



The CLEAN PAPER

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

Փոքր մոլեկուլը սոսնձեց չմշակված PTFE-ն, ապա հեռացվեց Էթանոլով

JACS-ում հրապարակված աշխատանքը ներկայացնում է fluoro-crown ether phosphate սոսինձներ, որոնք լաբորատոր lap-shear փորձերում կապում են հայտնիորեն իներտ PTFE-ն, բայց մնում են Էթանոլով լվացմամբ հեռացվող: CyclicFP-fmoc-ը չմշակված PTFE-ի վրա հասել է 1.3 MPa-ի՝ դուկտիլ կոհեզիվ խափանմամբ, իսկ հարակից տարրերակր՝ 2.3 MPa-ի: Մեխանիզմը հիմնավորվում է PTFE-ի մոտ ֆտոր-ֆտոր փոխազդեցությունների, իսկ սոսնձի ներսում ջրածնային կապերի և π -դասավորման սպեկտրոսկոպիկ ապացույցներով: Սա խոստումնալից նյութագիտական արդյունք է, բայց դեռ ոչ առևտրային սոսինձ, համընդհանուր վերամշակման լուծում կամ բնապահպանական անվտանգության ամբողջական գնահատում:

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-ին դժվար է ինչոր բան կպցնել՝ ոչ պատահաբար

Պոլիտետրաֆտորէթիլենը, ավելի հայտնի որպես PTFE և վաճառվող նաև Teflon ապրանքային անվամբ, օգտակար է մասամբ հենց այն պատճառով, որ գրեթե չի ցանկանում փոխազդել: Նրա մակերևութային էներգիան ցածր է: Շատ հեղուկներ նրա վրա կաթիլներ են կազմում: Շատ սոսինձներ չեն կպչում, եթե մակերեսը նախապես չեն փորագրում, կոպտացնում, պլազմայով մշակում կամ հատուկ պրայմեր չեն կիրառում:

Այդ դիմադրությունը հիանալի է չկաչող ծածկույթների և քիմիապես իներտ մասերի համար: Բայց այն խնդիր է, երբ ինժեներները ցանկանում են PTFE-ն միացնել մեկ այլ մասի՝ առանց մակերեսը մշտապես վնասելու:

Journal of the American Chemical Society-ում հրապարակված աշխատանքը ներկայացնում է փոքր մոլեկուլային սոսինձ, որը խնդրին մոտենում է անսովոր ուղղությամբ: Կոհեյ Կիկավան, Աբիր Գոսվամին և գործընկերները նկարագրում են ֆտորացված crown ether phosphate մոլեկուլներ, որոնք կարող են ուժեղ կպչել չմշակված PTFE-ին, մինչև կոտրվելը դուկտիլ ձևով դեֆորմացվել, իսկ հետո էթանոլով լվացմամբ հեռացվել PTFE թիթեղներից:

Հիմնական մոլեկուլը կոչվում է **CyclicFP-fmoc**: Lap-shear փորձարկումներում այն չմշակված PTFE թիթեղները պահեց $1.3 \pm 0.1 \text{ MPa}$ կպչուն ամրությամբ և 1300 N/m անջատման աշխատանքով: Բանի որ 1 MPa -ը հավասար է 1 նյութոն/քառակուսի միլիմետրի, չափված 1.3 MPa գազաթային լարումը նույն ճնշումն է, ինչ մոտավորապես 130 գրամանոց խնձորի քաշը՝ յուրաքանչյուր քառակուսի միլիմետրի վրա: Սա միավոր մակերեսի անալոգիա է, ոչ թե փորձանմուշի իրական ուժը կամ շփման երկրաչափությունը: 1300 N/m անջատման աշխատանքը համարժեք է 1300 ջոուլ բաժանման էներգիայի՝ մեկ քառակուսի մետրի համար: Ուղղակի տեսողական ցուցադրության համար, ոչ թե որպես ինժեներական բեռնատարության գնահատական, հողվածք ցույց է տալիս 7 cm^2 միացում, որը պահում է 8 կգ զանգված: Միացումը խափանվել է սոսնձային շերտի ներսում, ոչ թե PTFE միջերեսում: Սա կարևոր է նշանակում է, որ տվյալ փորձարկման թույլ կետը միջերեսը չէր:



Մատիտային պատկեր՝ հիմնված հոդվածի՝ կախված ծանրություններ պահող սոսնձված շերտի լուսանկարի վրա (Նկար 2, ձախ): Սա բնօրինակ լուսանկարը, մասշտաբային գծագիր կամ ինժեներական բեռնատարության սխեմա չէ:

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

Արդյունքը չի նշանակում, թե «PTFE-ի խնդիրը լուծված է»: Սա վերահսկվող լաբորատոր նյութագիտական արդյունք է: Բայց այն լավ օրինակ է դժվար համադրության՝ ուժեղ կաշունություն, դուկտիլ խափանում և կաշունությամբ դիմադրող հայտնի մակերեսից մաքրելով հեռացում:

Ինչո՞ւ բարձր ամրությունն ու հեշտ հեռացումը հակասում են միմյանց

Սոսինձները սովորաբար փոխգիջում են անում: Կոշտ, խաչաձև կապերով պոլիմերային սոսինձները կարող են ուժեղ լինել, բայց հաճախ հանկարծակի են խափանվում և դժվար են մաքուր հեռացվում: Ավելի փափուկ՝ ժապավենանման սոսինձները կարող են ձգվել և էներգիա ցրել, բայց սովորաբար գիջում են ամրության հարցում:

Փոխգիշումը մոլեկուլային է: Ամրությունը պահանջում է լարման արդյունավետ փոխանցում: Դուկտիլությունը պահանջում է շարժում, վերադասավորում և էներգիայի ցրում: Հեշտ հեռացումը պահանջում է կապեր, որոնք կարելի է կոտրել՝ առանց հիմքը քայքայելու: Այս պահանջները տարբեր ուղղություններով են ձգում համակարգը:

Փոքր մոլեկուլային սուսինձները գրավիչ են, որովհետև սկզբունքորեն կարող են լինել հեռացվող և վերամշակվող: Դրանք չեն ձևավորում երկար խճճված պոլիմերային ցանցեր, որոնք շատ սովորական սուսինձների ամրությունն են ապահովում: Սա նաև նրանց թուլությունն է. առանց խճճման փոքր մոլեկուլները սովորաբար դժվարանում են ապահովել միաժամանակ դուկտիլ և բարձր ամրության կաշունություն:

JACS-ի աշխատանքը փորձում է պոլիմերային խճճվածությունը փոխարինել հետադարձելի ոչ կովալենտ փոխազդեցությունների ամբողջությամբ: Մոլեկուլը համատեղում է ֆտորացված crown-ether phosphate հատվածը urethane-ով կապակցված fmoc խմբի հետ: Պարզ ասած՝ նրա ֆտորացված օղակը կարող է փոխազդել ֆտորով հարուստ PTFE մակերեսի հետ, urethane խմբերը կարող են ջրածնային կապեր ստեղծել հարևան սոսնձային մոլեկուլների միջև, իսկ հարթ fluorenyl խմբերը կարող են իրար վրա դասավորվել: Նպատակը մեկ «կախարդական» կապ չէ: Նպատակն է թույլ, հետադարձելի փոխազդեցությունների մի համակցություն, որը կարող է համագործակցել՝

- ֆտոր-ֆտոր փոխազդեցություններ PTFE-ի մոտ,
- ջրածնային կապեր սոսնձային մոլեկուլների միջև,
- π - π դասավորում fluorenyl խմբերի միջև,
- և բավարար մոլեկուլային շարժունակություն, որպեսզի լարումը թուլանա՝ անմիջապես ճաքելու փոխարեն:

Ի՞նչ ցույց տվեց հիմնական PTFE փորձարկումը

Հեղինակները CyclicFP-fmoc-ը տեղադրել են PTFE թիթեղների միջև, որոնք չէին ենթարկվել մակերևութային մշակման կամ մաքրման, տաքացրել են սուսինձը և փորձարկումից առաջ թիթեղները 10 րոպե թողել սենյակային ջերմաստիճանում:

Քանակական փորձարկման համար օգտագործվել է lap shear մեթոդը: CyclicFP-fmoc-ով միացված PTFE թիթեղները հասել են **1.3 ± 0.1 MPa** ձգման լարման՝ երեք չափման միջին $\pm$ ստանդարտ շեղում: Սոսինձը մոտ **50 C**-ում վարսահարդարիչով տաքացնելը տվել է նման արժեք՝ **1.1 ± 0.1 MPa**, այսինքն՝ պարտադիր չէր միայն բարձր ջերմաստիճանով հալեցում կիրառել:

Հեղինակները նույն PTFE lap-shear պայմաններում այդ արժեքները համեմատել են առևտրային Էպոքսիդային, ակրիլային, սիլիկոնային և urethane սուսինձների հետ: Այդ վերահսկիչները հասել են մոտ **0.1 -ից 0.7 MPa**, մինչդեռ CyclicFP-fmoc-ը՝ **1.3 ± 0.1 MPa**: Նույն հիմքի և նույն մեթոդի այս համեմատությունը ավելի տեղեկատվական է, քան տարբեր նյութերից ու տարբեր փորձարկման երկրաչափություններից

վերցված MPa թվերը մեկ ընդհանուր վարկանիշում դասավորելը:

Պահեստավորումից հետո թիվը գրեթե չի փոխվել: Սովորական պայմաններում 30 օր անց կաշուն ամրությունը եղել է **1.3 ± 0.2 MPa**: Թիթեղները ուժով բաժանելուց, կրկին իրար վրա դնելուց և տաքացնելուց հետո ամրությունը եղել է **1.2 ± 0.2 MPa**: Այդ ցիկլը տասը անգամ կրկնելուց հետո էլ ստացվել է մոտ **1.3 ± 0.3 MPa**:

Լավագույն տարբերակը հիմնական մոլեկուլը չէր: Երեք fmoc խումբ ունեցող հարակից մոլեկուլը՝ **CyclicFP-fmoc3**, PTFE-ի վրա հասել է **2.3 ± 0.2 MPa**: Այնուամենայնիվ, աշխատանքը մեծ ուշադրություն է դարձնում CyclicFP-fmoc-ին, որովհետև այն համատեղում է ամրությունը, դուկտիլությունը, մեխանիզմի ապացույցները և մաքրելով հեռացվելու հատկությունը:

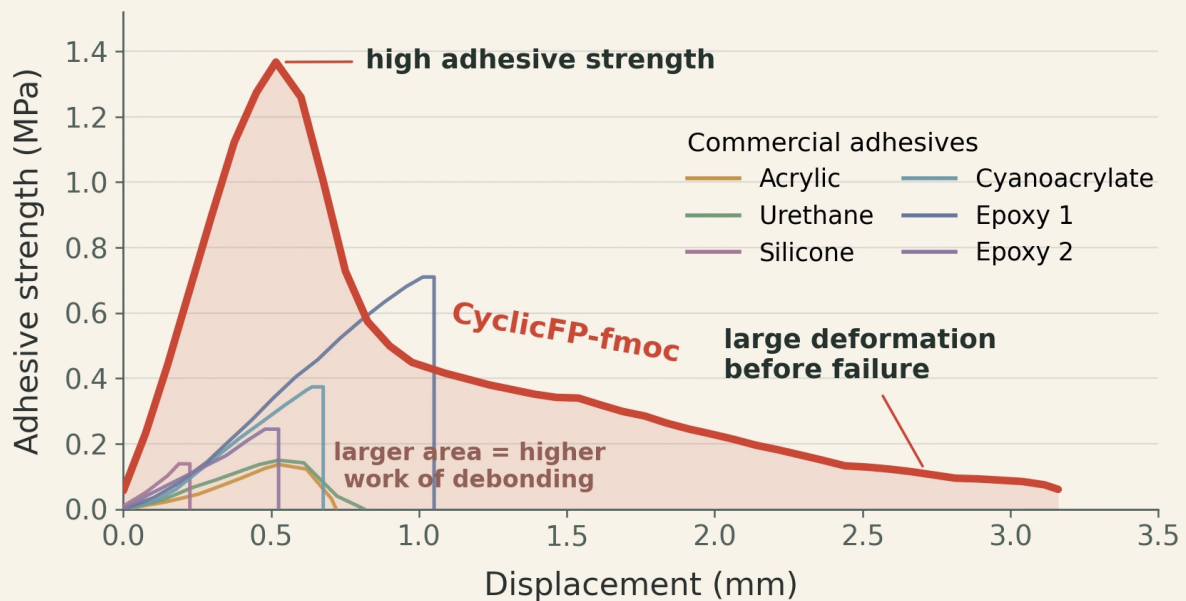
Դուկտիլությունը պնդման երկրորդ կեսն է

Միայն ամրությունը բավարար չէր լինի: Փխրուն սոսինձը կարող է հասնել բարձր գազաթային լարման, ապա հանկարծակի խափանվել: Աշխատանքի ավելի առանձնահատուկ պնդումն այն է, որ CyclicFP-fmoc-ը նաև դուկտիլ վարք է ցուցաբերում:

Lap-shear կորերում CyclicFP-fmoc-ը հասնում էր առավելագույն լարման, ապա տեղաշարժի շարունակման հետ աստիճանաբար կորցնում լարումը: Աշխատանքում փորձարկված առևտրային սոսինձները ավելի շատ փխրուն միացումների նման էին պահում իրենց. խափանումը գալիս էր գազաթային լարումից քիչ անց:

CyclicFP-fmoc combines strength and ductility

Approximate stress-displacement traces for untreated PTFE lap joints



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

CyclicFP-fmoc-ը համատեղում է լարման բարձր գագաթը երկար հետգագաթային «պոչի» հետ. ստվերավորված մակերեսը խմբագրական ուղեցույց է՝ ցույց տալու դրա ավելի մեծ անջատման աշխատանքը: Մոտավոր կորերը թվայնացվել են Նկար 3f-ից և հում փորձարարական տվյալներ չեն:

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

Հեղինակները լարում-տեղաշարժ կորի տակ գտնվող մակերեսը քանակապես արտահայտել են որպես անջատման աշխատանք: CyclicFP-fmoc-ը PTFE-ի վրա տվել է **1300 N/m**: Փորձարկված առևտրային սուսինձների միջակայքը եղել է **26-ից 314 N/m**:

Խափանման ձևը համապատասխանում է այդ մեկնաբանությանը: CyclicFP-fmoc-ով PTFE միացումները խափանվել են կոհեզիվ կերպով՝ սոսնձի ներսում: Սա նշանակում է, որ սոսինձը կարող էր էներգիա ցրել՝ ներսում դեֆորմացվելով, մինչդեռ տվյալ փորձերում PTFE միջերեսը մնում էր ավելի ամուր, քան սոսնձային շերտի զանգվածային մասը:

Լարման թուլացման փորձերը տալիս են նաև մոլեկուլային ժամանակային մասշտաբը: 20 C-ում բնորոշ թուլացման ժամանակը եղել է **60 ms**, իսկ Արենիոսի վերլուծությունը տվել է **33.8 kJ/mol** ակտիվացման էներգիա: Պարզ ասած՝ սոսնձային շերտը կարող է բավական արագ վերադասավորվել՝ հանկարծակի լարման կենտրոնացումը մեղմելու համար, փոխանակ իրեն ստատիկ փխրուն պինդ մարմնի պես պահելու:

Ինչո՞ւ են հեղինակները կարծում, որ ֆտորը կարևոր է

PTFE-ն կառուցված է ածխածին-ֆտոր կապերից: CyclicFP-fmoc-ը պարունակում է ֆտորացված crown-ether խմբեր: Հեղինակները պնդում են, որ **F-F փոխազդեցությունները** օգնում են սոսնձին կապվել PTFE-ին, մինչդեռ մյուս փոխազդեցությունները օգնում են սոսնձային շերտին միասին մնալ ու դեֆորմացվել:

Մի քանի վերահսկիչ փորձեր աջակցում են այդ պատկերին: Երբ CyclicFP-fmoc-ի ֆտորի ատոմները փոխարինվել են ջրածնի ատոմներով, ստացված CyclicP-fmoc-ը PTFE-ին շատ ավելի թույլ է կպել՝ մոտ **0.1 ± 0.0 MPa**: Գծային fluoro-ether phosphate-ը՝ AcyclicFP-fmoc-ը, հասել է միայն **0.3 ± 0.1 MPa**: π -դասավորման կամ ջրածնային կապ ստեղծող միավորներ չունեցող տարբերակները նույնպես ավելի վատ արդյունք են տվել:

Աշխատանքն այնուհետև օգտագործում է սպեկտրոսկոպիան և բյուրեղային կառուցվածքը՝ փոխազդեցությունների այս պատկերը հիմնավորելու համար: CyclicFP-fmoc բյուրեղում հարևան մոլեկուլների ֆտորի ատոմները միմյանցից գտնվում են **2.49-ից 2.91 անգստրեմ** հեռավորության վրա՝ ավելի քիչ, քան երկու ֆտորի ատոմների **2.94 անգստրեմ** վան դեր Վաալսյան գումարը: FT-IR-ը և փոփոխական ջերմաստիճանի NMR-ը աջակցում են ամորֆ սոսնձում ջրածնային կապերի, F-F փոխազդեցությունների և π - π դասավորման առկայությանը:

PTFE-ի համար ամենաուղղակի ապացույցը պինդ վիճակի **^{19}F MAS NMR** սպեկտրների տեղաշարժն է, երբ CyclicFP-fmoc-ը խառնվում է PTFE նանոմասնիկների կամ բարակ PTFE թիթեղների հետ: Ոչ ֆտորացված վերահսկիչը նույն տեղաշարժը չի տալիս: Սա արդեն ապացույց է, ոչ միայն նախագծային սխեմա, որ սոսնձի ֆտորացված հատվածները փոխազդում են PTFE-ի հետ:

Այնուամենայնիվ, սա չպետք է պարզեցնել մինչև «F-F կապերը լուծում են PTFE-ի խնդիրը»: Աշխատանքի սեփական մոդելն ավելի բազմաշերտ է. միջերեսային F-F փոխազդեցությունները նպաստում են PTFE-ին կպչելուն, իսկ ջրածնային կապերն ու π - π դասավորումը նպաստում են սոսնձային շերտի կոհեզիային և դուկտիլությանը:

Մաքրելով հեռացումը իրական է, բայց սահմանափակ

Հեռացման արդյունքը գործնական առումով ամենագրավիչ մասն է: Հեղինակները անջատված PTFE թիթեղները լվացել են էթանոլով և իրենց ցուցադրությունում հաղորդում են CyclicFP-fmoc-ի ամբողջական հեռացում՝ առանց մնացորդի: Նրանք նաև վերականգնել և բազմիցս վերօգտագործել են սոսինձը՝ վերօգտագործման փորձերում պահպանելով մոտ **1.2 ± 0.1 MPa** կպչուն ամրություն:

Սա կարևոր է, որովհետև սովորական ուժեղ սոսինձները հաճախ դժվար է մաքուր հեռացնել: Սոսինձը, որը կարող է պահել PTFE-ն և հետո լվացվել, օգտակար կլիներ վերանորոգման, ապամոնտաժման և վերօգտագործման համար:

Բայց սահմանները կարևոր են: Աշխատանքը փորձարկում է վերահսկվող նմուշներ, ոչ թե ամեն տեսակի աղտոտված արդյունաբերական մակերես, եղանակից հնացած միացում, լուծիչների ազդեցություն կամ երկարաժամկետ ծերացման պայման: PTFE թիթեղներից Էթանոլով մաքրումը նույնը չէ, ինչ բազմաթիվ նյութերից կազմված հավաքակազմերի ամբողջական վերամշակման գործընթաց ապացուցելը:

Աշխատանքում նաև ասվում է, որ CyclicFP-fmoc-ը PFAS «հավերժական քիմիական նյութ» չէ: Այդ պնդումը չպետք է ընդլայնել մինչև ամբողջական բնապահպանական ռիսկի գնահատում: Կայունությունը, թունավորությունը, արտադրության մասշտաբը, արտագատման ուղիները և կարգավորումը առանձին հարցեր են:

Ի՞նչ չի ապացուցում այս աշխատանքը

- Այն **չի** ցույց տալիս շուկայի համար պատրաստ սոսնձային արտադրանք:
- Այն **չի** ապացուցում, որ PTFE-ն այժմ կարելի է հուսալիորեն սոսնձել յուրաքանչյուր արդյունաբերական միջավայրում՝ առանց մակերեսի նախապատրաստման:
- Այն **չի** ցույց տալիս, որ Էթանոլով հեռացումը հավասարապես լավ է աշխատում բոլոր հիմքերի, մակերեսային վիճակների կամ հնացած միացումների վրա:
- Այն **չի** ապացուցում, որ միայն F-F փոխազդեցություններն են բացատրում կաշոնությունը: Աշխատանքի մեխանիզմը համատեղում է F-F փոխազդեցությունները, ջրածնային կապերը և $\pi-\pi$ դասավորումը:
- Այն **չի** ցույց տալիս պլաստիկի ամբողջական վերամշակման գործընթաց:
- Այն **չի** հաստատում սոսնձային մոլեկուլների ամբողջական բնապահպանական կամ թունաբանական անվտանգության պրոֆիլ:
- Այն **չի** նշանակում, որ առևտրային սոսինձները ընդհանուր առմամբ ավելի վատ են: Համեմատությունները վերաբերում են միայն այս աշխատանքում փորձարկված նյութերին և PTFE lap-shear պայմաններին:

Որքա՞ն ուժեղ է արդյունքը

Լաբորատոր նյութագիտական աշխատանքի համար արդյունքը ուժեղ է, որովհետև հեղինակները չեն սահմանափակվում մեկ բարձր թվով: Նրանք փորձարկում են ամրությունը, դուկտիլությունը, 30 օրվա կայունությունը, ջրի հանդեպ դիմացկունությունը, բազմակի վերաբռնումը, Էթանոլով հեռացումը, մոլեկուլային տարբերակները և առաջարկվող փոխազդեցությունների սպեկտրոսկոպիկ ապացույցները:

Ամենահամոզիչ համադրությունը խափանման ձևն ու վերահսկիչներն են: Եթե առաջինը խափանվեր PTFE միջերեսը, պնդումը ավելի թույլ կլիներ: Փոխարենը

միացումը խափանվում է սոսնձային շերտի ներսում: Եվ երբ ֆտորացված ցիկլիկ կառուցվածքը հեռացվում կամ փոփոխվում է, PTFE-ին կաշունությունը կտրուկ նվազում է:

Մնացած հարցերը մասշտաբն ու կիրառության պայմաններն են: Lap-shear փորձերը ստանդարտացված և օգտակար են, բայց իրական միացումները ենթարկվում են պոկման, հարվածի, հոգնածության, աղտոտման, ջերմաստիճանային ցիկլերի և տարբեր նյութերի համադրության: Մոլեկուլը, որը գեղեցիկ աշխատում է վերահսկվող լաբորատոր թիթեղների միջև, դեռ պետք է դառնա ձևակերպված արտադրանք, գործընթաց և երկարակեցության տվյալների հավաքածու, նախքան ինժեներական սոսինձ դառնալը:

Ինչո՞ւ է սա կարևոր

PTFE-ն նյութագիտության անհարմար սահմանագծում է: Նրա իներտությունը հենց այն հատկությունն է, որը նրան արժեքավոր է դարձնում, և նույն հատկությունն է, որ դժվարացնում է այն ներառել վերանորոգելի կամ վերամշակելի հավաքակազմերում:

Այս աշխատանքը առաջարկում է քիմիապես նպատակային, ոչ թե ուժային մոտեցում: PTFE մակերեսը կոպտացնելու կամ քիմիապես քայքայելու փոխարեն նախագծվում է փոքր մոլեկուլ, որը կարող է փոխազդել այդ մակերեսի հետ՝ միաժամանակ պահպանելով դուկտիլ և հետադարձելի սոսնձային շերտ:

Եթե այս նախագծային տրամաբանությունը ընդհանրացվի, այն կարող է օգնել ստեղծել սոսինձներ, որոնք ավելի հեշտ է հեռացնել ու վերօգտագործել՝ առանց ամբողջ մեխանիկական արդյունավետությունը զոհելու: Իրական խոստումը սա է՝ ոչ թե մեկ մոլեկուլ որպես պատրաստ սոսինձ, այլ մոլեկուլային ռազմավարություն ուժեղ, դուկտիլ և վերահսկելիորեն անջատվող կաշունության համար:

Կարճ ամփոփում

Կիկալան, Գոսվամին և գործընկերները ներկայացնում են ֆտորացված crown ether phosphate փոքր մոլեկուլներ որպես PTFE-ի և այլ հիմքերի սոսինձներ: Հիմնական մոլեկուլը՝ CyclicFP-fmoc-ը, չմշակված PTFE թիթեղները lap-shear փորձերում կապել է 1.3 ± 0.1 MPa ամրությամբ, խափանվել է կոհեզիվ կերպով՝ ոչ թե PTFE միջերեսում, տվել է 1300 N/m անջատման աշխատանք, պահպանել է արդյունավետությունը պահեստավորումից և բազմակի վերաբռնումից հետո և հնարավոր է եղել հեռացնել PTFE թիթեղներից էթանոլով լվացմամբ: Հարակից տարբերակը հասել է 2.3 ± 0.2 MPa: Սպեկտրոսկոպիան և վերահսկիչ մոլեկուլները աջակցում են մեխանիզմին, որտեղ F-F փոխազդեցությունները օգնում են PTFE միջերեսին, իսկ ջրածնային կապերն ու π - π դասավորումը՝ սոսնձային շերտին լարումը ցրել: Սա PTFE-ին ուժեղ, դուկտիլ և մաքրելով հեռացվող կաշունության խոստումնալից լաբորատոր

ցուցադրում է, ոչ դեռ առևտրային սոսինձ, համընդհանուր վերամշակման լուծում կամ բնապահպանական անվտանգության ամբողջական գնահատում:

Աղբյուրներ

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>