

## ХІМІЯ як "невидимий тренер" у спорті

Коли ми думаємо про спорт, перед очима постають секундоміри, штанги та фінішні стрічки.

Але якщо ми подивимось на спорт під сучасним кутом зору, то зрозуміємо, що це не лише виснажливі тренування, а й справжня «битва лабораторій». За кожним світовим рекордом стоїть «невидимий тренер» – хімія. Саме хімія є тією наукою, яка «придумала» склад підошви кросівок або молекулярну «кухню» тенісної ракетки. Маючи хімічне розуміння спортсмен не просто обирає дорожче спорядження, а свідомо керує своєю ефективністю та безпекою.

Візьмемо, до прикладу, сучасний спортивний одяг, в якому немає бавовни. Чому? Бавовна у професійному спорті – це справжній ворог, бо вона гідрофільна: швидко вбирає вологу, важчає та спричиняє переохолодження. І тому бавовну замінили сучасними полімерними мембранними тканинами, які не вбирають піт, а буквально «проштовхують» його назовні. Хімічний секрет мембранних тканин у тому, що отвори в мембрані в 20 000 разів менші за краплю води, але в 700 разів більші за молекулу  $\text{H}_2\text{O}$  у стані пари. Це дозволяє тілу «дихати», залишаючись захищеним від зливи поту.

Хіміки створили матеріали, міцність яких дозволила замінити важкий метал та дерево в спортивному обладнанні. І тут хімічним тріумфом є вуглецеве волокно, з якого одержали матеріал, легший за алюміній та міцніший за сталь. Якщо ви займаєтеся велоспортом, тенісом чи лижами, ви буквально покладаєтеся на міцність хімічних зв'язків у цих матеріалах. А такі розумні полімери, як етиленвінілацетат (EVA) або термопластичний поліуретан (TPU), навчилися поглинати енергію удару в кросівках, рятуючи коліна від травм.

Хімічні знання допоможуть навіть заощаджувати гроші, бо ми не будемо купувати псевдотехнологічний непотріб. Наприклад, поширеною глобальною помилкою є прання дорогої мембранної куртки звичайним пральним порошком. Справа в тім, що агресивні ПАР (поверхнево-активні речовини) та кондиціонери таких порошоків для прання забивають пори мембрани або руйнують водовідштовхувальний шар (DWR).

Щоб одяг не мав неприємного запаху, в структуру ниток додають йони Аргентуму або сполуки Купруму, які просто не дають бактеріям жити. Антибактеріальні властивості спортивного одягу це не просто маркетинг – це хімічне «прибирання» неприємного запаху, зниження ризику алергій та підвищення регенерації шкіри при подразненнях. Отже чистота твоїх речей – це теж хімія.

Зрештою, знання хімії – це та секретна зброя, яка є основою збереження спортивної функціональності. Ти станеш витривалішим, бо знаєш, яке харчування потрібне твоєму організму, як і навіщо використовувати харчові добавки, яке значення для організму має рН напоїв та яким має бути режим відновлення води в організмі, що втрачається через інтенсивні фізичні навантаження. А головне – ти уникаєш травм, бо розумієш, коли «втомилося» і потребує заміни спорядження.

Сучасний спорт – це не лише змагання спортсменів, це змагання технологій. Розуміючи хімію цих технологій, ми отримуємо «суперсили»:

- *Заощаджуємо гроші:* не купуємо підробки та знаємо, як доглядати за спорядженням.
- *Стаємо витривалішими:* правильно обираємо харчування з нейтральним рН та вчасно відновлюємо водний баланс.
- *Уникаємо травм:* розуміємо, коли матеріал шолома чи рами «втомився» і потребує заміни.

Підсумуємо: ХІМІЯ – це не про нудні формули та закони. Це про те, як зробити твій рух легшим, швидшим і безпечнішим, що надзвичайно важливо для досягнення спортивних успіхів.

## ХІМІЯ СПОРТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасний спорт – це на 50% фізика тіла і на 50% чиста хімія матеріалів. Більшість сучасних товарів спортивного одягу та матеріалів для спорту виготовлені з композитів, в основі яких нові синтетичні полімери.



### ДЕЩО ПРО КАРБОН ТА ВУГЛЕЦЕВІ ВОЛОКНА

Чому сучасні велосипеди важать менше, ніж рюкзак?

Чому тенісні ракетки не ламаються від найсильніших ударів?

Що спільного між діамантом, грифелем олівця та велосипедом за 10 тисяч доларів?

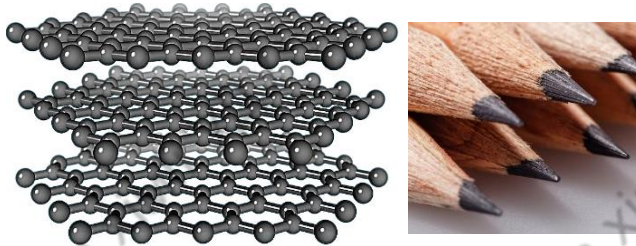
Усе це завдяки вуглецевому волокну (карбонівому волокну) – справжньому хімічному винаходу, який змінив правила гри. Далі розберемося, як це працює, на рівні атомів та технологій.

## Що таке вуглецеве волокно?

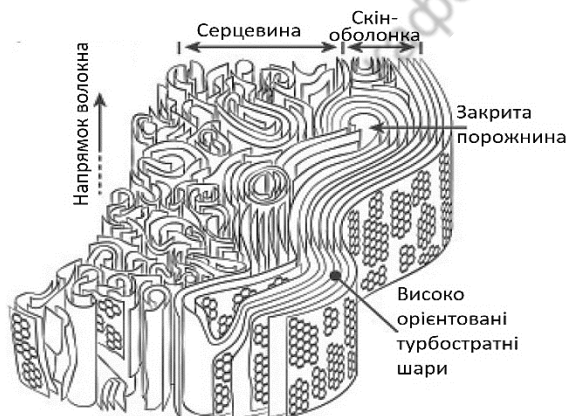
Це надзвичайно довгі та тонкі нитки. Їх діаметр всього 5–10 мікрон, що в



Мікроскопічне зображення вуглецевих волокон



Атомна структура графіту



волокна: «зім'ята» упаковка графітових шарів

десять разів тонше за людську волосину. Волокна побудовані на 90 % атомами Карбону ( $^{12}\text{C}$ ), а решта 10 % – це переважно атоми Нітрогену. Унікальні властивості вуглецевих волокон зумовлені специфічним розташуванням цих атомів.

**Структура.** Атоми Карбону в ньому об'єднані в шестикутні кільця, що утворюють графітові сітки, подібні до графіту, наприклад, олівців, але з іншим взаємним розміщенням сіток уздовж волокна.

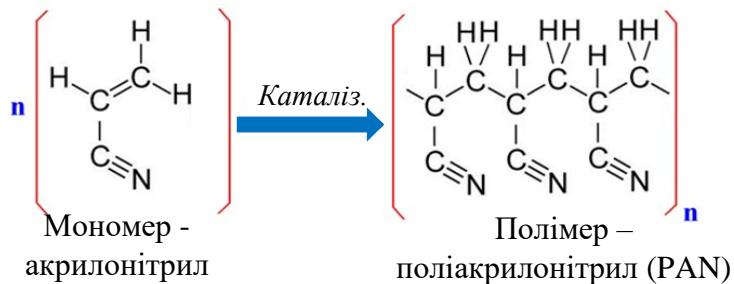
**Секрет міцності.** На відміну від графіту, де графітові сітки лежать паралельно та рівно, у вуглеволокну вони «зім'яті» або переплетені (таку структуру називають турбостратною). Саме це робить матеріал не крихким, а неймовірно міцним на розрив.

**Класифікація "К":** На деталях з вуглеволокну можна побачити маркування на кшталт 3К або 12К. Це кількість волокон у пучку: 3000 або 12000 відповідно. Чим більше "К", тим помітнішим буде характерний «шаховий» візерунок на тканині з цього волокна.



## Як «готують» вуглецеві волокна? (5 етапів хімічного синтезу)

Це складний процес перетворення рідкого полімеру на тверде надміцне волокно. Процес починається з утворення полімеру поліакрилонітрилу (PAN) з мономерів. Цей полімер є основним матеріалом для вуглецевого волокна.



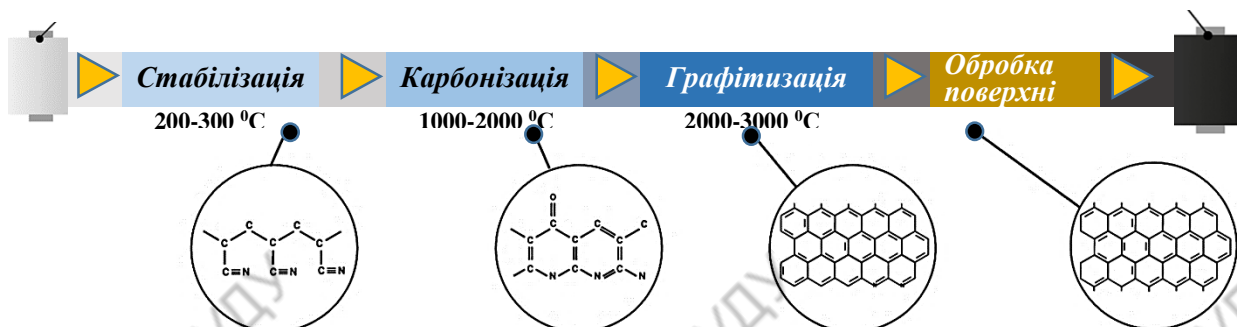
**Електроформування.** Полімер формують у волокна. При цьому полімерні ланцюги вирівнюються у напрямку волокна, що має вирішальне значення для міцності та жорсткості кінцевого вуглецевого волокна.

**Стабілізація.** Нитки впродовж години нагрівають до 200–300 °С на повітрі. Це запускає процеси *окиснення, циклізації, ароматизації та зшивання*, які змінюють структуру: лінійні ланцюги PAN перетворюються на циклічні та сходоподібні структури. Такі волокна мають високу термостабільність і не розплавляються на наступних високотемпературних етапах синтезу.

**Карбонізація.** Температуру піднімають до 800–1500 °С в атмосфері азоту або аргону – головне, без кисню. При цьому утворюються зайві газу (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HCN), які видаляються, волокна втрачають 50 % своєї маси і зменшуються в діаметрі, стаючи майже чистим вуглецем.

**Графітізація.** Нагрів вище 2000 °С для впорядкування атомів Карбону в структурі полімеру.

**Обробка поверхні волокна (апретування).** За допомогою електролізу поверхню ниток «готують» до склеювання зі смолою, здебільшого епоксидною.



## Чому карбонове волокно та вуглепластик краще за метал?

Одна з причин ефективності вуглецевого волокна полягає в способі його виготовлення. Волокна занурюють у смолу та скручують разом, подібно до ниток пряжі. Цей процес робить матеріал неймовірно міцним, майже як сталь, залишаючись таким же легким.

Давайте порівняємо карбоновий композит (вуглепластик) зі сталлю та алюмінієм:

Матеріал	Густина (г/см <sup>3</sup> )	Міцність
Сталь	7.80	Низька
Алюміній	2.70	Середня
<b>Вуглепластик</b>	<b>1.55 – 1.75</b>	<b>Надвисока</b>

Вуглецеве волокно потенційно здатне замінити сталь у таких високотехнологічних виробках як гоночні автомобілі та спортивний інвентар. Це хімічний винахід, який фактично створив сучасний професійний спорт, дозволивши подолати межі ваги та міцності, що були раніше недоступні для виробів з металу.

До того ж тканина з вуглецевого волокна має теплоізоляційні властивості і використовується для підвищення комфорту в одязі, наприклад, в гідрокостюмах і гірськолижному одязі. Вона легка і має високу міцність на розрив.



## ЛАБОРАТОРІЯ НА СТАДІОНІ: ЯК НОВІ ВУГЛЕЦЕВІ МАТЕРІАЛИ ЗМІНЮЮТЬ ПРАВИЛА ГРИ В СПОРТІ

Зазвичай вуглецеве волокно поєднують з епоксидною смолою, створюючи вуглепластик (Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP). Вуглецеві волокна забезпечують виняткову міцність і жорсткість, тоді як матриця утримує волокна разом і розподіляє навантаження. Полімер, який формує матрицю, є ключовим компонентом, різні типи якого пропонують різні властивості залежно від бажаного застосування: деякі полімери розроблені для стійкості до високих температур, тоді як інші надають пріоритет ударостійкості або гнучкості.

Тканина з вуглецевих волокон, просочених епоксидною смолою, називається «препрег»<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> <https://drive.google.com/file/d/1TgGLW6hTRbKsw7YSjKCmWKBqd41vwxWq/view?usp=sharing>

### Велосипедний спорт.

- **Міцність у поєднанні з легкістю.** Рами професійних велосипедів важать менше 800 грамів, але здатні витримувати величезні навантаження під час спринтів. Тільки для склеювання та армування карбонових рам, особливо в тих областях, де потрібна висока міцність або зносостійкість (каретки, рульові колонки та дропаути), беруть алюміній і титан.
- **Стійкість до корозії.** Рама не піддається корозії від поту або дорожньої солі, бо матеріал має високу хімічну інертність.
- **Магія напрямку (анізотропія).** Вуглецеві композитні матеріали залежно від напрямку прикладеної сили демонструють різні властивості. На відміну від металу, карбонові волокна можна викласти і зорієнтувати в матеріалі так, щоб він був жорстким в одному напрямку і гнучким в іншому. Це дозволяє налаштувати раму під конкретного гонщика.

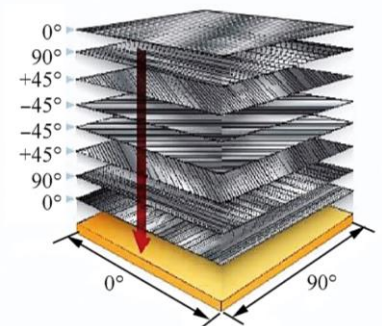


Окрім вуглецевого волокна, у виробництві велосипедів використовуються інші матеріали, такі як скловолокно, кевлар і навіть біокомпозити. Скловолокно забезпечує високу міцність та економічну ефективність, тоді як кевлар зумовлює чудову ударостійкість.

### Паралімпійська атлетика

У знаменитих бігових протезах (наприклад, "Cheetah") кожен шар вуглецевого волокна розміщується під певним кутом відносно іншого. Поєднання шарів з різнонапрямлених волокон у пластині для стопи, гільзі або опорному компоненті забезпечує безпечне керування тиском під час руху.

Завдяки високій пружності, матеріал накопичує потенційну енергію при натисканні та повертає її, імітуючи роботу ахіллового сухожилля.





## Теніс та зимові види спорту

На зорі тенісного спорту широко використовувалася переважно деревина. Значно рідше ракетки вироблялись зі сталі та алюмінію. Хоча ці матеріали забезпечували хорошу жорсткість, вони мали обмеження щодо ваги, амортизації та довговічності. Крім того, через крихкість та структурну нестабільність дерев'яних виробів дерев'яні ракетки поступово вийшли з ужитку.

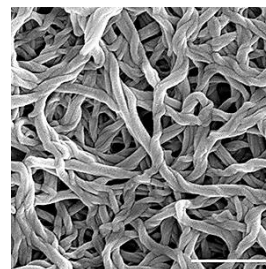
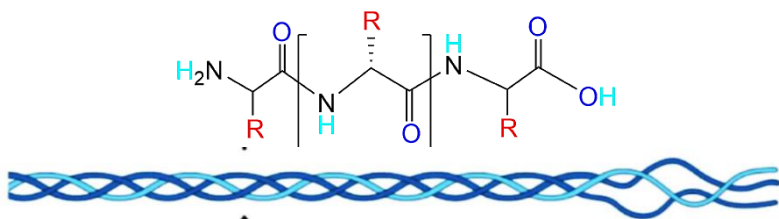
Першим волокном, яке використали на початку 1970-х років 20 століття в композитному матеріалі рами тенісної ракетки, було скловолокно. Однак подальше його використання зупинили через гнучкість і велику вагу.

У рамках сучасних тенісних ракеток вуглеволокно зміщує центр ваги та гасить вібрації, що зменшує ризик травми «тенісного ліктя»; дозволяє швидко та точно реагувати під час гри. Такі ракетки менш схильні до деформації з часом.

*У функціональному дизайні тенісних ракеток часто використовуються також кевлар або оксид графену та інші полімерні матриці, такі як поліпропілен (ПП), полівініліденфлуорид (ПВДФ) та поліаміди (найлон). Поліпропілен зумовлює хороший баланс між міцністю та технологічністю, тоді як ПВДФ забезпечує чудову стійкість до втоми та хімічну стабільність.*

Тенісні струни в ракетках можуть бути з кількох полімерних речовин: натуральних волокон, кевлару, найлону та поліестеру.

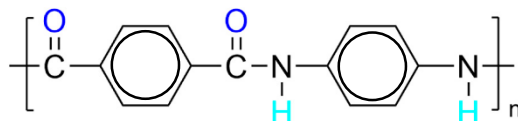
Натуральні тенісні струни отримують з кишок бика. Вони складаються з трьох високоорієнтованих поліпептидних ланцюгів – колагенових волокон, скручених разом у потрійну спіраль:



Натуральна кишкова струна продовжує використовуватися з моменту її появи в 1876 році, оскільки вона дуже еластична та краще підтримує натяг, ніж інші струни, забезпечуючи переваги як у продуктивності, так і в довговічності, з меншим часом, протягом якого м'яч контактує зі струною, та більшою швидкістю вильоту. Але температура та вологість є основною проблемою для натуральних матеріалів: за підвищеної вологи вони розкручуються.

Тому, незважаючи на переваги у механічних властивостях, струни з колагену наразі замінені на струни з кевлару, поліестеру і найлону.

*Кевлар* – найміцніше волокно, створене хімічним синтезом. Завдяки присутності циклічних структур в молекулі, волокна кевлару втрачають натяг повільно, як і натуральне волокно. Кевларові струни забезпечують кращий контроль та підтримку натягу з часом в обмін на меншу міцність після багаторазових сильніших ударів.



*Найлон* (див. нижче) став найпоширенішим типом тенісних струн, оскільки він забезпечує найкращий компроміс між відчуттям, контролем, ціною та довговічністю – його властивості не залежать від погодних умов.

*Поліестерні струни* використовуються як на професійному, так і на аматорському рівні, і виготовляються переважно з поліетилентерефталату (ПЕТ). Поліестерні струни міцні, довговічні та універсальні, але набагато жорсткіші, ніж натуральні.

Про значення цих полімерів для спорту ми поговоримо ще трошки нижче.

*Лижі та сноуборди* теж виготовляють з вуглепластику. Це дозволяє зробити спорядження «жорстким на скручування», що критично для керованості на високих швидкостях.



## ПОЛІУРЕТАНИ – ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СТРУКТУРИ У СПОРТІ

Як «жорсткі» та «м'які» блоки працюють в одній молекулі?

Як хіміки проєктують молекули поліуретану, щоб вони могли самі себе зміцнювати під час навантаження?

Секрет тут не лише в тренуваннях, а й у хімії поліуретанів – матеріалів, які вчені називають «інтелектуальними структурами».

### Що таке поліуретан і чому його властивості особливі?

Уяви собі конструктор LEGO, де можна поєднувати жорсткі блоки з м'якими гумовими деталями. Поліуретан (PU) працює саме так: хіміки змінюють

співвідношення жорстких та гнучких частин, щоб матеріал був то легким як піна, то еластичним як гума, то міцним як пластик.

### Жорсткі та м'які сегменти – таємниця міцності PU.

Поліуретан унікальний тим, що молекули мають два типи блоків:

- жорсткі сегменти утворюють міцні «вузли», які відповідають за те, щоб матеріал не розривався під великим навантаженням;
- гнучкі сегменти – це довгі ланцюги, що забезпечують еластичність і забезпечують здатність до розтягування.

### Які хімічні «складові» поліуретанів?

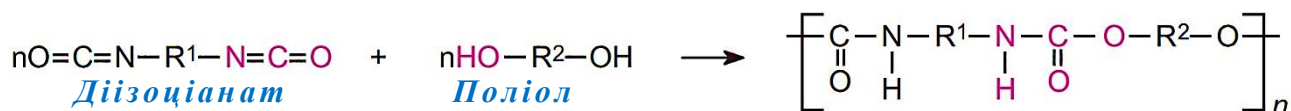
Поліуретани (PU) – це гетероланцюгові полімери, головною особливістю яких є наявність уретанової групи  $\text{—NH—CO—O—}$ .



Поліуретани утворюються в результаті екзотермічних реакцій *поліконденсації*<sup>2</sup> між:

1. спиртами – діолами, тріолами та поліолами – в молекулі яких є дві або більше реакційноздатні гідроксильні ( $\text{—OH}$ ) групи;
2. ізоціанатами – діізоціанатами та поліізоціанатами, в молекулі яких є більше однієї реакційноздатної ізоціанатної групи ( $\text{—N=C=O}$ ).

Наприклад, діізоціанат реагує з діолом:



де  $\text{R}^1$  – ароматичний<sup>3</sup> або аліфатичний<sup>4</sup> залишок ізоціанату, а  $\text{R}^2$  – довгий ланцюг поліолу.

### Трохи історії

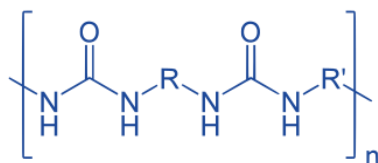
Поліуретани були одержані Отто Байєром та його командою (Німеччина) у 1937 році. Для синтезу використали аліфатичний діізоціанат та полісечовину –

<sup>2</sup> Реакція поліконденсації – це процес синтезу високомолекулярних сполук (полімерів), шляхом одночасної взаємодії характеристичних (функціональних) груп усіх молекул мономерів.

<sup>3</sup> Ароматичний замісник (Ar) – група, утворена відщепленням одного або кількох атомів Гідрогену від ароматичного вуглеводню (наприклад бензену).

<sup>4</sup> Аліфатичний замісник – залишок молекули насиченого або ненасиченого ациклічного (з відкритим ланцюгом) вуглеводню, який містить на один або кілька атомів Гідрогену менше ніж вихідна сполука.

полімер, розроблений ще в 80-х роках ХХ століття для гідроізоляційного і антикорозійного захисту (для галузі кораблебудування):



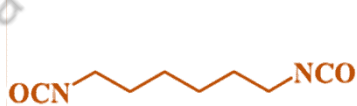
Полімерні аміди карбонатної кислоти з карбаматними групами  $-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-\text{NH}-$  в основному ланцюзі макромолекули

Але згодом гліколі (поліоли) замінили полісечовину, покращивши властивості поліуретану.

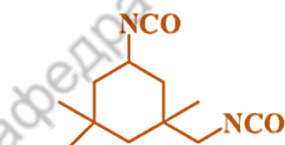
### За якими комбінаціями («рецептами») хіміки «готують» різні за властивостями поліуретани?

Існує два основних класи діізоціанатів: аліфатичні та ароматичні. Їх вибір під час синтезу визначає властивості поліуретанових продуктів – від гнучких до надзвичайно жорстких структур.

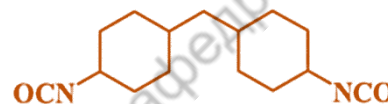
**Аліфатичні діізоціанати** – гексаметилен діізоціанат (HDI), ізофорон діізоціанат (IPDI) – характеризуються тим, що не жовтіють та мають нижчу реакційну здатність. Їх використовують в матеріалах, де критично важлива стабільність до ультрафіолету та збереження кольору.



Гексаметилен діізоціанат (HDI)

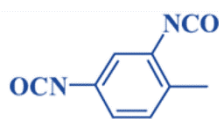


Ізофорон діізоціанат (IPDI)

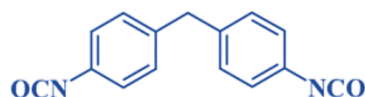


Гідрогенізований MDI (HMDI)

**Ароматичні діізоціанати** – це нафталенові діізоціанати (NDI), толуен діізоціанат (TDI) та дифенілметан діізоціанат (MDI) – домінують на світовому ринку поліуретанових пін, складаючи понад 90 % від загального обсягу використання.

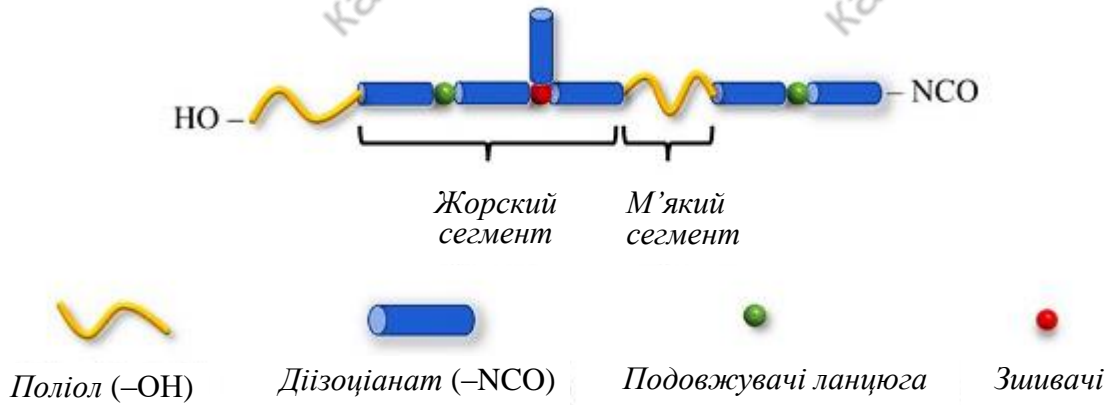


Толуен діізоціанат (TDI)

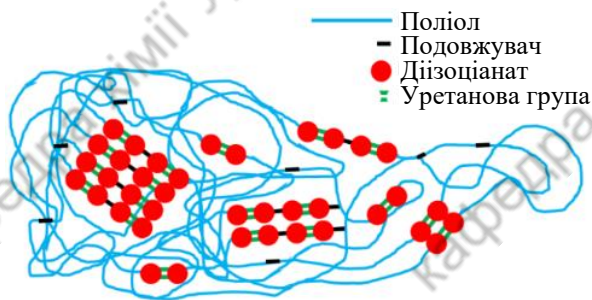
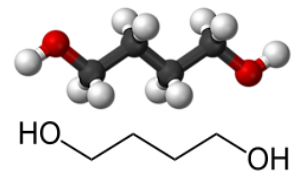


Дифенілметан діізоціанат (MDI)

Поліуретановий макромолекулярний ланцюг «готують» комбінацією жорстких сегментів (Hard Segments) – діізоціанатів та гнучких сегментів (Soft Segments) – спиртів (діолів, тріолів та поліолів):



Жорсткі супрамолекулярні сегменти можуть нарощувати з використанням подовжувачів ланцюга, якими є зазвичай короткі діоли, зокрема бутан-1,4-діол. Між ланцюгами PU саме вони утворюють сильні водневі зв'язки, що створює "вузли кристалізації" – домени, які відповідають за міцність та здатність матеріалу не розриватися під навантаженням.



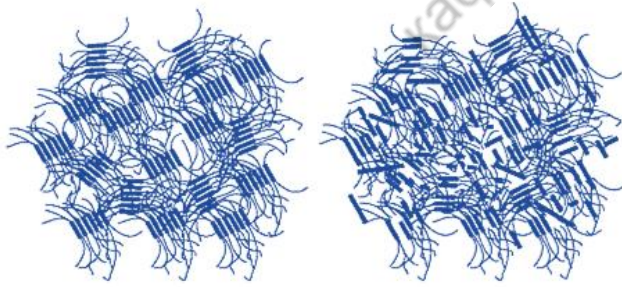
Гнучкі сегментовані структури є довгими ланцюгами поліолів, які зшиті жорсткими ароматичними сегментами. Вони перебувають в аморфному стані й забезпечують високу еластичність поліуретану (здатність до розтягування).

Конструювання молекул PU з різних типів м'яких та жорстких сегментів, подовжувачів ланцюга та зшиваючих агентів, дозволяє створювати різні молекулярні структури та функціонально-індуковані матеріали: наприклад, змінювати терморективні<sup>5</sup> властивості полімерів на термоеластичні<sup>6</sup> із здатністю до механоцутливого самозміцнення<sup>7</sup>. Таке проектування молекулярної структури наразі є основними методами регулювання властивостей поліуретанів.

<sup>5</sup> Терморективні полімери – полімери, які при нагріванні або під дією отверджувачів зазнають необоротних хімічних змін (зшивання молекул) з утворенням міцної просторової структури; вони не плавляться при повторному нагріванні, а розкладаються.

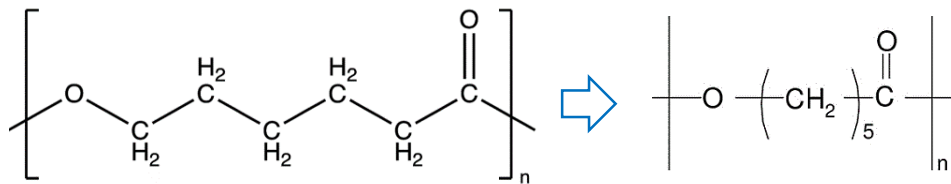
<sup>6</sup> Термоеластичні полімери – це полімерні матеріали, що оборотно розм'якшуються при нагріванні (переходять у в'язкотекучий стан) і застигають при охолодженні, зберігаючи набуту форму; вони придатні до багаторазової переробки

<sup>7</sup> Самозміцнення (самоармування) – явище, притаманне монополімерам, в яких «скелет» полімеру (армована фаза) знаходяться в матриці полімеру у вигляді орієнтованих волокон, пластівців або частинок.

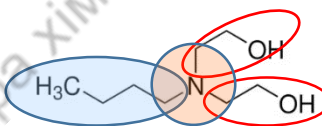


Схема, що показує довжини та розміри доменів твердих сегментів, а також незв'язані поодинокі тверді сегменти поміж м'яких сегментів

У поліуретанах найпоширенішим регулятором процесу самоармування та самозміцнення є полікапролактон (PCL) – біорозкладний поліестер з низькою температурою плавлення приблизно 60 °С:

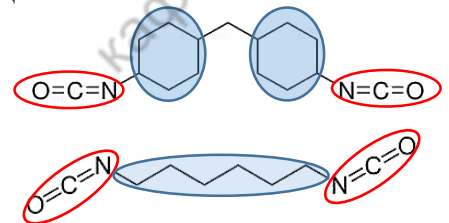


Унікальних властивостей щодо здатності до зворотного розтягування вдалося досягти і при використанні мономеру *n*-бутилдіетаноламіну (BDEA) для формування м'якого сегмента

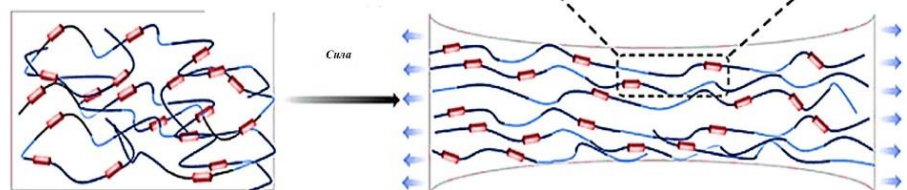


та регулюванні молярних співвідношень двох діізоціанатів:

- жорсткого 4,4'-метиленбіс(циклогексилізоціанату)
- гнучкого гексаметилендіізоціанату (HDI).



Під час розтягування структура полімеру перетворюється з неупорядкованої на впорядковану і орієнтовану, забезпечуючи механічну міцність, в'язкість та стійкість до розтріскування під дією навантаження.





## ПОЛІУРЕТАН У ДІЇ: ВІД КРОСІВОК ДО СТАДІОНУ

У професійному спорядженні PU рідко використовується в чистому вигляді. Його перетворюють на композити, додаючи армувальні компоненти або змінюючи фізичний стан (спінювання).

### «Космічна» підошва з поліуретану



Як підошва може повертати енергію?

Чому гранули спіненого поліуретану називають «мікроскопічними пружинами»?

Чому сучасні кросівки «відстрибують» від землі самі?

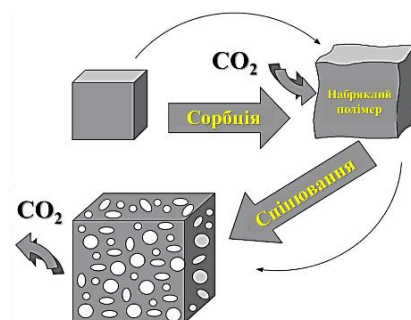
Ви точно бачили кросівки з підошвою, схожою на спресовані пінопластові кульки? Це спінений термопластичний поліуретан (eTPU). Цей революційний матеріал (технологія Adidas Boost) використовується для взуттєвих матеріалів (підошви кросівок, лижні черевики), буферних пристроїв для спорту (наприклад, в тенісних ракетках), велосипедних сідел, бігових доріжок, безповітряних шин – тобто майже в кожному типі спорядження, яке вимагає амортизації, гнучкості, комфорту та довговісності.



Його універсальність дозволяє створювати спорядження як для початківців, так і для професіоналів, для тренажерних залів та екстремальних видів спорту.

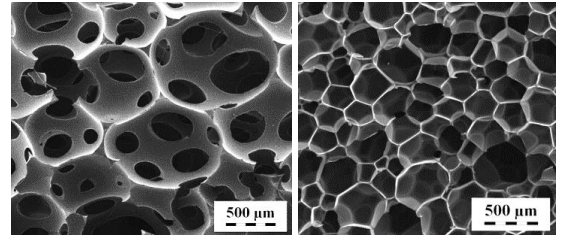
**Хімія повернення енергії.** У синтезі поліуретанової піни важливим є вибір піноутворювачів, які забезпечують формування комірчастої структури матеріалу через утворення газу та його вихід з спіненої маси.

Найекологічніший сучасний спосіб одержання пінополіуретану включає насичення гранул поліуретану газом (наприклад, азотом  $N_2$  чи вуглекислим газом  $CO_2$ ) за високих тисків і температур. При подальшому різкому зниженні тиску



внаслідок розширення газу відбувається "вибухове" збільшення гранул через утворення бульбашок газу та формування пористої комірчастої структури.

За структурою є PU-піни з відкритими та закритими комірками. Гнучкі PU містять переважно відкриті комірки, тоді як структура щільних і жорстких PU більше ніж на 90 % складається із закритих комірок, де кожна гранула діє як мікроскопічна пружина.



Мікроскопічне зображення поліуретанових пінопластів з відкритою (а) і закритою (б) комірчастою структурою

**Ефект пружини.** Коли атлет

наступає на підошву, гнучкі сегменти PU стискаються, накопичуючи енергію. Завдяки високій стабільності, вони миттєво повертаються в початковий стан, виштовхуючи стопу.

### Як надати полімеру «скелет»: армовані PU-еластомери



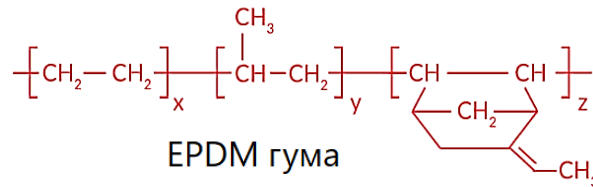
Що станеться, якщо всередину еластичного поліуретану додати вуглецеве волокно або скляні нитки? Як це перетворює звичайну гуму на матеріал, що міцніший за деякі метали?

Завдяки наявності полярних уретанових груп PU має високу адгезію – тобто здатність до зчеплення з армувальними<sup>8</sup> волокнами. Таке армування є не просто додаванням «сміття» в пластичну масу, це створення нового суперматеріалу – композиту, де переваги обох компонентів підсилюють одна одну. Композитний армований PU-матеріал одержують додаванням у рідкий поліуретан перед твердінням крихти гуми, скловолокна або вуглецевих волокон.

Армування PU волокнами запобігає розшаруванню композиту при екстремальних вигинах, тому з нього виготовляють матеріали та деталі, що мають витримувати удари (кріплення для лиж, захисні пластини).

<sup>8</sup> Армування – це зміцнення полімеру міцнішими матеріалами (металеві сітки, скловолокно, вуглецеві волокна тощо) для зменшення його теплового лінійного розширення, підвищення стійкості до розривів та деформацій під навантаженням. Забезпечується формуванням молекулярного «скелета» полімеру.

**Покриття бігових доріжок.** Поліуретанові покриття на стадіонах – це суміш PU як сполучної речовини, яка є матрицею для гумової крихти (EPDM-гума: етилен-пропілен-дієновий каучук):



Під час формування доріжки реакція твердіння відбувається безпосередньо на місці укладання.

Ця полімерна суміш створює безшовний, гнучкий та еластичний шар, який забезпечує стабільну продуктивність на спортивних майданчиках, бігових доріжках, дитячих майданчиках та в спортзалах. Вона зміцнює поверхню, запобігаючи появі тріщин та *розпаду з часом*; *забезпечує стабільний відскок, зчеплення та поглинання ударів* – ключові фактори для змагальної гри. Покриття є стійким до ультрафіолетового випромінювання (щоб не руйнуватися на сонці), має високу адгезію до основи та забезпечує високу амортизацію ударів, що рятує суглоби атлетів від травм.



**Поліуретанові волокна та текстиль: про еластан, спандекс та гідрокостюми**

Чи може купальник бути «допінгом»?

Як одяг може «обманути» воду?

Чи може нитка розтягуватись у 6 разів і не порватися?

Волокна на основі поліуретану – спандекс – легкі, але водночас дуже міцні, що робить їх ідеальними для матеріалів, де важливі гнучкість і комфорт. У текстильній промисловості спандекс рідко використовується окремо: зазвичай його змішують з іншими волокнами, такими як бавовна, поліестер та найлон, для створення змішаних ниток, з яких виробляють еластичний спортивний одяг, медичний текстиль та облягаючий одяг.

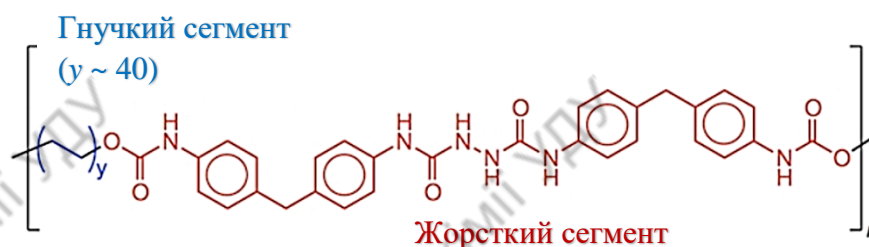
- Додавання спандексу до бавовни надає тканині еластичності, зберігаючи при цьому здатність матеріалу «дихати».

- Найлонова спандексна тканина – це високоефективний композит, де найлон забезпечує зносостійкість, а спандекс – ідеальну посадку на тілі.

### Трошки про хімію та історію спандексу

Спандекс – це сучасне синтетичне волокно, винайдене в 1958 році хіміком Джозефом Шиверсом з компанії DuPont. Назва цього синтетичного матеріалу походить від слова «розширюється»: волокна спандексу можуть розтягуватися на 500–600 % і миттєво повертатися в початковий стан. Найпоширеніший тип волокна спандексу у таких тканинах як «Лайкра» представлений довгими молекулярними ланцюгами полімеру поліуретан/сечовина.

З точки зору хімії властивість розтягуватись майже у 6 разів зумовлена гнучкими довгими молекулярними сегментами поліолу в молекулі поліуретану, які перебувають у сплутаному стані:

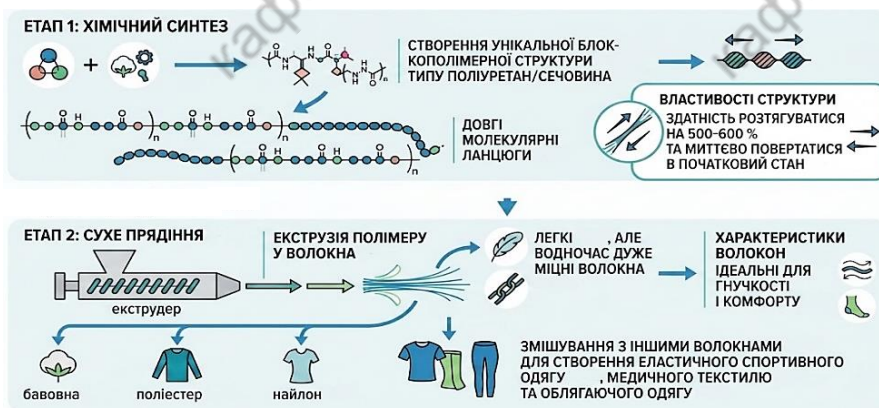


Жорсткими сегментами є короткі ділянки, утворені ізоціанатами та молекулами сечовини. Вони з'єднуються між собою ковалентними зв'язками, утворюючи міцні «вузли», які не дають молекулам розірватися і змушують їх миттєво повертатися в початковий стан після зняття навантаження.

Процес створення спандексного волокна з поліуретану<sup>9</sup>, винайдений у 1958 році Джозефом Шиверсом. Виробництво включає складний хімічний синтез полімеру з подальшою фізичною екструзією у волокна методом сухого прядіння.

1. *Синтез полімеру.* Спершу змішують поліолі з діізоціанатом, отримуючи преполімер.
2. *Екструзія (Сухе прядіння).* Отриманий в'язкий розчин преполімеру продавлюють крізь спеціальні фільтри (крихітні отвори) у камеру з гарячим газом. Розчинник випаровується, а рідкі струмені тверднуть, перетворюючись на міцні волокна.

<sup>9</sup> <https://drive.google.com/file/d/13PrPFtUBdBtw1v8qnv2NfkhqalrXvih/view?usp=sharing> .



До 1980-х років це універсальне волокно здійснило революцію в дизайні моди та спортивного одягу, зокрема у водних видах спорту, завдяки керуванню поверхневою енергією матеріалу.

- У триатлоні та професійному плаванні в гідрокостюмах використовується еластична підкладка – це найлонова спандексна тканина, яку часто називають «розтягуванням на 360°».
- Поліуретанове покриття (як у легендарних костюмах Speedo LZR Racer) в гідрокостюмах наноситься на неопрен, який зазвичай називають «гладкою шкірою» або «покритою шкірою». Цей шар підвищує довговічність, збільшує гідродинаміку для зменшення тертя об воду, що зумовлює ефект «шкіри дельфіна», та запобігає поглинанню води. В основному використовується в триатлоні та підводному полюванні, він збільшує міцність поверхні та забезпечує захист від ультрафіолету

Унікальні властивості цього матеріалу привели до того, що у 2008-2009 роках у такому виді спорту як плавання сталась цікава і водночас скандальна історія. Плавці у костюмах з поліуретановим покриттям встановили десятки світових рекордів. Чому? Тепер нам відомо, що поліуретанове покриття допомогло зменшити опір води та підвищити плавучість настільки, що такі костюми згодом назвали «технологічним допінгом» і заборонили.



### Плівки PU у надміцних і «розумних» тканинах

Як тонкий шар пластику перетворює звичайне взуття на медичну лабораторію та спортивний гаджет?

Високоміцні плівки TPU – це ідеальний «дім» для датчиків. Вони гнучкі, як тканина, але захищають електроніку не гірше за твердий пластик.

Їх використовують для «розумних» устілок – гнучкою електронікою під ногами, які мають особливі можливості:

- *чутливість до тиску*: плівка настільки тонка та еластична, що дозволяє датчикам фіксувати найменші зміни в розподілі ваги тіла;
- *стійкість до циклічних навантажень*: під час бігу ми робимо тисячі кроків, але TPU не «втомлюється» – вона розсіює енергію удару і щоразу повертає свою форму, забезпечуючи постійний контакт датчика зі стопою;
- *здатність діагностувати в реальному часі* під час тренувань, терапії та щоденних рухів. Наприклад, такі устілки можуть помітити, що ти почав трохи «завалювати» стопу всередину. Це сигнал: якщо не змінити техніку бігу, за тиждень може виникнути травма коліна. Отже їхні вбудовані датчики допомагають виявляти хвороби, попереджати про ризики травм на ранній стадії, відстежувати одужання.



*Чому для кайтів (повітряних зміїв для серфінгу) чи крил не використовують звичайну гуму?*

Бо вона була б занадто важкою. Високоякісні поліуретанові плівки мають вражаючу легкість і водночас міцність на розтягування, стійкість до проколів і розривів. Саме тому їх можна робити надзвичайно тонкими!

Це їх ключова перевага у спортивному дизайні, особливо для таких застосувань, як надувні камери для серфінгових кайтів та матеріали для крил, які повинні бути легкими, гнучкими і міцними.



*Чому футбольні м'ячі не вбирають воду навіть у зливу?*

*Чи можна створити матеріал-хамелеон?*

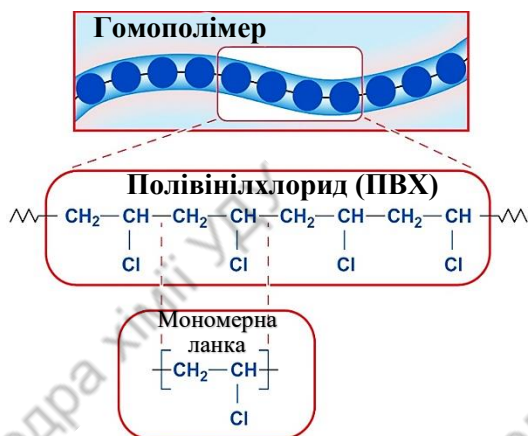
Сучасні футбольні м'ячі (наприклад, ті, що використовуються на чемпіонатах світу FIFA) майже повністю складаються з поліуретанових шарів.

Зовнішній шар-покриття – це *синтетична шкіра* на основі 6 секцій термопластичного PU, склеєних між собою. Замість швів використовується термічне склеювання поліуретановим клеєм, що робить

поверхню безшовною. Така поліуретанова синтетична шкіра забезпечує механічний захист м'яча, запобігає надмірному поглинанню води (на відміну від натуральної шкіри) та зберігає ідеальну аеродинамічну форму. У дешевших футбольних м'ячах покриття може бути виготовлено з ПВХ (полівінілхлориду) замість поліуретану.

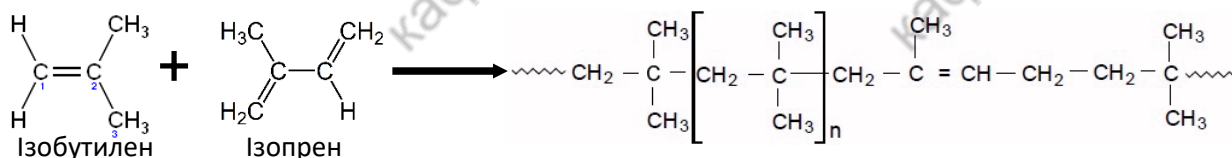
М'ячі також можуть бути зшиті, а не склеєні термозварюванням. Ці шви виконуються з іншого класу полімерів – поліестерів; у м'ячах вищого класу вони можуть бути посилені кевларом. Проміжний шар – це високоеластична PU-піна для стабільної траєкторії польоту.

Під зовнішнім шаром м'яч має кілька шарів підкладки. Вони призначені для покращення відскоку та міцності м'яча. У м'ячі чемпіонату світу вони виготовлені з іншого класу полімерів – поліамідів, які частіше називають найлоном. Використовують також і поліестери.



Камера – це частина м'яча, що утримує повітря. У м'ячі Brazuca вона виготовлена з бутилкаучуку, але може бути і латексною. Обидва матеріали мають свої переваги: бутилкаучук довше утримує повітря, а латекс забезпечує кращий поверхневий натяг. Бутилкаучук також використовується в клапані, через який повітря надходить у м'яч, сприяючи його утриманню. Це синтетичний каучук, що є кополімером ізобутилену з меншою кількістю ізопрену.

Крім того, можуть використовуватися і силіконові клапани.



Яка ціна  
«швидкої моди»?



Чому твій улюблений еластичний  
спортивний одяг вважається  
екологічно НЕбезпечним?

Як синтетичне волокно, отримане з поліуретану, спандекс викликає значні екологічні проблеми. Ця еластична тканина сприяє викидам парникових газів під час виробництва. Вона значною мірою залежить від невідновлюваних нафтохімічних речовин.

Оскільки спандекс не біорозкладний, він залишається на звалищах протягом тривалого часу, що посилює забруднення навколишнього середовища. Переробка спандексу є складним завданням.

### Розглянемо конкретні цифри:

- За оцінками, світове виробництво волокна спандексу становить приблизно 3–5 % від загального виробництва текстильних волокон. Однак загальна кількість сумішей відходів спандексу сягає 25 мільйонів тонн, що становить близько 20 % від загального виробництва волокон, і зросте до 29 % до 2030 року.
- Виробництво спандексу генерує вуглецевий слід приблизно 17 кг CO<sub>2</sub>-екв. на 1 кг волокна.
- Спандекс отримують з викопного палива; він не підлягає біорозкладу, на звалищах він розкладається приблизно 200 років.
- Прання одягу, що містить спандекс, вивільняє синтетичні мікрочастинки у морське середовище, що створює екологічну небезпеку для морської біоти.
- Згідно з екологічним еталоном Made-By Environmental Benchmark for Fibres, спандекс класифікується як «клас E», що вказує на те, що він є одним із найменш екологічно чистих варіантів волокон.



### НАЙЛОН:

**ІСТОРІЯ, ЯКА ПОЄДНУЄ ДРАМАТИЗМ ВІЙНИ, ВИСОКУ МОДУ ТА СКЛАДНУ ХІМІЮ І ПОЯСНЮЄ, ЧОМУ ВАШІ КРОСІВКИ НЕ РОЗВАЛЮЮТЬСЯ**

На відміну від спандексу, найлон використовують для виготовлення спорядження для активного відпочинку та захисного спорядження, наприклад, купальні костюми, панчішно-шкарпеткові вироби та спортивний одяг.



### Трохи історії:

**шовкова криза та порятунок з нафти**

Найлон був створений у 1935 році хіміком Воллесом Карозерсом та його командою в DuPont. Полімер, спочатку відомий як «волокно 6,6», було одержано з похідних кам'яновугільної смоли, на яку діяли водою та спиртом під високими



тиском і температурою. Одержаний полімер ми зараз знаємо як найлон. У 1939 році компанія DuPont офіційно представила своє інноваційне синтетичне волокно. Це був перший матеріал, повністю виготовлений на нафтохімічній основі, який започаткував нову еру в виробництві синтетичних матеріалів.

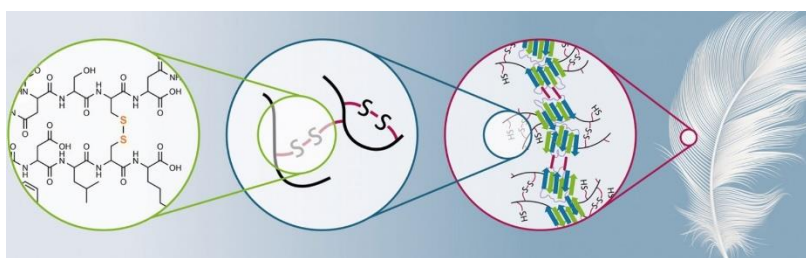
Успіх найлону припав на час Другої світової війни: його стали використовувати у військовому спорядженні.

Парашути почали виготовляти не з шовку (шовк вперше використав Ж. П. Бланшар у 1785 році для виготовлення першого парашута без жорсткого каркаса), а з найлону. Це стало вирішальним після того, як напад на Перл-Харбор 1941 року перервав постачання шовку з Японії. Найлон застосовували у виробництві бронежилетів, паливних баків літаків та автомобільних шин. Найлонові канати стали життєво важливими завдяки своїй високій міцності на розрив, еластичності та стійкості до стирання, цвілі та гниття.

Отже історія винаходу найлону – це історія про те, як хіміки рятували життя солдатів, створюючи міцніші за шовк парашути та бронежилети.



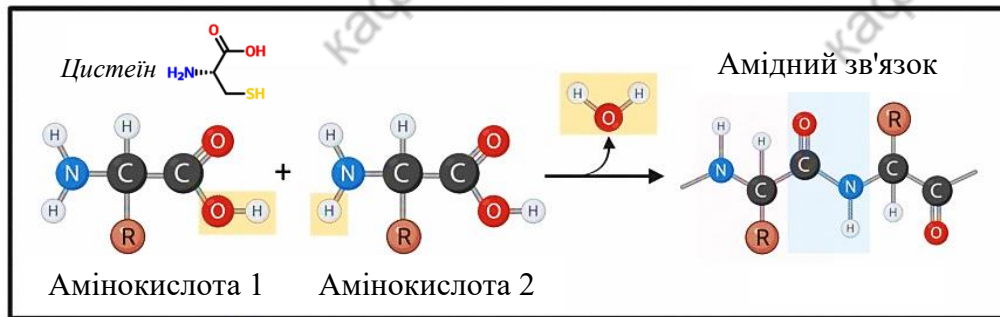
Після війни найлон став широко відомим завдяки жіночим панчішно-шкарпетковим виробам, що зумовило його високий споживчий попит та зробило його символом післявоєнного процвітання та сучасних інновацій.



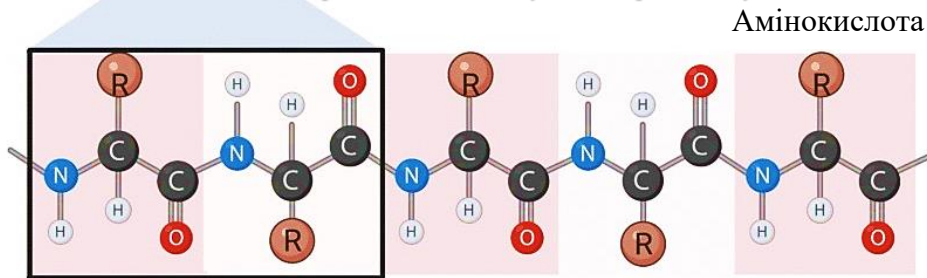
### Про хімічну «магію» найлону

Структура найлону-6,6 дуже схожа на структуру натурального шовку або  $\beta$ -кератину в пір'ї птахів, який має структуру, характерну для матеріалів з високою механічною міцністю і тому є основним компонентом пір'я, дзьобів та кігтів.

Молекула кератину побудована з амінокислот, переважно цистеїну, які з'єднуються між собою амідним зв'язком. Амідний зв'язок утворюється в результаті реакції поліконденсації між карбоксильною групою ( $-\text{COOH}$ ) однієї амінокислоти та аміногрупою ( $-\text{NH}_2$ ) іншої амінокислоти. Ця реакція супроводжується втратою молекули води. Таким чином, виникає поліпептидний ланцюг з багатьох амінокислот.



### Утворення молекули кератину



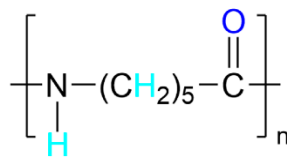
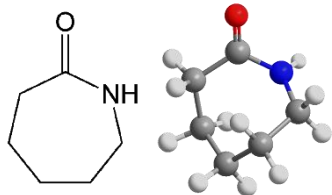
Саме з beta-кератином найлон має дивовижну структурну схожість, яку вчені називають справжнім шедевром молекулярної архітектури. Ось що їх об'єднує:

- 1. Амідні (пептидні) зв'язки.** Найлон за своєю природою є поліамідом. Це означає, що його молекулярні ланцюги з'єднані так само, як амінокислоти в білках – за допомогою амідних зв'язків. Ця хімічна «спорідненість» робить синтетичний найлон близьким родичем натурального шовку та кератину пір'я.
- 2. Магія водневих зв'язків.** Головний секрет міцності обох структур – сильна взаємодія між ланцюгами молекул: атоми Оксигену одного ланцюга притягуються до атомів Гідрогену іншого. Це створює впорядковані міжланцюгові водневі зв'язки, які працюють як молекулярний «клей» або «рукостискання».
- 3. Складчаста шарувата структура (β-структура).** Завдяки паралельному розташуванню ланцюгів вони формують особливу надмолекулярну структуру: ланцюги утворюють протяжні, нерозривні складчасті шари. Ця конструкція забезпечує надзвичайну жорсткість і міцність, що дозволяє птахам літати (завдяки пружності пір'я), а найлоновим канатам – витримувати величезні навантаження.

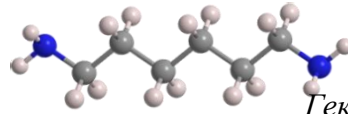
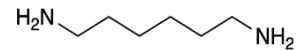
Отже унікальні властивості термопластичного полімеру найлону зумовлені його поліамідною структурою та «білковою» архітектурою. До

прикладу, це дозволяє найлоновому канату поглинати у 2,5 рази більше ударної енергії, ніж канатам, виробленим з інших матеріалів (наприклад, поліестеру).

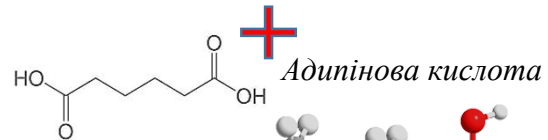
ε-Капролактам



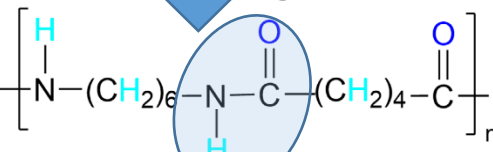
(a)



Гексаметилендіамін



Адипінова кислота



(b)

Хімічна структура (a) найлону 6 та (b) найлону 6,6

## Математика в назвах найлону

Існує безліч типів найлону.

1. **Найлон-XY** – гетерополімер; позначення походять від складу компонентів: діамінів та дикарбонових кислот, які мають довжину карбонового ланцюга  $X$  та  $Y$  відповідно. Прикладом такого полімеру є найлон-6,6, виготовлений з гексаметилендіаміну та адипінової кислоти у співвідношенні 1:1.

2. **Найлон-Z** – гомополімер; позначення походять від амінокарбонових кислот з певною довжиною карбонового ланцюга  $Z$ , наприклад, нейлон-6, виготовлений з ε-капролактаму.

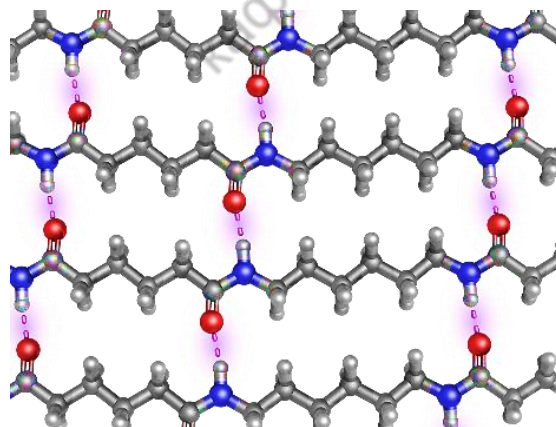


## МАТЕРІАЛИ З НАЙЛОНУ

Чому професійна спортивна форма настільки зручна?

Чому для буксирування авто або для страховки альпіністів не використовують поліестер?

Найлон-6,6 може мати кілька паралельних ниток, вирівняних з сусідніми пептидними зв'язками на координуваних відстанях: рівно шість і чотири атоми карбону протягом значної довжини. Тому атоми Оксигену карбонільних груп та атоми Гідрогену амідних груп можуть вишикуватися, утворюючи багаторазові впорядковані міжланцюгові водневі зв'язки.



Таким чином, паралельні (але не антипаралельні) ланцюги утворюють протяжні, нерозривні, багатоланцюгові складчасті шари з міцною та жорсткою *надмолекулярною структурою*. Під час витягування полімеру у волокна збільшується його кристалічність, і матеріал набуває додаткової зносостійкості та міцності щодо розтягування при високій амортизації.



### Найлон проти Поліестеру

Найлонове волокно може виготовлятися різної товщини, яка називається *деньє*<sup>10</sup>. Тому альпіністи використовують саме найлонові мотузки та канати: вони забезпечують захист від падіння –

це особливо актуально під час спуску на мотузках або рятуванні.

Завдяки високій міцності на подовження, найлоновий канат поглинає більш ніж у 2,5 разів більше ударної енергії, ніж поліестерний. Це велика перевага для каната, оскільки він зменшує вплив раптової динамічної зміни і, як наслідок, захищає вантаж. Саме тому для буксирування використовуються найлонові канати, які сильно розтягуються.

Багатожильний найлоновий шнур і мотузка слизькі та мають тенденцію розплітатися, але обірвані кінці легко розплавити і закріпити.

<sup>10</sup> *Деньє* (D) – позасистемна одиниця лінійної густини волокон або ниток, тобто відношення їхньої маси до довжини. Волокно довжиною 9000 метрів і вагою 1 грам має густину 1 деньє (D). Таким чином  $1 D = 1 \text{ г}/9000 \text{ м}$  (або  $0,00000011 \text{ кг/м}$ )



## Найлонова тканина:

Чи замислювалися ви, чому професійна спортивна форма настільки зручна?

Найлонова тканина – це сучасний незамінний матеріал у спортивному одязі.

- **Ефект адаптації.** Найлон сам по собі міцний, але в поєднанні зі спандексом він стає еластичним матеріалом з гладкою текстурою та неймовірно міцними волокнами, який ідеально облягає тіло.
- **Технологія Q-SKIN.** Це приклад сучасної італійської пряжі, яка дозволяє одягу адаптуватися до рухів людини, не втрачаючи своєї первісної форми навіть після багаторазового розтягування.
- **Практичність:** Таку тканину неймовірно легко прати, і вона «запам'ятовує» свою форму, незалежно від того, як і наскільки її розтягнуть.

## Ціна комфорту: екологічні аспекти

Оскільки найлон виготовляють з нафтохімічної сировини, його виробництво викликає значні екологічні проблеми.

- Процес виробництва цього синтетичного полімеру є дуже енергоємним. Під час його виробництва у водні системи потрапляють шкідливі хімічні речовини.
- Він виділяє парникові гази, які сприяють зміні клімату. Середній парниковий слід найлону оцінюється в 5,43-6,4 кг еквіваленту CO<sub>2</sub> на кг.
- Він згорає у вогні з утворенням небезпечного диму, токсичних парів або попелу, які зазвичай містять синільну кислоту (гідроген ціанід HCN). На звалищах він накопичується і повільно розкладається понад 30-40 років.



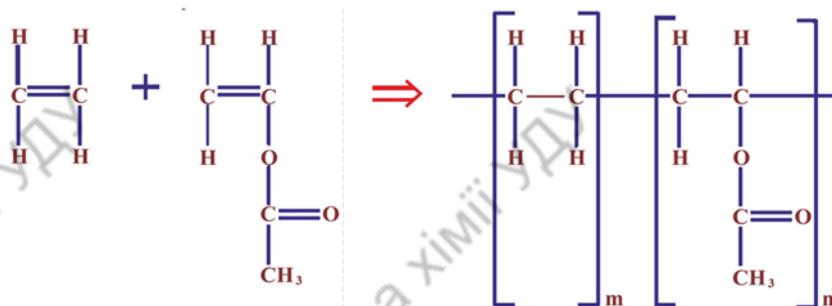
## ЕТИЛЕНВІНІЛАЦЕТАТ (EVA): полімер, який «взуб» увесь світ

Чому дешеве взуття швидко стає жорстким, а професійні бігові кросівки пружинять роками?  
Чи можна EVA-матеріал перетворити на «хімічну подушку»?

### Молекулярний саботаж:

#### Як зіпсувати порядок, щоб отримати м'якість?

Етиленвінілацетат це напівкристалічний термопластичний полімер, утворений різними мономерами – етенем (етиленом) та вінілацетатом (VA):



Просторово великі групи VA порушують регулярну кристалічну структуру поліетилену, роблячи матеріал м'яким, гнучким та схожим на гуму. Тому залежно від вмісту вінілацетату властивості EVA-полімеру змінюються від пластичних до гумоподібних.

*Відсоток вінілацетату в суміші визначає, наскільки м'яким і гнучким буде кінцевий матеріал: вищі відсотки створюють м'якшу, більш амортизуючу піну.*

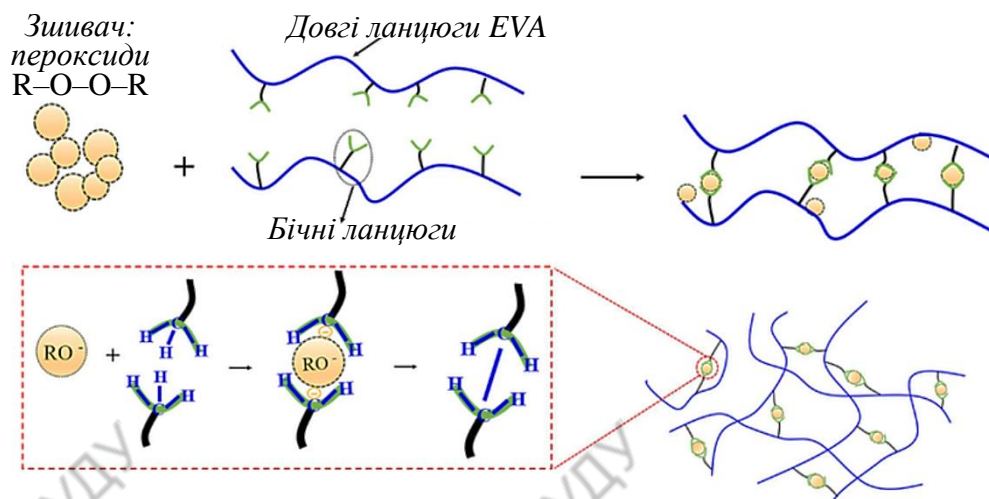
### Замість голки та нитки:

#### «хімічна прошивка» або навіщо кросівкам пероксиди?

Звичайний EVA (наприклад, у термокляях) м'який, але якщо його стиснути, він не відновить форму повністю, що не підходить для спорту. Виявляється, що для зміцнення матеріалів з EVA недостатньо цей полімер просто розплавити і дати затвердіти. Потрібна ще одна «операція» – зшивання довгих ланцюгів полімеру у сітчасту структуру. Для цього навчилися використовувати органічні пероксидні сполуки загальної формули R-O-O-R (згадай гідроген пероксид H-O-O-H!), які під дією температури або вологи

розпадаються і утворюють активні радикали<sup>11</sup>, які буквально «прошивають» довгі ланцюги молекул міцними ковалентними зв'язками (C–C).

З рештою замість окремих ниток ми отримуємо просторову тривимірну сітку. Якщо в ході процесу зшивання утворюються газоподібні сполуки, то матеріал стає піною із закритими порами. За вищих відсотків вінілацетату у полімері створюється м'якіша, більш амортизувальна піна.



### «Вибух» CO<sub>2</sub> всередині підошви

Використання нової технології надкритичного спінювання для виробництва піни EVA революціонізувала спосіб використання цього матеріалу в багатьох галузях промисловості. Вона основана на комбінації високого тиску та температури. Процес включає введення вуглекислого газу CO<sub>2</sub> у рідкий розчин суміші смоли EVA та інших добавок (модифікатор Si-TPV). Потім газ нагрівається та стискається, доки не досягне надкритичного стану. Далі тиск різко знімається, що призводить до швидкого розширення газу та утворення крихітних бульбашок. Ці бульбашки захоплюються рідким розчином, створюючи піну, яка твердне при охолодженні. Такий пінний матеріал має кращі властивості порівняно з традиційними: він легший, міцніший та довговічніший.

### Чим же такі особливі матеріали з EVA-полімеру?

EVA фактично є ні чистим каучуком, ні чистим пластиком. Це полімер, який поєднує в собі характеристики обох цих типів матеріалів: він має гнучкість та амортизацію гуми, але легкий; він має міцність пластику, але не жорсткий.

<sup>11</sup> *Активні радикали* – це електронейтральні вкрай нестабільні атоми або молекули з неспареним електроном на зовнішній орбіталі. Вони прагнуть стабілізуватися відбираючи електрони від інших частинок.

### То які плюси ми маємо?

- На відміну від традиційної гуми, EVA значно легший і не стискається остаточно з часом.
- Температура плавлення EVA низька, зазвичай від 80°C до 110°C залежно від вмісту вінілацетату, але полімер є термостабільним і стійким до теплового старіння.



– На відміну від жорстких пластмас, він має чудову амортизацію та гнучкість з подовженням при розриві від 500 % до 900 %, що дозволяє поглинати енергію удару. Тому його використовують як устілки та амортизувальні компоненти.



### EVA у дії:

### композити та матеріали у спорті

Чому спінений EVA можна назвати «хімічною подушкою»?

Комфортний шар устілки EVA



Зшитий пористий етиленвінілацетат (EVA) – це хімічна "подушка" для ніг спортсмена. Він є найпоширенішим матеріалом для проміжної підошви (*midsole*) кросівок та м'яких внутрішніх вставок у захисному спорядженні. При ударі ногою об землю пори стискаються, але завдяки хімічним "зшивкам" між ланцюгами, матеріал працює як пружина і миттєво повертається до початкової форми після зняття навантаження. Це називається стійкістю до залишкової деформації стиснення.



**EVA – це «гібрид», який поєднує гнучкість гуми та міцність пластику.**

Саме тому він ідеальний для захисту зубів боксерів або голови хокеїстів. З EVA-пластику виготовляються, наприклад, спортивні капи у

контактних видах спорту, таких як бокс, футбол, хокей або баскетбол. Завдяки своїй ударостійкості він також використовується у спортивному спорядженні, такому як шоломи та щитки.



## ПОЛІЕСТЕР: НЕ ПРОСТО ЕТИКЕТКА НА ФУТБОЛЦІ!

Чому сучасна футбольна форма важить майже однаково як на початку матчу, так і в кінці, навіть якщо гравець пробіг 10 км?

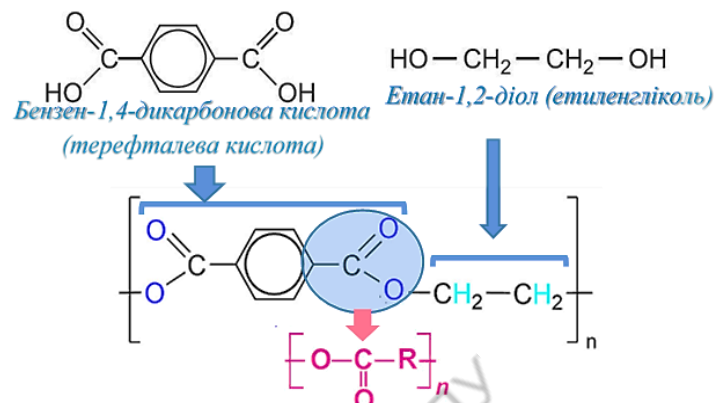
У минулому, до того, як полімери стали широко використовуватися у виробництві одягу, футбольні майки виготовлялися з бавовни або навіть вовни. Уяви собі: ти пітнієш, майка вбирає воду і стає важкою, як мокрий рушник. Це було жахливо незручно.

Складно відстежити, коли саме поліестерові футболки стали широко використовуватися, але до 1990-х років вони стали нормою для більшості клубів. Найбільш часто використовують поліестер *поліетилентерефталат*, скорочено ПЕТ.

### Хімічна «кухня»: як «готують» ПЕТ

Цей новий полімер був винайдений двома британськими хіміками, Джоном Рексом Вінфілдом та Джеймсом Теннантом Діксоном, що швидко зробило технологію поліестерів революцією в текстильній промисловості.

*Поліетилентерефталат* – це кополімер етиленгліколю та терефталевої кислоти, утворений в процесі поліконденсації, в якому побічним продуктом є вода. При утворенні молекули полімеру між терефталевою кислотою та етиленгліколем утворюється *естерний зв'язок*, тому полімер зазвичай називають поліестером:

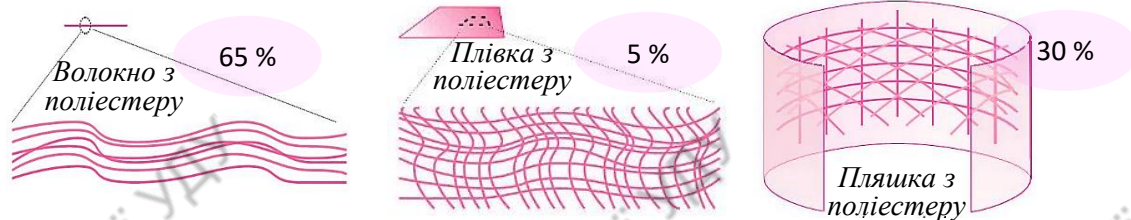


## Чому він такий міцний?

Ароматичні кільця в молекулярному ланцюзі діють як каркаси, що надають структурі полімеру жорсткості. Тому поліестер має унікальні властивості:

- високі температури плавлення – понад 500 К!;
- велику міцність;
- не вигоряє на сонці.

Щорічне світове виробництво ПЕТ становить приблизно 40 мільйонів тонн і збільшується приблизно на 7% за рік. З нього виробляють волокна для тканин, плівки та упаковку: у *волокнах* молекули розташовані переважно в одному напрямку, у *плівці* – у двох напрямках, а в *упаковці* – у трьох:



## ПОЛІЕСТЕР У ДІЇ: «ЗОЛОТИЙ СТАНДАРТ» СПОРТУ

### Поліестер та мікрофібра: секрет комфорту

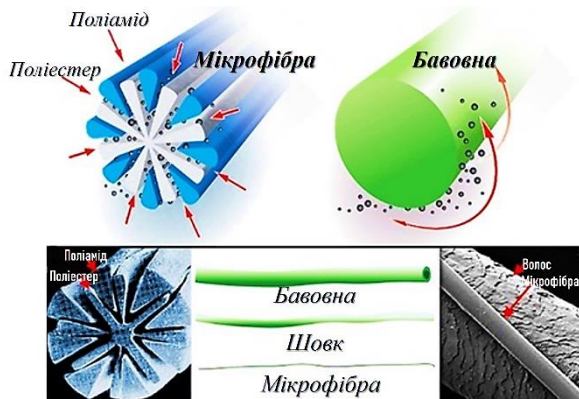
Поліестер виробляється у вигляді дрібних гранул. Їх плавлять і пропускають через дрібні отвори, а отримані нитки прядуть, утворюючи волокно. Це *волокно* широко

відоме як *терилен*, або *дакрон*.

В одязі поліестери мають велику перевагу перед більш традиційними бавовняними волокнами, оскільки вони вбирають набагато менше води. Якщо бавовна може ввібрати до 7% води від своєї ваги, то поліестер вбирає тільки близько 0,4% своєї ваги. Завдяки цьому він набагато менше просочується потом під час гри в футбол. Замість цього піт може стікати волокнами сорочки і випаровуватися; через це її називають «вологовідвідною» тканиною або, більш широко, «дихаючою». Але матеріал поліестер міцний і не мнеться.

Складною конструкцією з поліестеру та найлону є мікрофібра. Це ніжна, легка та дуже стійка до вологи тканина. Тому вона часто використовуються для

спортивного одягу, наприклад такого як велоджерсі, оскільки мікрофібровий матеріал теж відводить вологу від тіла, а подальше випаровування охолоджує спортсмена.



## Технологія мікрофібри: тонкість на межі можливого

МікрОВОлокна мікрофібри виготовляють скручуванням довгих і неймовірно тонких кон'югованих безперервних ниток поліестеру та найлону (на рисунку білий колір – поліестер, а синій – найлон). Замість однотонного мікрОВОлокна виникає

унікальна конструкція з розщепленим багатожильним волокном.

Щоб класифікуватися як мікрофібра, волокно повинно мати ширину менше 1,3 ден'є. Для порівняння, мікрофібра має діаметр:

- вдвічі менший за тонке шовкове волокно,
- в третину менший за бавовну,
- в чверть менше за тонку вовну та в сто разів тонше за людське волосся.

Волокна мікрофібри вражають крихітні. Уявіть собі: якби взяти рушник з мікрофібри розміром  $16 \times 16 \text{ см}^2$  і покласти волокна в ряд від одного кінця до іншого, він би досяг відстані приблизно 7644,5 км!



## Канати і мотузки з поліестеру чи найлону – що ти вибираєш?

Мотузки і канати з поліестеру часто називають універсальними. Вони мають:

- *високу міцність*: вони зберігають 98 % своєї міцності навіть у мокрому стані;
- *низьку розтяжність*: волокна майже не подовжуються під навантаженням, що критично для важких грузів;
- *дуже низьке водопоглинання*: менше 1%.

Висока стійкість до навантаження означає не змінність довжини під дією натягнення і стійкість до провисання. Такі канати найнадійніші для морських підйомних операцій, їх використовують на флагштоках та наметах.

Завдяки своїй стабільності у вологих умовах та в умовах високого тертя, поліестер найкраще підходить як статичне такелажне обладнання для парусного

спорту. Крім того, морський поліестеровий канат також має найвищу стійкість до ультрафіолетового випромінювання.

### Екологія: Друге життя пластику

Поліетилентерефталат на 100 % придатний для переробки. Це найбільш перероблюваний пластик у світі:

- Його легко ідентифікувати за знаком переробки з кодом №1.
- Яка від цього користь? Переробка однієї тонни ПЕТ може заощадити приблизно три тонни нафти та значно зменшити викиди CO<sub>2</sub>.

У природному середовищі ПЕТ демонструє *надзвичайно повільні темпи розкладання*, що призводить до *біоаккумуляції протягом десятиліть*, якщо він виходить за межі систем управління відходами або потрапляє у сміттєзвалище.

Хоча ПЕТ позначено як небіорозкладний, хімічні та фізичні зміни в структурі полімеру відбуваються за природних умов вивітрювання. У природному середовищі вплив погодних умов на ПЕТ-продукція *розщеплюється на фрагменти* як механічним, так і хімічним шляхом, що призводить до утворення *мікропластику ПЕТ (≤5 мм)*, який ще важче відстежувати та збирати.



### ПОЛІКАРБОНАТИ ТА ABS: ХІМІЧНИЙ ЩИТ ДЛЯ СПОРТСМЕНІВ

**ПОЛІКАРБОНАТ (PC) = прозорий «метал»**  
Що в ньому особливого і чи кращий він за скло?

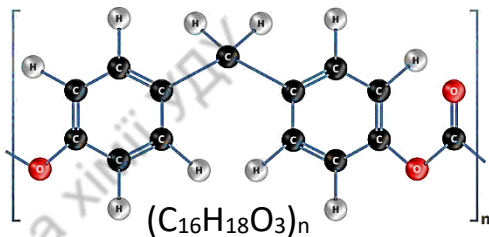
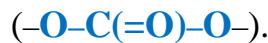
- *Легкість*. Ця особливість надає практично необмежені можливості для будівництва та конструювання порівняно зі склом.
- *Захист від ультрафіолетового випромінювання*. Полікарбонати блокують ультрафіолетове випромінювання і забезпечують захист від шкідливих ультрафіолетових променів на 100 %.
- *Хімічна стійкість*. Полікарбонати стійкі до розведених кислот, аліфатичних вуглеводнів та спиртів; помірно стійкі до масел та жирів; але легко піддаються впливу розведених лугів, ароматичних та галогеновмісних вуглеводнів.

– **Термостійкість:** полікарбонати термостабільні лише до 135°C.

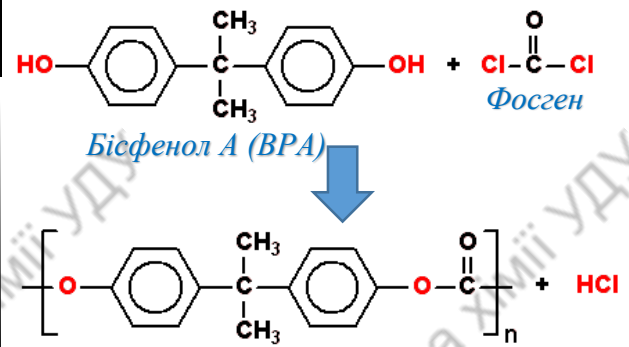
Полікарбонат – це *інженерний термопласт*, який поєднує прозорість скла з *неймовірною ударною в'язкістю*, тому він є основним матеріалом для захисту очей та обличчя. Це надзвичайно прозорий пластик, який може пропускати понад 90 % світла, так само добре, як і скло, але затримувати 100 % ультрафіолетових променів на відміну від скла.

### Хімічна «кухня»: секрети міцності

Ключовою особливістю молекули є наявність жорстких ароматичних кілець (зокрема бензену) в основному ланцюзі полімеру, поєднаних карбонатними групами:



Полікарбонат одержують реакцією поліконденсації між бісфенолом А (БРА) та фосгеном (або дифенілкарбонатом):



Саме така структура дозволяє матеріалу бути одночасно прозорим і надзвичайно стійким до фізичних пошкоджень.

### ПОЛІКАРБОНАТ в дії: наскільки це важливо для спорту?

Уяви собі хокейний матч: шайба летить у голову гравця зі швидкістю **160 км/год**. Якби візор (захисне скло) на шоломі був зі звичайного пластику чи скла, він би розлетівся на гострі уламки. Але полікарбонат витримує такий удар, навіть не тріснувши. Саме тому його називають **«прозорим металом»**.

Полікарбонат настільки міцний і прозорий, що його використовують для виготовлення ілюмінаторів космічних кораблів та лінз для професійних спортсменів – гірськолижників: для них в спеціальну спортивну оправу ставлять дві лінзи, які забезпечують і захист, і тепло.



## Екологія та безпека

- Усі види полікарбонату на 100 % придатні для переробки та позначені кодом переробки «7». Одним із методів переробки є хімічна переробка.
- Якщо полікарбонат потрапляє в навколишнє середовище, коли його викидають у смітник та на сміттєзвалище, з'являється потенційний *ризик виділення бісфенолу А (BPA) – канцерогену, який дуже шкідливий* для здоров'я людини.



## ABS-ПЛАСТИК: ТРІО, ЩО ТРИМАЄ УДАР!

Чому LEGO не ламається, коли ви на нього наступаєте (хоча ногам дуже боляче)?

Якщо полікарбонат – це захист очей, то ABS – це захист голови та кінцівок. Це не просто пластмаса. Це складний терполімер<sup>12</sup>, де кожен компонент відповідає за свою «суперсилу».

## Що в ньому особливого?

Він є кращим вибором для конструкційних матеріалів завдяки своїм фізичним властивостям:

- висока жорсткість, добра зварюваність та ізоляційні властивості,
- ударостійкість, навіть за низьких температур,
- механічна міцність та стабільність у часі,
- стійкість до стирання та деформації.

Але все ж таки *обмеження у застосуванні ABS* є:

- Поширені марки пластику легко горять і продовжують горіти після зняття полум'я.
- Погана стійкість до розчинників, особливо ароматичних, кетонів та етерів.

## Хімічний «коктейль» ABS: синергія трьох мономерів

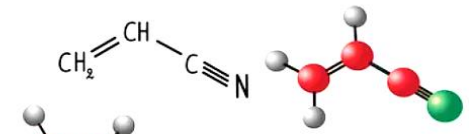
ABS (акрилонітрилбутадієнстирен) – це не просто суміш, а терполімер, в якому три різні мономерні об'єднані хімічно і формують систему, що складається з двох фаз.

<sup>12</sup> Терполімер – полімер, утворений трьома різними компонентами – мономерами. Він поєднує властивості трьох різних компонентів для створення матеріалу з унікальними характеристиками

### 1. Акрилонітрил (А):

надає хімічну стійкість і поверхневу твердість - «*Стійкий боєць*».

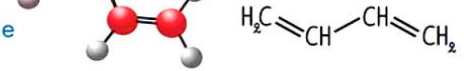
**A** Acrylonitrile  
 $C_3H_3N$



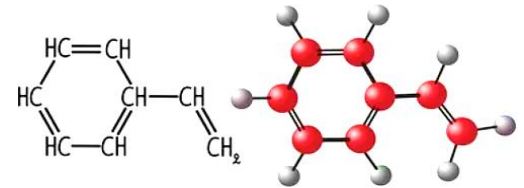
### 2. Бутадієн (В):

це потенційний каучук (гума), який надає еластичність та ударну в'язкість за низьких температур - «*Гнучкий акробат*».

**B** Buta-1,3 -diene  
 $C_4H_6$



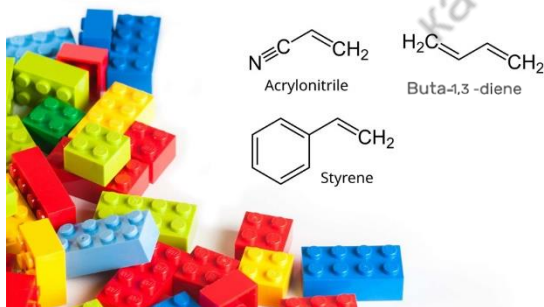
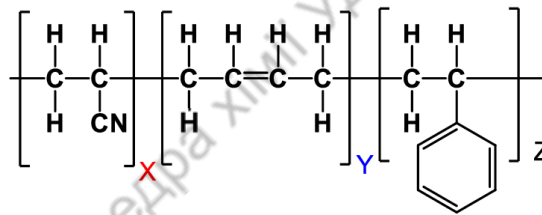
**S** Styrene  
 $C_8H_8$



### 3. Стирен (S):

забезпечує жорсткість та легкість формування (лиття) виробу - «*Майстер форми*».

Оскільки співвідношення компонентів може змінюватись, то узагальнену структуру ABS - пластику можна представити у вигляді такої схеми:



### Хімічні секрети створення матеріалу: два шляхи

АБС зазвичай містить близько 20% мас. каучуку, 25% акрилонітрилу та 55% стирену. Однак існує багато марок ABS - пластику, які відрізняються за

співвідношенням мономерів (акрилонітрилу, бутадієну та стирену), за способом полімеризації цих компонентів та за способом формування пластичної маси. Відповідно і властивості різних марок ABS - пластику змінюються.

### Властивості різних марок ABS – пластику:

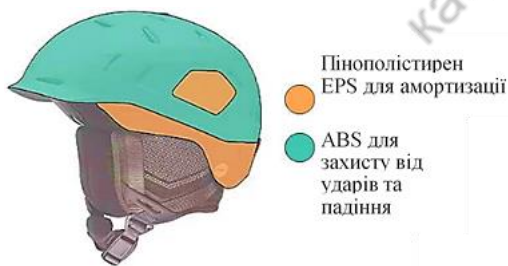
- для високої хімічної стійкості, термостійкості та довготривалої термостабільності рецептура повинна бути багата на акрилонітрил;
- для хорошого блиску, чудової формованості, а також високої міцності і жорсткості у рецептурах має бути високий вміст стирену;

- низькотемпературній ударостійкості та загальному збереженню властивостей сприяє збільшення вмісту бутадієну.

Нині розроблено два способи одержання ABS - пластику:

I	II
<p><i>Полімеризація в емульсії</i></p> <p>1. Окремо готують кополімери:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– стирен/ акрилонітрил (SAN)</li> <li>– акрилонітрильний/бутадієновий каучук (NBR).</li> </ul> <p>2. Далі ці полімерні маси змішують: зазвичай гумова фаза розбивається на дрібні частинки, які вводять та рівномірно диспергують в безперервній фазі – матриці SAN.</p> <div data-bbox="252 936 917 1126"> <p>The image shows a microscopic view of ABS particles on the left and a schematic diagram on the right. The schematic shows a matrix of SAN (Styrene-Acrylonitrile) with dispersed particles of NBR (Nitrile Butadiene Rubber). Labels 'SAN' and 'NBR' point to the respective components.</p> </div>	<p><i>Безперервна масова полімеризація.</i></p> <p>Полібутадієновий каучук розчиняють, а потім змішують з акрилонітрилом та стиреном. Акрилонітрил (AN) або кополімер стирену/акрилонітрилу (SAN) прищеплюється (хімічно зв'язується) на бутадієнову (BR) або бутадієнстиренову (SBR) основу.</p> <div data-bbox="997 974 1412 1220"> <p>The diagram illustrates the continuous mass polymerization process. It shows a wavy line representing a butadiene-based backbone (BR or SBR) with side chains of SAN or AN (Styrene-Acrylonitrile) attached to it.</p> </div>

### ABS в дії: ударний захист спортсмени



Коли удар влучає в шолом, жорстка матриця SAN приймає навантаження. Якби це був чистий пластик, пішла б тріщина. Але в ABS тріщина одразу наштовхується на м'яку гумову кульку бутадієну, яка гасить енергію тріщини та зупиняє її поширення.

### Екологія та безпека

ABS-пластик – це біосумісний і на 100% придатний для переробки матеріал. Вироби, виготовлені з ABS, мають номер №9 переробки.

Перероблений ABS можна змішувати з первинним матеріалом для виробництва продукції з нижчою вартістю, зберігаючи при цьому високу якість.

ABS вважається нетоксичним та нешкідливим, він не містить жодних відомих канцерогенів, стабільний та не вилугується.

На сьогодні не відомі негативні наслідки для здоров'я, пов'язані з його впливом.





## "РОЗУМНІ" МАТЕРІАЛИ: ЧИ МОЖЕ ОДЯГ СТАТИ РОЗУМНІШИМ ЗА КАЛЬКУЛЯТОР?



Розумний текстиль – це інтелектуальні системи, які можуть спостерігати або повідомляти про навколишні обставини та виявляти/обробляти стан спортсмена. Наприклад, одяг, який може регулювати температуру та контролювати вібрацію м'язів або вивільняти ліки та зволожувачі в шкіру. Вперше вони з'явилися на ринку наприкінці 1980-х років у Японії, де була створена шовкова система, яка мала ефект пам'яті.

### Парадокс мембрани:

### Як бути "дір'явим" і водонепроникним водночас?

Головна проблема спортсмена – це піт. І якщо під час інтенсивного тренування волога не виходитиме назовні, тіло перетворюється на паровий котел і перегрівається.

Отже, крім захисту від зовнішніх факторів, таких як спека, вітер чи вода, тканина має підтримувати тепло людського тіла та забезпечувати ефективну передачу пари від шкіри до зовнішньої атмосфери. Для цього тканина повинна мати дві основні характеристики:

- бути повітропроникною, щоб забезпечити дифузію водяної пари;
- бути водонепроникною, щоб запобігти проникненню води із зовнішнього середовища до шкіри.

*Але ж як тканина розуміє, що піт треба випустити, а дощ – ні?*

Зазвичай тканини виготовляють так, щоб запобігати проходженню зовнішньої рідкої води, тому що пори в 20 000 разів менші за краплю рідкої води, але пропускати водяну пару, бо пори в 700 разів більші за молекулу води. Паропроникність залежить від розміру та товщини пор: зменшення розміру та товщини пор збільшує паропроникність.

Ще однією важливою характеристикою є *швидкість передачі водяної пари* від тіла, що напругу залежить від архітектури мембрани:

**Розмір та товщина:** паропроникність тканини зростає, якщо зменшити розмір пор та товщину самого мембранного шару.

**Механіка:** чим коротший шлях має пройти молекула пари крізь лабіринт волокон, тим швидше ми відчуваємо омріяну прохолоду.

В гоночних костюмах рівень потовиділення настільки високий, що тканина повинна працювати на межі своїх фізичних можливостей.

Головним "регулятором" роботи такого одягу є *атмосферні умови*, які діють як антагоністи. Вітер зазвичай працює як "прискорювач", збільшуючи швидкість переносу водяної пари від тіла назовні. Сильний та тривалий дощ – головний ворог мембрани. Вода забиває пори, через що повітропроникність різко знижується або припиняється зовсім. У вологому та теплому середовищі мембрані працювати значно важче, оскільки різниця тисків пари всередині та зовні стає мінімальною.

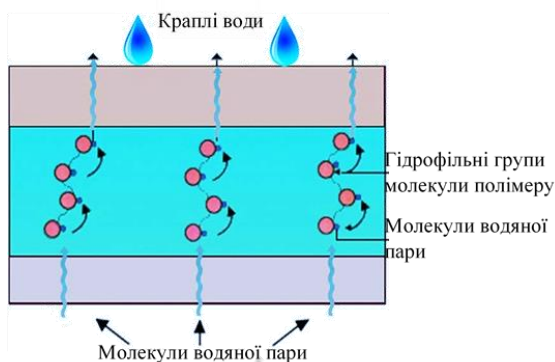
Важливим чинником транспорту водяної пари мембранною тканиною є її *хімічна чистота та "енергія поверхні"*

**Низька поверхнева енергія:** мембрани з ПТФЕ мають дуже низьку поверхневу енергію, що заважає бруду та пилу прилипати до них.

**Блокування пор:** якщо мікропори забиваються частинками пилу або жиру від шкіри, то "дихання" тканини зупиняється.

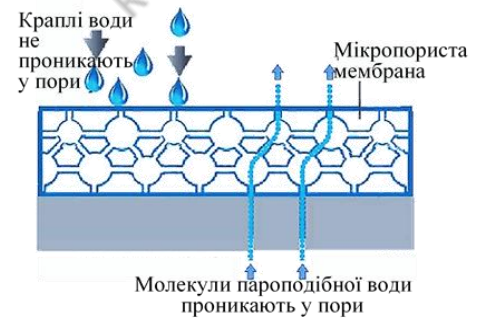
**Самоочищення:** завдяки гідрофобності ПТФЕ, вода збирається в краплі, які під час звичайного дощу змивають бруд, допомагаючи мембрані залишатися відкритою для пари.

### Секрети роботи мембранної тканини



У матеріалах, що мають *тверду плівку або покриття на основі полімерів з високою стійкістю до проникнення води* (спортивні куртки, черевики для туризму, сноуборди) передача вологої пари досягається шляхом молекулярної дифузії, де волога поглинається гідрофільною мембраною або покриттям, дифундує через плівку та вивільняється з іншого боку.

*Мікропористі тканини* найчастіше виготовляються зі спіненого політетрафлуороетилену (PTFE), відомого як тефлон, або рідше з поліуретанів (PU). Мікропористі плівки зазвичай містять приблизно 1,2-1,4 мільярда крихітних отворів на квадратний сантиметр. Ці пори мають розмір від 0,1 до 10 мкм, що значно менше за найдрібніші краплі дощу, але більші за молекули водяної пари.



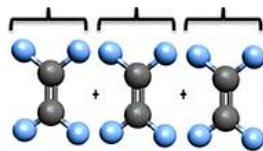
### Дещо про хімію «супергерою» ПТФЕ

*Політетрафторетилен* (ПТФЕ) – це новий полімер, який змінив галузі промисловості в усьому світі. ПТФЕ здобув популярність завдяки своїй особливій хімічній структурі та винятковим характеристикам. Це гарна ілюстрація того, чого може досягти «Хімічне матеріалознавство» у великих пошуках позитивних рішень.

#### Від моно- до полімолекули

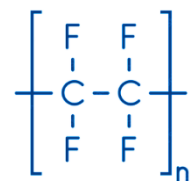
Молекула ПТФЕ побудована атомами карбону (С), міцно зв'язаними між собою у довгий полімерний ланцюг, причому кожний з атомів Карбону ланцюга утримує ще по два атоми флуору (F) за участі сильних ковалентних хімічних зв'язків:

Мономер - тетрафлуороетилен



Полімеризація

Будова молекули політетрафлуороетилену (PTFE)



● – Атом Карбону

● – Атом Флуору

Хімічна формула елементарної повторюваної ланки полімеру виглядає так:



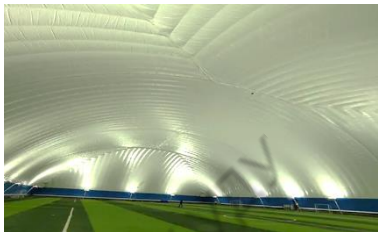
#### Чому це працює?

1. Ковалентний зв'язок С–F між атомами Карбону та Флуору є одним із найміцніших у природі. Саме тому матеріал не боїться ні кислот, ні вогню, ні морозу.

2. Присутність тільки атомів Флуору у ланцюзі молекули створює максимальну гідрофобність полімеру (тобто "недружність" до води): вода просто згортається в кульки і стікає з поверхні.

Відповідно полімерний матеріал набуває таких властивостей:

- стійкості до вологи навколишнього середовища та корозії,
- стійкості до екстремальних температур: він має високу температуру плавлення,
- хімічної інертності,
- надзвичайної міцності: витримує шалений вітер та тиск снігу,
- низького тертя: ПТФЕ – одна з найслизькіших речовин у світі. На ній майже нічого не тримається, навіть бруд.



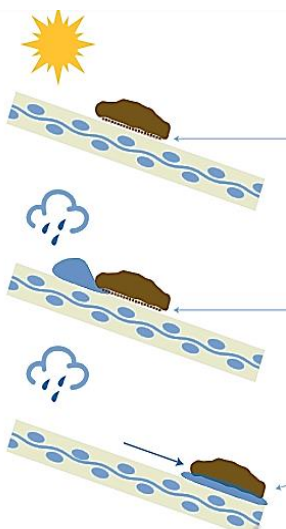
### Від куртки до стадіону

PTFE-мембрана на розтяг стала ідеальним вибором для покриття футбольних полів завдяки своїй чудовій

стійкості до атмосферних впливів, світлопроникності, самоочищенню та чудовим механічними властивостями.

Цей матеріал може ефективно блокувати ультрафіолетове випромінювання, зберігаючи при цьому достатню кількість природного освітлення всередині футбольного поля, забезпечуючи гравцям та глядачам яскраве та комфортне середовище.

Крім того, висока міцність та в'язкість PTFE-мембрани забезпечують стабільність та безпеку покриття за несприятливих погодних умов, таких як вітер та дощ, і подовжують термін служби футбольного поля.



Водночас, її звукоізоляційний ефект може ефективно ізолювати зовнішній шум, дозволяючи гравцям більше зосередитися на самій грі, тим самим стимулюючи кращий конкурентний стан.

Низька поверхнева енергія мембранного покриття мінімізує здатність пилу, бруду та забруднюючих речовин прилипати до поверхні та легко змиватися під час звичайних опадів.

Оскільки ПТФЕ є гідрофобним матеріалом, вода буде збиратися краплями та стікати вздовж природних контурів, сприяючи самоочисним властивостям.

Наступного разу, коли побачиш білосніжний дах сучасного стадіону, згадай, що це величезна "розумна парасолька", яка працює на тих самих хімічних принципах, що й професійна бігова куртка.

### **Деякі висновки**

Хімія зробила спорт швидшим, безпечнішим та доступнішим. Найвідчутніші зміни відбулись у заміні традиційних натуральних матеріалів, таких як метал, дерево, шкіра та бавовна, на сучасні нові полімерні та композитні матеріали. Останні досягнення пов'язані з розробкою «розумних» та функціоналізованих матеріалів з наперед заданими властивостями.

Ми показали ці зміни на прикладі найбільш вагомих полімерів та композитів на їх основі, без яких не існує сучасного спорту.

Для більш широкого розуміння – дивіться на марки та позначення тих матеріалів, які використовуєте Ви, адже різні виробники застосовують різні полімерні композиції для виготовлення одних і тих самих матеріалів для спорту. Тепер Ви знаєте, на що доцільно звертати увагу, тому запитуйте, шукайте інформацію та аналізуйте переваги цих матеріалів.

*Хімія допоможе Вам розібратися в цьому безкінечному морі матеріалів,  
бо саме ця наука зробила можливим їх створення!!!*

***До наступної зустрічі!***