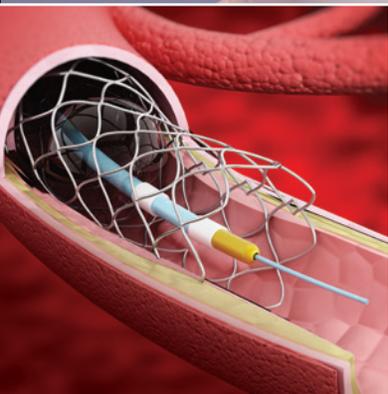


Від дослідницької лабораторії до практичних задач: Як механічні випробування дозволяють визначати міцність та надійність

Посібник з вибору механічних випробувань



Waters™



Зміст

Вступ: Чому механічні випробування важливі	3
Огляд методів механічних випробувань	4
Який метод підходить для Вашого застосування?	7
Вибір приладу	10
Довідковий листок по приладах	11



Чому механічні випробування важливі

Від дослідницької лабораторії до практичних задач: Як механічні випробування дозволяють оцінювати міцність та надійність

Механічні випробування охоплюють численні методи аналізу, які вимірюють реакцію матеріалів на різні напруження та деформації. Механічні випробування дозволяють визначати характеристики матеріалів в пошуках відповідей на різноманітні запитання. Зокрема:

- Яка структура матеріалу? Наприклад, чи достатню змішуваність має суміш?
- Чи може матеріал виконувати певне завдання? Наприклад, чи достатньо він жорсткий, щоб утримувати навантагу, чи він зігнеться, що призведе до падіння цієї навантаги?
- Чи руйнується матеріал під дією прикладеного навантаження? Наприклад, чи витримає колона мосту вагу кількох вантажівок, які проїжджають по ньому?

Випробування зразків в умовах, що є релевантними до конкретного застосування, допомагає науковцям, інженерам і технікам контролювати експлуатаційні характеристики й довговічність своїх матеріалів та виробів.

Приклади використання механічних випробувань

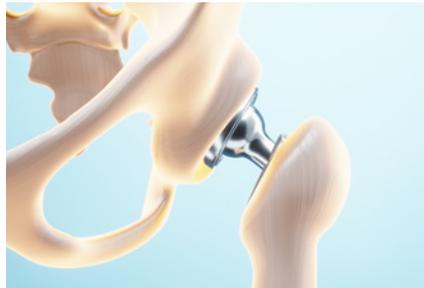
Радіатор великотоннажної вантажівки:

Наскільки добре він буде витримувати багатогодинну вібрацію за високих температур під час руху? Чи призведуть процеси релаксації напружень або повзучості в матеріалах до порушення герметичності ущільнень, використаних в конструкції?



Зносостійкість медичного виробу:

Наскільки добре новий протез буде витримувати внутрішні умови організму, в тому числі рух або контакт з кров'ю?



Ефекти виробничих артефактів:

Наскільки сильно недосконалість, як-от лінії стикування, порожнечі та внутрішні напруження, вплинуть на механічну міцність й зносостійкість?



У всіх цих прикладах механічні випробування відповідають на ключові запитання, розкриваючи властивості матеріалів в умовах, наближених до конкретного застосування. Отже механічні випробування надають інформацію про успішність вибору матеріалів, конструкції виробу та прогнозовані експлуатаційні характеристики. Дізнайтеся більше про те, які види механічних випробувань підходять для Ваших матеріалів і застосувань.



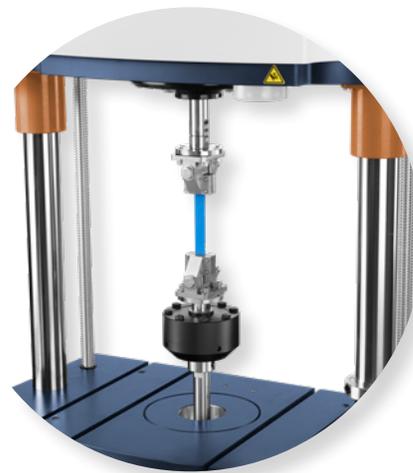
Огляд методів механічних випробувань

До числа основних методів належать:

Монотонні випробування (або випробування до руйнування): вимірювання відгуку матеріалу на прикладене навантаження. Наприклад, наскільки сильно необхідно розтягувати гумову стрічку, щоб вона порвалася? Або наскільки сильно можна зігнути лист металу, перш ніж він зламається? В таких випробуваннях вимірюють міцність матеріалу, а також ступінь його деформації, при якій відбувається руйнування, також відому як подовження при розриві.

Загальні стандарти, що описують монотонні випробування:

- ASTM D638 – Стандартний метод випробувань механічних властивостей при розтягуванні пластмас
- ISO 527 – Пластмаси – Визначення властивостей під час розтягування
- ISO 6892 – Металеві матеріали – Випробування на розтяг
- ISO 178 – Пластмаси – Визначення властивостей у разі згинання
- ASTM D3039 – Стандартний метод випробувань механічних властивостей при розтягуванні композиційних матеріалів з полімерною матрицею
- ASTM D790 – Стандартні методи випробувань механічних властивостей при згинанні неармованих й армованих пластмас та електроізоляційних матеріалів



Приклад монотонного випробування

Випробування на розтяг були проведені для того, щоб оцінити відмінності між матеріалами, виготовленими з трьох різних сумішей ABS⁽¹⁾ і базової смоли SAN⁽²⁾. Для кожного матеріалу проводились три випробування при розтягуванні зі швидкістю 5 мм/хв (0,083 мм/с) на приладах TA Instruments [ElectroForce 3330](#) та [ElectroForce APEX 1](#) у відповідності до ASTM D638-22.

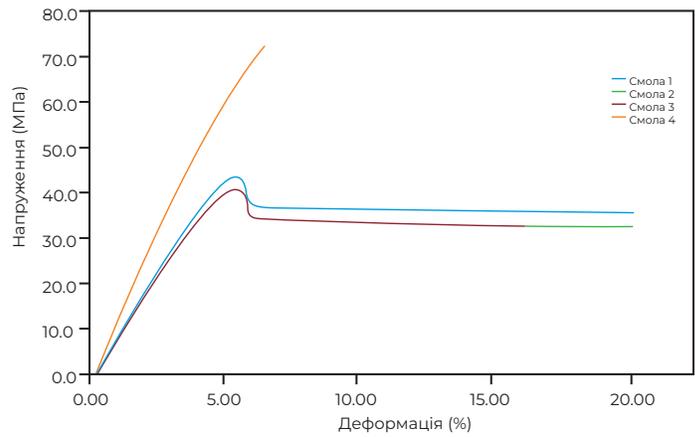
Сорт зразка	Термопласт	Середня UTS ⁽³⁾ (МПа)	Середнє подовження при розриві (%)	Середнє напруженн при розриві (МПа)	Середній модуль пружності (МПа)
Смола 1	ABS	42.2 ± 0.1	21.1 ± 2.0	34.2 ± 1.0	872 ± 0.1
Смола 2	ABS	38.9 ± 0.1	20.2 ± 2.0	30.4 ± 0.7	770 ± 63.9
Смола 3	ABS	42.9 ± 0.0	16.29 ± 0.6	29.7 ± 1.5	921 ± 3.6
Смола 4	ABS	6.7 ± 0.4	6.7 ± 0.4	71.9 ± 0.1	1162 ± 21.1

⁽¹⁾ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – акрилонітрилбутадієнстирол, термопластична смола на основі кополімеру акрилонітрилу з бутадієном і стиолом.

⁽²⁾ SAN (Styrene AcryloNitrile) – стирил-акрилонітрил, термопластична смола на основі кополімеру стирулу з акрилонітрилом.

⁽³⁾ UTS (Ultimate Tensile Strength) – границя міцності на розрив.

Як видно з результатів випробування на розтяг, Смола 4 має найвищу границю міцності на розрив (UTS, Ultimate Tensile Strength) – максимальне напруження, яке матеріал може витримати без руйнування. Однак попри це вона демонструє крихке руйнування, що проявляється у відсутності деформації або подовження зразка після досягнення максимального напруження. Інші три смоли характеризуються більш пластичною поведінкою зі значним подовженням зразка при досягненні границі плинності. Ця пластична поведінка зазвичай асоціюється з кращими експлуатаційними характеристиками й кращим поглинанням енергії при високошвидкісних та ударних навантаженнях.



Випробування на розтяг – це швидкий і простий спосіб для оцінювання механічних властивостей матеріалу при короткочасних навантаженнях, а також для визначення відмінностей між різними матеріалами.

Випробування на втому: вимірювання відгуку матеріалу на багаторазово повторюване навантаження. Наприклад, скільки разів можна стиснути пружину в кульковій ручці, перш ніж вона зламається?

Загальні стандарти, що описують випробування на втому:

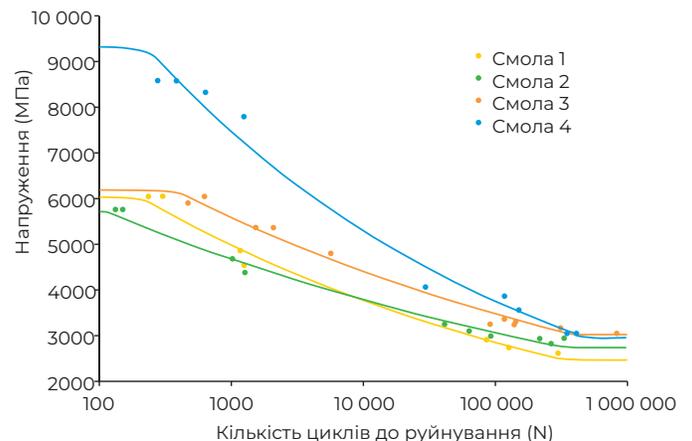
- ISO 1099 – Металеві матеріали – Випробування на втому – Метод з контрольованим осьовим зусиллям
- ASTM D623 – Стандартні методи випробувань властивостей гуми – Тепловідлення та згинальна втома при стисканні
- ASTM D3479 – Стандартний метод випробувань на втому при розтягуванні без стискання (асиметричне розтягування) композиційних матеріалів з полімерною матрицею
- ASTM D4482 – Стандартний метод випробувань властивостей гуми – Втома при циклічному розтягуванні
- ASTM E466 – Стандартна практика проведення випробувань металевих матеріалів на втому з контрольованим осьовим зусиллям постійної амплітуди

Приклад випробування на втому та аналіз його результатів

Оцінка втомних характеристик при довготривалому циклічному навантаженні проводилась для тих же 4 матеріалів, які були використані в описаних вище випробуваннях на розтяг. Для кожного матеріалу випробування на втому проводились в діапазоні максимальних напружень розтягу зразка. Було використано режим асиметричного циклічного розтягування (розтягування без стискання) на частоті 5 Гц зі зміною величини навантаження в межах (10 ... 100)% від значення втомного навантаження, встановленого для поточного випробування (коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0,1$). Експерименти походились на приладах TA Instruments ElectroForce 3330 та ElectroForce APEX 1.

Для мінімізації впливу саморозігрівання зразка на результати вимірювань, він обдувався стислим повітрям. В кожному випробуванні здійснювався моніторинг температури зразка.

На рисунку праворуч для всіх досліджених матеріалів показана крива S-N (крива втоми) – залежність втомного напруження (S) від кількості циклів навантаження (N), яку витримує зразок до руйнування. При малій кількості циклів Смола 4 (SAN) має найвищу границю втоми, але при збільшенні N вона наближається за цим показником до Смоли 3, й згодом навіть трохи поступається їй. Смола 1 та Смоли 2 міняються місцями в цьому рейтингу при зростанні N. З точки зору втомної довговічності Смола 3 має очевидну перевагу перед двома іншими ABS-смолами.



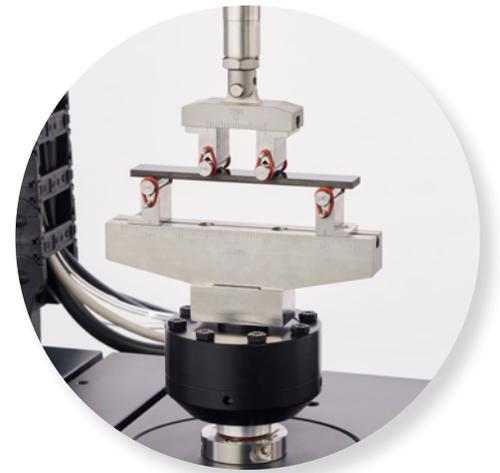
Випробування на розтяг показують, що серед всіх досліджених ABS-матеріалів Смола 1 має найвищу границю міцності на розрив, але дані випробувань на втому свідчать про те, що втомні характеристики є найкращими у Смоли 3.

Знання границі міцності на розрив може допомогти сформулювати уявлення про границю втоми матеріалу, але отримані вище дані ясно показують, що неможливо, знаючи тільки границю міцності, передбачити, який з декількох матеріалів має кращі втомні характеристики, або, яку втомну довговічність можна очікувати від конкретного матеріалу.

Динамічний механічний аналіз (ДМА): вимірювання механічних властивостей матеріалів в залежності від часу, температури та частоти з метою визначення характеристик матеріалів, виробів і компонентів, необхідних для розуміння їхніх функціональних властивостей, а також різноманітних технологічних ефектів.

ДМА використовується для дослідження багатьох характеристик матеріалу, серед яких найчастіше розглядаються наступні:

- Модуль зберігання (E'): характеризує енергію, накопичувану в матеріалі завдяки його пружним властивостям, а також те, як ця енергія віддається назад в процесах розтягуванні зразка та поверненні його до початкової форми.
- Модуль втрат (E''): характеризує енергію, яка перетворюється в теплоту матеріалу завдяки його в'язким властивостям.
- Тангенс кута механічних втрат ($\tan \delta$): відношення модуля втрат до модуля зберігання матеріалу, яке зазвичай вважається показником його демпфуючих властивостей.
- Численні переходи, як-от склування (перехід матеріалу з гумоподібного в'язкого стану в твердий «склоподібний» стан при охолодженні в певному діапазоні температур); розм'якшення (перехід, зворотний склуванню, який спостерігається при нагріванні матеріалу); інші вторинні переходи, що відображають зміни в матеріалі.



Такі вимірювання є корисними для порівняння жорсткості декількох зразків або для визначення того, які зміни відбуваються з одним зразком в залежності від температури в певному діапазоні значень.

Приклад ДМА-випробування та аналіз його результатів

За допомогою ДМА були випробувані три багатофункціональних матеріали: поліетилентерефталат (PolyEthylene Terephthalate, PET), поліетерсульфон (PolyEtherSulfone, PES) та епоксидна смола. При цьому вимірювалась характеристика, що становить найбільший інтерес з точки зору визначення тримкості зразка, а саме, модуль зберігання при згині (E'), який добре узгоджується з модулем пружності при згині, вимірюваним відповідно до ASTM D790. У випадку, коли вимірювання проводиться з нагрівним скануванням, E' відображають як функцію температури.

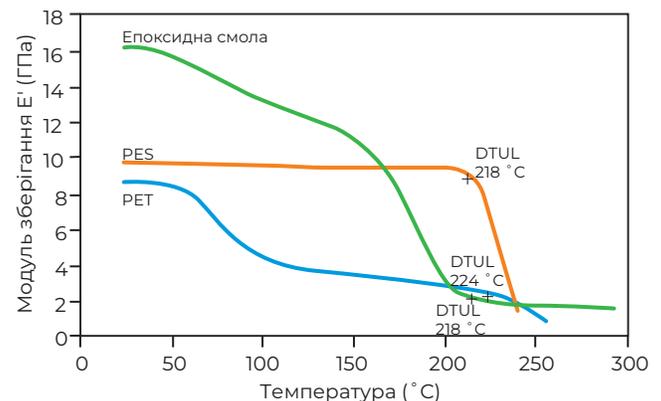
В процесі нагрівання модуль зберігання PET починає швидко зменшуватися, коли температура сягає 60 °C і матеріал входить в область переходу розм'якшення. В кінці цього температурного інтервалу величина модуля стає меншою приблизно на 50% відносно значення, вимірюваного при кімнатній температурі. При подальшому нагріванні, коли температура наближається до точки плавлення зразка, модуль знову починає різко зменшуватися.

PES – це багатофункціональна аморфна смола. В порівнянні зі своїми напівкристалічними аналогами аморфні матеріали мають вищі температури склування, а їхні механічні властивості слабко змінюються при нагріванні від кімнатної температури до температури початку розм'якшення. Однак в процесі розм'якшення зміна властивостей є різкою та сильною, навіть у випадку матеріалів з високим ступенем армування.

Епоксидна смола являє собою систему зі зшиванням молекул та чітко визначеною температурою склування (T_g). Для таких матеріалів температурна залежність модуля зберігання пов'язана з щільністю зшивок. Відповідно, під час нагрівання від кімнатної температури до T_g модуль зберігання епоксидної смоли постійно зменшується.

Порівняно з іншими методами випробувань, наприклад, з методом аналізу температури вигину під навантаженням (Deflection Temperature Under Load, DTUL), ДМА дозволяє набагато краще зрозуміти зміни, що відбуваються в матеріалах під час нагрівання, а також вплив підвищених температур на експлуатаційні характеристики цих матеріалів, як це демонструє рисунок вище. Детальніше читайте в [Примітці щодо застосування](#).

Порівняння результатів ДМА для матеріалів з близькими значеннями температури вигину під навантаженням (DTUL)

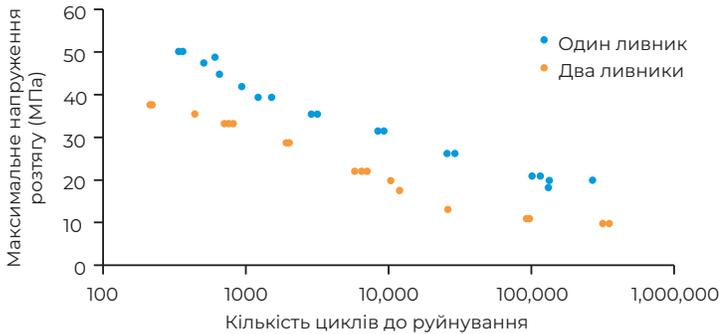


Який метод підходить для Вашого застосування?

Полімери. Розробники полімерів знайдуть дуже корисними для себе всі вищезазначені види механічних випробувань: **монотонні, втомні та ДМА.** Зазвичай **технічна специфікація матеріалу** містить недостатньо інформації для того, щоб визначити, наскільки добре цей матеріал або виріб на його основі відповідає умовам певного застосування. Наприклад, Вам може бути відоме конкретне значення прикладеної сили, при якому виріб зламається, але що станеться, коли сила з величиною 50% від цього значення буде прикладена 10000 разів? А якою буде поведінка виробу за різних температур?

Приклад експерименту: Як виробничі артефакти на кшталт ліній стикування впливають на втому полімерів?

Криві втоми для зразків, виготовлених методом лиття під тиском через один і два впускних ливники



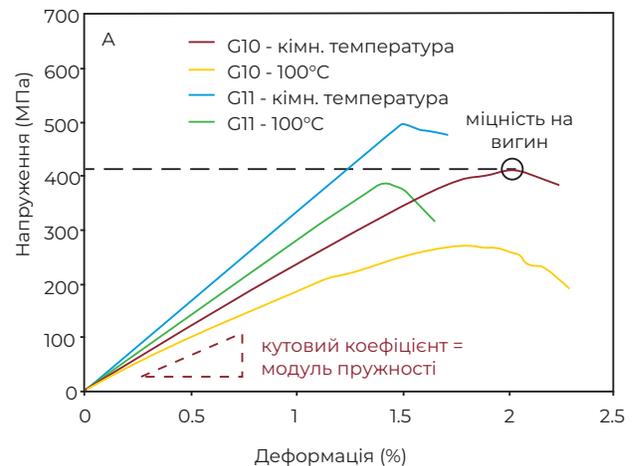
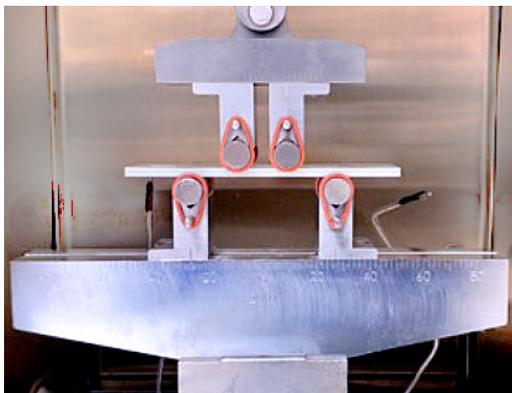
Для зразків, які відливалися у ливарну форму через два впускних ливники й тому мають лінії стикування, втомна довговічність становить лише (6 ... 18)% від значення, отриманого для їхніх аналогів, що відливалися через один ливник.

Дізнайтеся більше про це випробування в окремій **Примітці щодо застосування.**

Електроніка При виборі матеріалів для використання в електронних пристроях зазвичай враховують їхню термостійкість. **ДМА, втомні та монотонні випробування** дозволяють визначити реакцію таких матеріалів на прикладену силу й навантаження в різних температурних умовах. Температурні залежності механічних властивостей можуть впливати на експлуатаційні характеристики електронних пристроїв за різних робочих температур та в різних застосуваннях. Виробники електроніки мають можливість використовувати різні величини прикладеної сили, а також різноманітні умови випробування для моделювання будь-яких процесів: від падіння телефону до запуску ракети.



Приклад експерименту: Garolite – багатофункціональний композит на основі тканого матеріалу зі скловолокна – використовується в електроніці завдяки його електроізоляційним властивостям, стабільності розмірів, міцності та вологостійкості. Були протестовані два сорти Garolite: G10 та G11; за більшістю характеристик вони подібні один до одного, але G11 має вище значення максимально допустимої робочої температури.



Зразки Garolite G10 і G11 у вигляді прямокутних пластинок пройшли монотонні випробування на 4-точковий згин за кімнатної температури, а також за температури 100 °C, й в останньому випадку показали суттєву зниження міцності на вигин. Однак для G11 результати є значно кращими, оскільки в нагрітому стані він зберігає ~80% свого ресурсу міцності, в той час як G10 зберігає лише 68%. Крім того, знайдено, що хоча застосована у випробуванні температура 100 °C є помітно нижчою за гранично допустимі значення 130 °C та 170 °C для G10 і G11 відповідно, але ці матеріали зазнали вражаючого зменшення втомної довговічності – відповідно 91% та 46% відносно значень при кімнатній температурі – що розкриває наявність критичного слабкого місця в робочому діапазоні температур.

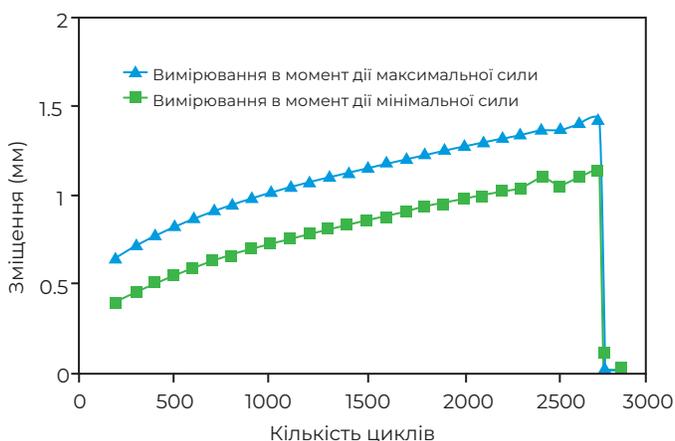
Ознайомтеся з повним описом та аналізом результатів цих експериментів у **Примітці щодо застосування.**

Автомобільна та аерокосмічна промисловість. Для цих галузей потрібні термо- та хімічностійкі матеріали з високими показниками міцності й зносостійкості. Всі три види механічних випробувань, зазначені вище, є важливими для вивчення окремих аспектів:



- Монотонні випробування демонструють, який вплив на матеріали має одноразово прикладене навантаження, наприклад, при зіткненні. Яке зусилля необхідно прикласти, щоб зруйнувати ці матеріали?
- Випробування на втому розкривають, як на матеріали впливає повторюване прикладання сили. Чи зламається компонент підвіски автомобіля після його багаторазового проїзду по вибоїні? Як будуть зношуватися амортизатори двигуна після тисяч годин роботи в гарячому середовищі під капотом?
- ДМА показує, як температура й час впливають на матеріали. Наприклад, компоненти паливної системи: окрім того, що вони повинні витримувати звичайний нагрів під час поїздки або польоту, як вони будуть поводитись при аварії або турбулентності?

Приклад експерименту: Передові полімерні та композиційні матеріали, що використовуються в зовнішньому оздобленні сучасних транспортних засобів, повинні бути достатньо міцними й зносостійкими, а також здатними витримувати екстремальний вплив навколишнього середовища та значні деформації під час експлуатації.

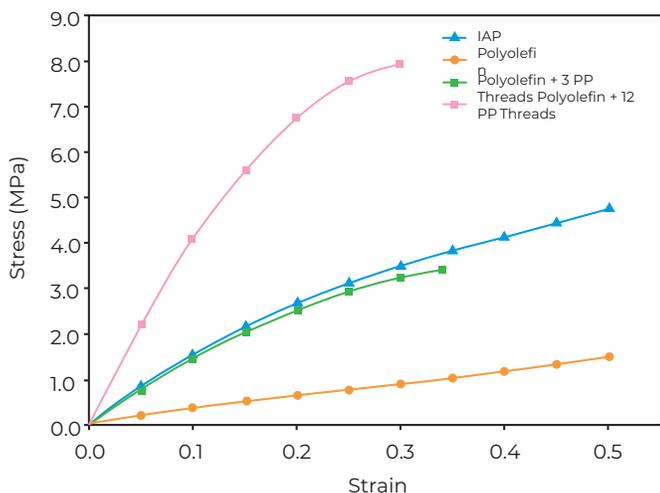


Для оцінки такого полімеру було проведено його випробування на втому в режимі контролю навантаження (напруження) при зміні прикладеної сили від 15 Н до 145 Н за синусоїдальним законом з частотою 5 Гц. Рисунок ліворуч демонструє, що протягом всього випробування в матеріалі відбувалося накопичення пластичної деформації аж до руйнування зразка після 2700 циклів.



Медичні вироби та імпланти. Така продукція повинна мати достатньо високі міцність, жорсткість та зносостійкість, щоб замінювати собою частини організму, як-от кістки чи зуби, або механічно підтримувати частини тіла, як у випадку імплантів чи стентів. При цьому такі вироби вимушені взаємодіяти з природними тканинами, а отже зазвичай також повинні мати додаткові механічні особливості для інтеграції в організм. Визначати, наскільки добре медичні вироби та імпланти будуть виконувати свої функції – саме це дозволяють зробити **монотонні та втомні випробування**, імітуючи умови in-vivo середовища, в якому будуть експлуатуватися конкретні продукти, а також моделюючи роки їхньої реальної роботи в експериментах, що тривають лише тижні або місяці.

Приклад експерименту: З метою вдосконалення протезів клапанів серця були порівняні механічні властивості одного з полімерів, що вже схвалені для використання в імплантатах (implant-approved polymer, IAP), та нового виду поліолефіна з покращеною окислювальною стійкістю – в ізотропній формі та у формі композиту з армуючими поліпропіленовими (polypropylene, PP) волокнами. Здатності до розтягування оцінювались в монотонних випробуваннях на розтяг до розриву при постійній швидкості деформації. Також були проведені випробування на втому при розтягуванні без стискання в режимі контролю навантаження (напруження) зі зміною сили від 10% до 100% максимального значення за синусоїдальним законом з частотою 100 Гц.

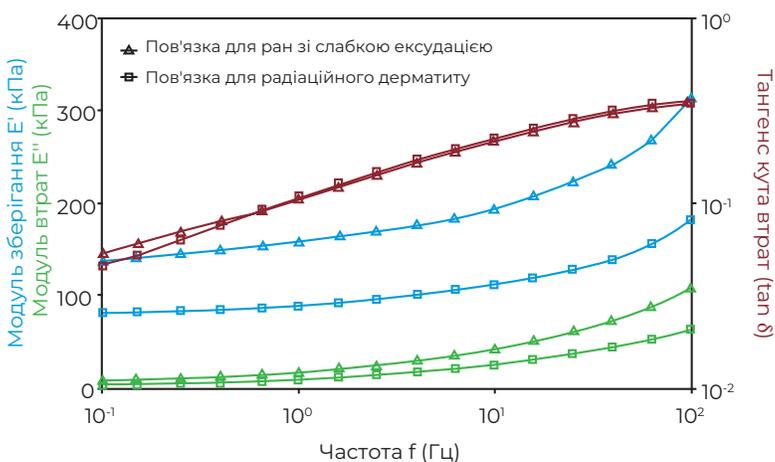


Як видно з результатів випробувань на розтяг (див. рисунок ліворуч), ізотропний поліолефін (помаранчева крива) поступається IAP (синя крива) за модулем пружності, і для отримання аналогічного значення поліолефін необхідно армувати щонайменше 3 нитками PP (зелена крива). Однак з результатів випробувань на втому виходить, що для досягнення втомних характеристик, кращих ніж у IAP, кількість ниток армування в поліолефіновому композиті повинна бути збільшена до 12. Отже описані вимірювання є корисними при підборі найкращого матеріалу для імплантів, механічні характеристики якого були би аналогічними або навіть кращими, ніж у існуючих аналогів.

Дізнайтесь більше про це дослідження та аналіз його результатів з [Примітки щодо застосування](#).

Біоматеріали та гідрогелі При проведенні досліджень і розробок за цим напрямком корисними є згадані вище методи механічних випробувань, що використовуються в галузі медичних виробів та імплантів, а, крім того, особливу цінність має **динамічний механічний аналіз**, оскільки біоматеріали та гідрогелі тісно контактують з природними тканинами. Багато з таких матеріалів є в'язкопружними, що потребує залучення ДМА для визначення їхніх динамічних характеристик в умовах застосування.

Приклад експерименту: ДМА був використаний для визначення характеристик дво х типів гідрогелевих ранових пов'язок місцевої дії: один – призначений спеціально для лікування радіаційного дерматиту, а інший – для лікування ран зі слабкою ексудацією.



Результати вимірювань з розгорткою по частоті при відносній деформації 0,25% показують (див. рисунок ліворуч), що пов'язка для ран зі слабкою ексудацією має модуль зберігання, приблизно на 50% вищий, ніж пов'язка для радіаційного дерматиту, хоча значення тангенса кута втрат у них є близькими. Це вказує на те, що пов'язка першого типу є жорсткішою та при деформуванні зберігає більше енергії пружної деформації, а отже має меншу релаксацію напружень і краще утримує свою структуру. Близькі значення тангенса кута втрат свідчать про те, що для всіх значеннях частоти, використаних при випробуванні, обидві пов'язки мають приблизно однакові демпфуючі властивості.

Ознайомтесь з повний описом й аналізом цього експерименту у [Примітці щодо застосування](#).

Вибір приладу

Щодо “зручності використання”

“Зручність використання” – це модний вислів в сфері обладнання для механічних випробувань, який зазвичай використовується для опису мильного програмного забезпечення та гарненьких символів. Але чи дійсно він означає, що Ваші оператори зможуть легко отримувати дані без інтенсивних тренінгів і багаторічного досвіду?

Справжня зручність використання полягає в тому, щоб оператори, пройшовши лише незначну підготовку, мали змогу впевнено проводити експерименти без побоювання пошкодити обладнання. Вашим операторам, коли вони будуть зосереджені на своїх експериментальних цілях, не доведеться відволікатися на турбування про цілісність приладу.

Майбутнє Вашої лабораторії

При виборі приладу для механічних випробувань вченим та інженерам слід не просто намагатися задовільнити наявні потреби, але також варто зазирати в майбутнє. З часом коло задач механічних випробувань зазвичай розширюється, і тому придбання приладу, який вирішує тільки певні поточні проблеми, може пізніше обернутися дефіцитом можливостей. Часто перспективність обладнання розглядається лише з точки зору цифр, наведених в специфікації, але більш важливими зазвичай є типи вимірювань та експериментів, які це обладнання може забезпечити. Передові прилади для механічних випробувань є вагомим інвестицією, і тому Вам слід переконатися, що вони здатні виконувати більше, ніж просто один чи два типи випробувань.

Вимоги до випробувань

Обираючи прилад для механічних випробувань, необхідно звертати увагу на такі фактори, як доступні види випробувань; характеристики сили та частоти, які прикладаються до зразка; діапазон зміщення.

- **Види випробувань.** Прилади розрізняються в своїх можливостях щодо виконання різних видів експериментів. Деякі прилади більшою мірою оптимізовані під ДМА, інші – під високочастотні випробування на втому, а, крім того, є варіанти зі збалансованими можливостями. При виборі обладнання важливо знати поточні й майбутні задачі механічних випробувань для того, щоб Ваші інвестиції принесли максимальну віддачу.
- **Сила.** Прилад повинний бути спроможним з достатньо високою точністю прикладати до зразка необхідну величину сили або створювати в ньому потрібне механічне напруження. При цьому слід брати до уваги як максимально доступне зусилля, що розвиває прилад, так і мінімальну роздільну здатність по визначенню величини сили.
 - В окремих випадках геометрію зразка можна змінити в такий спосіб, щоб отримати необхідного значення напруження, прикладаючи силу меншої величини.
- **Зміщення.** Воно характеризує здатність приладу піддавати зразок деформації/навантаженню бажаної величини. Зазвичай при виборі обладнання основну увагу приділяють максимально доступній величині деформації, але, крім того, необхідно також враховувати його здатність прикладати та вимірювати деформацію дуже малої величини.
 - Більша величина зміщення є додатковою перевагою, оскільки вона дозволяє працювати з ширшими наборами зразків і типів випробувань без додаткового конфігурування приладу та побоювань відносно того, що деформація перевищить максимально допустиме значення.
- **Динамічна характеристика.** Вона відображає здатність приладу прикладати до зразка необхідне напруження та деформацію з максимально можливою частотою задля найшвидшого виконання випробувань.
 - Максимально допустиме значення частоти може обмежуватися характеристиками двигуна приладу, особливостями зразка (наприклад, самонагріванням) або прийнятими галузевими/нормативними правилами.



Довідковий листок по приладах

Динамічні механічні аналізатори

DMA 850		DMA 3200	
	Найкращий аналізатор загального призначення		Найкращий аналізатор з високим зусиллям
	Зусилля до 18 Н		До 500 Н

Прилади для монотонних і втомних випробувань

ElectroForce 5500	ElectroForce 3200	ElectroForce 3500	ElectroForce Apex 1
Доступний та точний прилад для випробувань на втому; ідеальний для тканин та медичних виробів	Ідеально підходить для випробувань, а також для ДМА, при низьких зусиллях	Здатний випробовувати найміцніші зразки з найвищим зусиллям	Найуніверсальніший і легкий у використанні прилад для монотонних та втомних випробувань
До 200 Н	До 225 Н або до 450 Н	До 15 000 Н	До 1 000 Н
			

Список використаних джерел

1. Jones, David S. Dynamic mechanical analysis of polymeric systems of pharmaceutical and biomedical significance. International Journal of Pharmaceutics, Volume 179, Issue 2, (1999): 167-178. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(98\)00337-8](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(98)00337-8)



LEM UKRAINE – це колектив кваліфікованих спеціалістів з багаторічним досвідом роботи в сфері постачання та обслуговування обладнання для термічного аналізу, молекулярної та атомної спектроскопії, систем для визначення характеристик частинок, порошків та пористих матеріалів.



ТОВ «ЛЕМ УКРАЇНА»
вул. Рибальська, 2, оф. 302
Київ, 01011, Україна

тел.: +380 95 637 78 52
e-mail: info@lem-ukraine.com.ua
www.lem-ukraine.com.ua

Waters™



TA Instruments and Waters are trademarks of Waters Corporation.
All other trademarks are the property of their respective owners.

©2025 Waters Corporation. All rights reserved.
June 2025 ADV00001EN Rev. A

TA Instruments
159 Lukens Drive
New Castle, DE 19720 U.S.A.
T: 1 302 427 4000
F: 1 302 427 4041
www.tainstruments.com

Waters Corporation
34 Maple Street
Milford, MA 01757 U.S.A.
T: 1 508 478 2000
F: 1 508 872 1990
www.waters.com