variant isə 2,3 MPa-a çatdı. Mexanizm PTFE-də flüor–flüor qarşılıqlı təsirləri, yapışdırıcının daxilində isə hidrogen rabitəsi və π-yığılmasına dair spektroskopik sübutlarla dəstəklənir. Bu, ümidverici material nəticəsidir; hələ kommersiya yapışqanı, universal təkrar-emal həlli və ya tam ekoloji təhlükəsizlik qiymətləndirməsi deyil.

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-yə nəyisə yapışdırmağın çətin olmasının səbəbi var

Daha çox PTFE kimi tanınan və Teflon daxil olmaqla ticarət adları ilə satılan politetraflüoroetilen qismən ona görə faydalıdır ki, başqa maddələrlə qarşılıqlı təsirə girməyə meylli deyil. Onun səth enerjisi aşağıdır. Bir çox maye onun üzərində damcı halına yığılır. Səth aşındırılmasa, pürüzləşdirilməsə, plazma ilə emal olunmasa və ya xüsusi primer tətbiq edilməsə, bir çox yapışdırıcı ona yapışmır.

Bu müqavimət yapışmayan örtüklər və kimyəvi cəhətdən inert hissələr üçün əladır. Amma mühəndislər səthi daimi zədələmədən PTFE-ni başqa hissəyə birləşdirmək istəyəndə problemə çevrilir.

Journal of the American Chemical Society-də dərc olunan məqalə bu problemə qeyri-adi istiqamətdən yanaşan kiçik molekullu yapışdırıcı təqdim edir. Kohei Kikkawa, Abir Goswami və həmkarları emal olunmamış PTFE-yə güclü yapışa, qırılmadan əvvəl sünek şəkildə deformasiya ola və sonra etanolla yuyularaq PTFE lövhələrindən çıxarıla bilən flüor-kraun-efir fosfat molekullarını təsvir edirlər.

Əsas molekul **CyclicFP-fmoc** adlanır. Lap-shear sınaqlarında o, emal olunmamış PTFE lövhələrini **1,3 ± 0,1 MPa** yapışma möhkəmliyi və **1300 N/m** ayrılma işi ilə saxladı. 1 MPa hər kvadrat millimetrə 1 nyutona bərabər olduğuna görə, ölçülmüş 1,3 MPa pik gərginlik hər kvadrat millimetrə təxminən 130 qramlıq almanın ağırlığının təsir etməsi ilə eyni təzyiqdir. Bu, vahid sahə üzrə analogiyadır; sınaq nümunəsindəki qüvvəni və ya təmas həndəsəsini təsvir etmir. Bildirilən 1300 N/m ayrılma işi hər kvadrat metrə 1300 joul ayrılma enerjisinə bərabərdir. Mühəndislik yük reytinqi deyil, birbaşa vizual nümayiş kimi məqalədə $7\,\mathrm{cm}^2$ birləşmənin 8 kq ağırlığı saxladığı göstərilir. Birləşmə PTFE interfeysində deyil, yapışdırıcı qatın daxilində qırıldı. Bu vacibdir: sınaqda zəif nöqtənin interfeys olmadığını göstərir.

Məqalədə yapışdırıcı zolağın asılmış ağırlıqları saxladığını göstərən fotoşəklə əsaslanan karandaş təsviri (Şəkil 2, sol). Bu, orijinal fotoşəkil, miqyaslı çertyoj və ya mühəndislik yük reytinqi diaqramı deyil.

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

Nəticə “PTFE problemi həll olundu” demək deyil. Bu, nəzarət olunan laboratoriya materialşünaslıq nəticəsidir. Amma çətin bir kombinasiyanın aydın nümunəsidir: güclü yapışma, sünek qırılma və yapışmağa müqaviməti ilə məşhur səthdən silinərək çıxarıla bilmə.

Adi möhkəmliklə asan çıxarılma niyə bir-biri ilə ziddiyyət yaradır

Yapışdırıcılar adətən güzəşt tələb edir. Sərt, çarpaz bağlı polimer yapışqanlar möhkəm ola bilər, amma çox vaxt qəfil qırılır və təmiz çıxarılması çətin olur. Daha yumşaq, lentəbənzər yapışdırıcılar uzanıb enerjini səpələyə bilər, amma adətən möhkəmlikdən itirir.

Bu kompromisin səbəbi molekulyardır. Möhkəmlik gərginliyin səmərəli ötürülməsini tələb edir. Sünek davranış hərəkət, yenidən düzülmə və enerjini səpələməyi tələb edir. Asan çıxarılma isə substratı dağıtmadan qırıla bilən rabitələr tələb edir. Bu tələblər müxtəlif

istiqamətlərə çəkir.

Kiçik molekullu yapışdırıcılar ona görə cəlbedicidir ki, prinsipcə çıxarıla və təkrar istifadə oluna bilərlər. Bir çox ənənəvi yapışqanı möhkəm edən uzun, dolaşıq polimer şəbəkələri yaratmırlar. Bu, eyni zamanda onların zəif tərəfidir: dolaşıqlıq olmayanda kiçik molekullar adətən sünek və yüksək möhkəmlikli yapışma yaratmaqda çətinlik çəkir.

JACS məqaləsi polimer dolaşıqlığını geri dönən qeyri-kovalent qarşılıqlı təsirlərin bir toplusu ilə əvəz etməyə çalışır. Molekul flüorlaşdırılmış kraun-efir fosfat bölgəsini uretanla birləşdirilmiş fmoc qrupu ilə birləşdirir. Sadə dillə, onun flüorlaşdırılmış halqası flüorla zəngin PTFE səthi ilə qarşılıqlı təsir göstərə bilər, uretan qrupları qonşu yapışdırıcı molekullarla hidrogen rabitələri yarada bilər, yastı fluorenil qrupları isə bir-birinin üzərində yığıla bilər. Dizaynın məqsədi bir “sehrli rabitə” deyil. Məqsəd birlikdə işləyə bilən zəif, geri dönən qarşılıqlı təsirlər dəstidir:

- PTFE yaxınlığında flüor–flüor qarşılıqlı təsirləri;
- yapışdırıcı molekullar arasında hidrogen rabitələri;
- fluorenil qrupları arasında π–π yığılması;
- və dərhal çatlamaq əvəzinə gərginliyi boşaltmağa imkan verən kifayət qədər molekulyar hərəkətlilik.

Əsas PTFE sınağı nə göstərdi

Müəlliflər CyclicFP-fmoc-u səthi emal edilməmiş və təmizlənməmiş PTFE lövhələri arasına yerləşdirdilər, yapışdırıcını qızdırdılar və sınaqdan əvvəl lövhələri otaq temperaturunda 10 dəqiqə saxladılar.

Kəmiyyət sınaqları üçün lap-shear metodundan istifadə etdilər. CyclicFP-fmoc ilə birləşdirilmiş PTFE lövhələri dartılma gərginliyində **1,3 ± 0,1 MPa**-a çatdı; bu, üç ölçmənin orta qiyməti ± standart sapması kimi verilib. Yapışdırıcının fenlə təxminən **50 C** temperaturda tətbiqi də yalnız yüksək temperaturda əritmə tələb etmədən oxşar — **1,1 ± 0,1 MPa** — nəticə verdi.

Müəlliflər bu qiymətləri eyni PTFE lap-shear quruluşunda kommersiya epoksi, akril, silikon və uretan yapışdırıcıları ilə müqayisə etdilər. Həmin nəzarət yapışdırıcıları təxminən **0,1–0,7 MPa**, CyclicFP-fmoc isə **1,3 ± 0,1 MPa** verdi. Eyni substrat və eyni metodla aparılan bu müqayisə müxtəlif materiallardan və müxtəlif sınaq həndəsələrindən alınmış MPa qiymətlərini bir reytinq cədvəlinə yığmaqdan daha informativdir.

Saxlandıqdan sonra da rəqəm oxşar qaldı. Ətraf mühit şəraitində 30 gündən sonra yapışma möhkəmliyi **1,3 ± 0,2 MPa** idi. Lövhələr zorla ayrıldıqdan, yenidən üst-üstə gətirildikdən və qızdırıldıqdan sonra möhkəmlik **1,2 ± 0,2 MPa** oldu. Bu dövrü on dəfə təkrarladıqdan sonra belə nəticə təxminən **1,3 ± 0,3 MPa** idi.

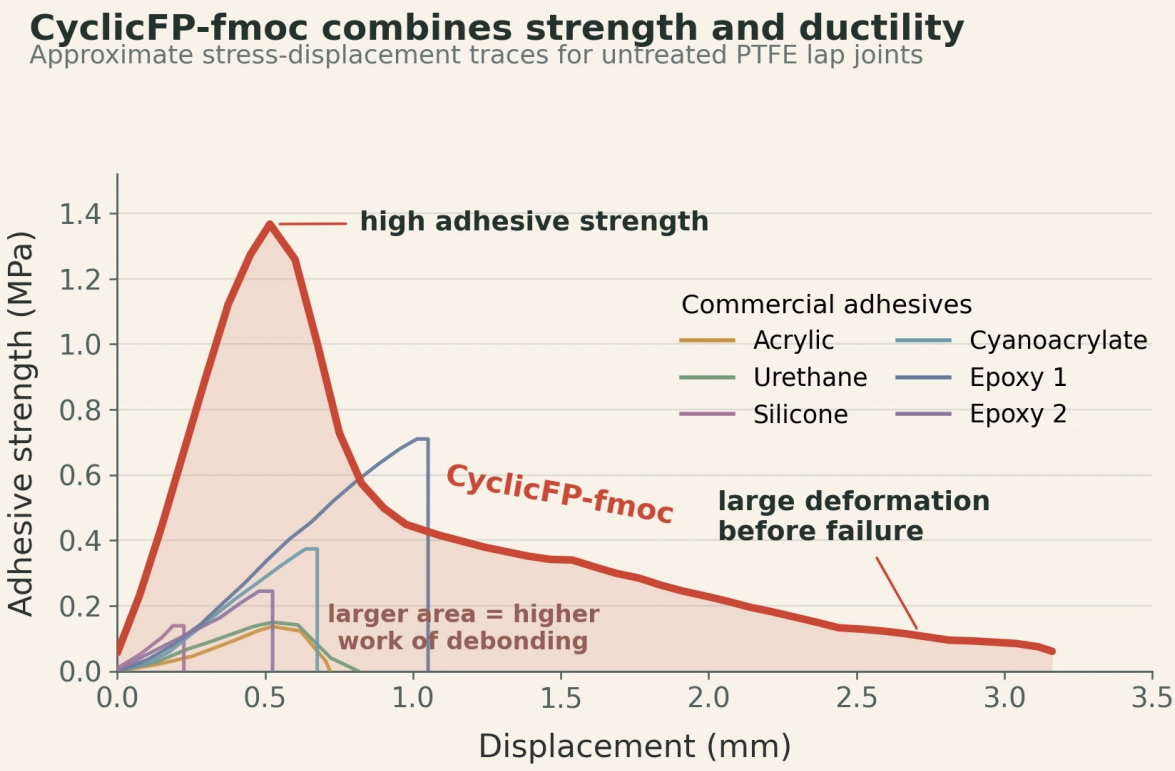
Ən yaxşı variant əsas molekul deyildi. Üç fmoc qrupu olan əlaqəli molekul, **CyclicFP-fmoc3**,

PTFE üzərində **2,3 ± 0,2 MPa**-a çatdı. Məqalə yenə də əsasən CyclicFP-fmoc-a fokuslanır, çünki o, möhkəmlik, süneklik, mexanizmə dair sübut və silinərək çıxarılma kombinasiyasını birlikdə göstərir.

Sünek davranış iddianın ikinci yarısıdır

Təkcə möhkəmlik kifayət etməzdi. Kövrək yapışdırıcı yüksək pik gərginliyə çata, sonra isə qəfil qırıla bilər. Məqalənin daha fərqləndirici iddiası CyclicFP-fmoc-un eyni zamanda sünek davranmasıdır.

Lap-shear əyrilərində CyclicFP-fmoc maksimum gərginliyə çatdı, sonra yerdəyişmə davam etdikcə gərginliyi tədricən itirdi. Məqalədə sınaqdan keçirilən kommersiya yapışdırıcıları daha çox kövrək birləşmələr kimi davrandı: qırılma pik gərginlikdən az sonra baş verdi.



Approximate curves digitized from Figure 3f; not raw experimental data.
Lines connect digitized points without smoothing.

CyclicFP-fmoc yüksək gərginlik pikini pikdən sonra uzun azalan quyruqla birləşdirir; kölgəli sahə onun daha böyük ayrılma işini göstərmək üçün redaksiya bələdçisidir. Təxmini əyrilər Şəkil 3f-dən rəqəmsallaşdırılıb; xam eksperimental məlumat deyil.

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

Müəlliflər gərginlik–yerdəyişmə əyrisinin altındakı sahəni ayrılma işi kimi hesabladılar. CyclicFP-fmoc PTFE üzərində **1300 N/m** verdi. Sınaqdan keçirilən kommersiya yapışdırıcılarında

bu göstərici **26–314 N/m** aralığında idi.

Qırılma rejimi də bu şərhlə uyğun gəlir. CyclicFP-fmoc ilə PTFE birləşmələri koheziyalı şəkildə, yapışdırıcının daxilində qırıldı. Bu, sınaqlarda PTFE interfeysi yapışdırıcının öz qatından daha möhkəm qaldığı halda yapışdırıcının daxildə deformasiya edərək enerjini səpələyə bildiyini göstərir.

Gərginliyin relaksasiyası təcrübələri molekulyar zaman miqyasını da göstərir. 20 C-də xarakterik relaksasiya müddəti **60 ms** idi və Arrenius analizi **33,8 kJ/mol** aktivləşmə enerjisi verdi. Sadə dillə, yapışdırıcı qat qəfil gərginlik konsentrasiyasını yumşaltmaq üçün kifayət qədər sürətlə yenidən düzülə bilir və statik kövrək bərk cisim kimi davranmır.

Müəlliflər flüorun niyə vacib olduğunu düşünürlər

PTFE karbon–flüor rabitələrindən qurulub. CyclicFP-fmoc flüorlaşdırılmış kraun-efir qrupları daşıyır. Müəlliflər **F–F qarşılıqlı təsirlərinin** yapışdırıcının PTFE-yə bağlanmasına kömək etdiyini, başqa qarşılıqlı təsirlərin isə yapışdırıcı qatın bütövlüyünü və deformasiyasını təmin etdiyini irəli sürürlər.

Bir neçə nəzarət təcrübəsi bunu dəstəkləyir. CyclicFP-fmoc-dakı flüor atomları hidrogen atomları ilə əvəz edildikdə alınan CyclicP-fmoc PTFE-yə xeyli zəif — təxminən **0,1 ± 0,0 MPa** — yapışdı. Xətti flüor-efir fosfat olan AcyclicFP-fmoc yalnız **0,3 ± 0,1 MPa**-a çatdı. π-yığılması və ya hidrogen-rabitəsi vahidləri olmayan variantlar da daha zəif nəticə göstərdi.

Sonra məqalə qarşılıqlı təsirlər modelini dəstəkləmək üçün spektroskopiya və kristal quruluşdan istifadə edir. CyclicFP-fmoc kristalında qonşu molekullardakı flüor atomları bir-birindən **2,49–2,91 angström** məsafədə yerləşir; bu, iki flüor atomu üçün **2,94 angström** van der Waals cəmindən qısadır. FT-IR və dəyişən-temperaturlu NMR amorf yapışdırıcıda hidrogen rabitələrini, F–F qarşılıqlı təsirlərini və π–π yığılmasını dəstəkləyir.

PTFE üçün ən birbaşa nəticə bərk-hal **19F MAS NMR** spektrlərindən gəlir: CyclicFP-fmoc PTFE nanohissəcikləri və ya nazik PTFE təbəqələri ilə qarışdırıldıqda spektr sürüşür. Flüorsuz nəzarət maddəsi eyni sürüşməni yaratmır. Bu, yapışdırıcının flüorlaşdırılmış hissələrinin PTFE ilə qarşılıqlı təsir etdiyinə yalnız dizayn sxemi deyil, eksperimental sübut verir.

Bunu yenə də “F–F rabitələri PTFE problemini həll edir” kimi sadələşdirmək olmaz. Məqalənin öz modeli daha çoxqatlıdır: interfeysdə F–F qarşılıqlı təsirləri PTFE-yə yapışmaya kömək edir, hidrogen rabitələri və π–π yığılması isə yapışdırıcının daxilində koheziya və sünekliyə töhfə verir.

Silinərək çıxarılma realdır, amma sərhədləri var

Çıxarılma nəticəsi işin praktik cəhətdən ən cəlbedici hissəsidir. Müəlliflər ayrılmış PTFE lövhələrini etanolla yudular və nümayişdə CyclicFP-fmoc-un qalıq qoymadan tam çıxarıldığını bildirirlər. Yapışdırıcını bərpa edib dəfələrlə təkrar istifadə etdilər; təkrar-istifadə sınaqlarında yapışma möhkəmliyi təxminən **1,2 ± 0,1 MPa** qaldı.

Bu vacibdir, çünki ənənəvi güclü yapışdırıcıları təmiz şəkildə çıxarmaq çox vaxt çətindir. PTFE-ni saxlaya, sonra isə yuyulub çıxarıla bilən yapışqan təmir, sökülmə və təkrar istifadə üçün faydalı olardı.

Amma sərhəd vacibdir. Məqalə nəzarət olunan nümunələri sınaqdan keçirir; bütün çirklənmiş sənaye səthlərini, hava şəraitinə məruz qalmış birləşmələri, həlledici təsirini və ya uzunmüddətli yaşlanma şəraitini yox. PTFE lövhələrindən etanolla silinib çıxarılma müxtəlif materiallardan hazırlanmış komplektlərin tam təkrar-emal prosesinin sübutu deyil.

Məqalə həmçinin CyclicFP-fmoc-un PFAS “əbədi kimyəvi maddə” olmadığını bildirir. Bu ifadə tam ekoloji-risk qiymətləndirməsinə çevrilməməlidir. Davamlılıq, toksiklik, istehsal miqyası, ətraf mühitə buraxılma yolları və tənzimləmə ayrıca suallardır.

Bu nəyi sübut etmir

- Bazara hazır yapışdırıcı məhsulu **göstərmir**.
- PTFE-nin hər sənaye şəraitində səth hazırlığı olmadan artıq etibarlı şəkildə yapışdırıla biləcəyini **sübut etmir**.
- Etanolla çıxarılmanın bütün substratlarda, səth vəziyyətlərində və yaşlanmış birləşmələrdə eyni dərəcədə işlədiyini **göstərmir**.
- Yapışmanı yalnız F–F qarşılıqlı təsirlərinin izah etdiyini **sübut etmir**. Məqalənin mexanizmi F–F, hidrogen rabitəsi və π–π yığılmasını birlikdə nəzərdə tutur.
- Tam plastik təkrar-emal prosesini **göstərmir**.
- Yapışdırıcı molekulların tam ekoloji və toksikoloji təhlükəsizlik profilini **müəyyənləşdirmir**.
- Kommersiya yapışdırıcılarının ümumiyyətlə daha pis olduğunu **demək deyil**. Müqayisələr bu məqalədə sınaqdan keçirilmiş materiallara və PTFE lap-shear quruluşuna aiddir.

Nəticə nə qədər güclüdür?

Laboratoriya materialşünaslıq işi üçün nəticə güclüdür, çünki müəlliflər yalnız bir yüksək rəqəm bildirmirlər. Onlar möhkəmliyi, sünekliyi, 30 günlük davamlılığı, suya dözümlülüyü, təkrar yapışmanı, etanolla çıxarılmanı, molekulyar variantları və təklif olunan qarşılıqlı təsirlərə dair spektroskopik sübutları yoxlayırlar.

Ən inandırıcı kombinasiya qırılma rejimi ilə nəzarət təcrübələridir. Əgər əvvəlcə PTFE interfeysi qırılsaydı, iddia daha zəif olardı. Bunun əvəzinə birləşmə yapışdırıcı qatın daxilində qırılır. Flüorlaşdırılmış siklik quruluş çıxarılanda və ya dəyişdiriləndə isə PTFE-yə yapışma kəskin azalır.

Açıq qalan suallar miqyas və istifadə şəraitidir. Lap-shear sınaqları standartlaşdırılmış və faydalıdır, amma real birləşmələr soyulma, zərbə, yorulma, çirklənmə, temperatur dövrləri və qarışıq materiallarla qarşılaşır. Nəzarət olunan laboratoriya lövhələri arasında əla işləyən molekul mühəndislik yapışdırıcısına çevrilməzdən əvvəl formulasiya, proses və davamlılıq məlumatları toplusuna çevrilməlidir.

Niyə vacibdir

PTFE materiallar baxımından çətin sərhəddə yerləşir. Onu dəyərli edən xüsusiyyət onun inertliyidir və eyni xüsusiyyət onu təmir edilə və ya təkrar emal edilə bilən yığımlara inteqrasiya etməyi çətinləşdirir.

Bu məqalə kobud güc əvəzinə kimyəvi cəhətdən spesifik yol təklif edir. PTFE səthini pürüzləndirmək və ya kimyəvi olaraq aşındırmaq əvəzinə, həmin səthlə qarşılıqlı təsir göstərə bilən və eyni zamanda sünek, geri dönən yapışdırıcı qat yaradan kiçik molekul dizayn edir.

Əgər bu dizayn məntiqi daha geniş tətbiq oluna bilsə, mexaniki performansın hamısından imtina etmədən daha asan çıxarılan və təkrar istifadə olunan yapışdırıcılar yaratmağa kömək edə bilər. Əsl vəd budur: hazır yapışqan kimi bir molekul deyil, güclü, sünek və ayrılması mümkün yapışma üçün molekulyar strategiya.

Təmiz xülasə

Kikkawa, Goswami və həmkarları PTFE və digər substratlar üçün yapışdırıcı kimi flüor-kraun-efir fosfat kiçik molekulları təqdim edirlər. Əsas molekul CyclicFP-fmoc emal olunmamış PTFE lövhələrini lap-shear sınaqlarında 1,3 ± 0,1 MPa möhkəmliklə birləşdirdi, PTFE interfeysində deyil, koheziyalı şəkildə qırıldı, 1300 N/m ayrılma işi göstərdi, saxlanma və təkrar yapışmadan sonra performansını qorudu və etanolla yuyularaq PTFE lövhələrindən çıxarıla bildi. Əlaqəli variant 2,3 ± 0,2 MPa-a çatdı. Spektroskopiya və nəzarət molekulları PTFE interfeysində F–F qarşılıqlı təsirlərinin, yapışdırıcı qatın daxilində isə hidrogen rabitəsi və π–π yığılmasının gərginliyin səpələnməsinə kömək etdiyi mexanizmi dəstəkləyir. Bu, PTFE-yə güclü, sünek və silinərək çıxarıla bilən yapışmanın ümidverici laboratoriya nümayişidir; hələ kommersiya yapışqanı, universal təkrar-emal həlli və ya tam ekoloji təhlükəsizlik qiymətləndirməsi deyil.

Mənbələr

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