# Основи реології

Реологія  використовується для опису і оцінки деформації та плинності матеріалів. Рідини можуть текти з різною швидкістю, а тверді речовини можуть деформуватися до певної міри. Олія, мед, шампунь, крем для рук, зубна паста, желе, пластик, дерево та метали в залежності від їх фізичної поведінки можна умовно розташувати на відрізку, де: з одного боку -  рідини, а з іншого боку - тверді тіла, й між ними - дуже в'язкі та напівтверді речовини. В данній статті коротко представлені фундаментальні принципи реології.

## Вступ до реології

### В’язка поведінка в реології

Рисунок 1.1.

Реологія – це розділ фізики, який описує деформацію і плинність всіх видів матеріалів. Термін походить від грецького слова "rhei", що означає "текти" (Рисунок 1.1: Пляшка 19-го століття з написом" *“Tinct(ur) Rhei Vin(um) Darel”.* Виставлено в німецькому *Apotheken-Museum* [Музей аптеки], Гейдельберг. Термін "rhei" вказує на те, що вміст пляшки є рідким.). Реометрія - це сукупність технологій вимірювання, які використовуються для визначення реологічних властивостей.

## Що таке в’язкість?

Всі рідини складаються з молекул; дисперсії -теж, але вони містять істотно більші частинки. Під час руху молекули і частинки змушені терти одина одну. Таким чином, створюється опір течії, викликаний внутрішнім тертям.

Більші частинки, які містяться в рідині, спричиняють більші значення в'язкості.

## Чому різні речовини мають різну в’язкість?

Молекули у рідинах мають різні розміри: молекули розчинника близько 0,5 нм, полімери близько 50 нм (заплутаний клубок у стані спокої), мінеральні частки близько 5 мкм = 5000 нм. Один нанометр (1 нм) дорівнює $10^{-9}$ м; один мікрометр (1 мкм) дорівнює $10^{-6}$ м. Це означає, що співвідношення розмірів між молекулами та частинками знаходиться в діапазоні від 1:100 до 1:10000 (рис. 1.2). Співвідношення 1:1000 можна проілюструвати наступним чином: молекули – це риби, кожна з яких має довжину 10 см (0,1 м), а частинки – це кораблі довжиною 100 м (рис. 1.3).

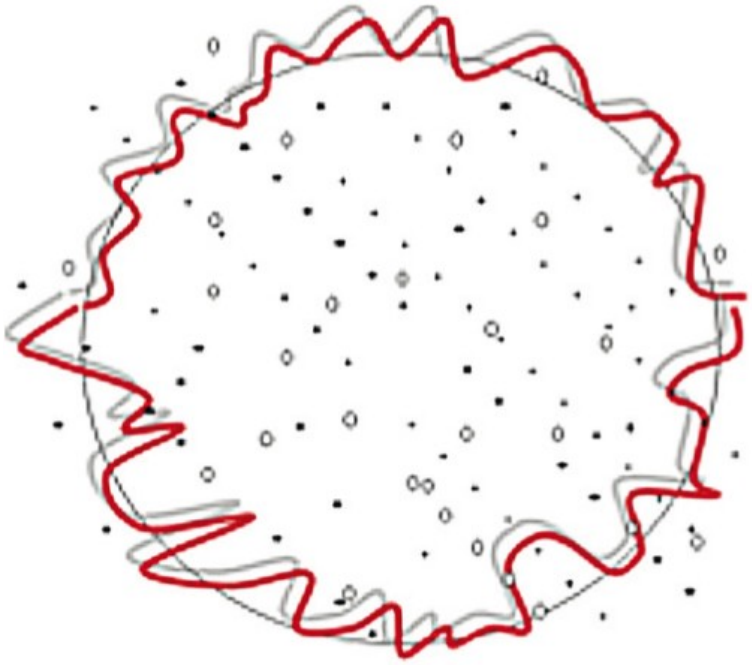

Рисунок 1.2. Порівняння розмірів молекул в розчиннику (крапки), полімерних молекул (маленькі кола) та частинок в рідині (червона крива). В’язкість – це внутрішнє тертя, яке викликане тим, що всі частинки (молекули, полімерні частинки та інші) в рідині труться одна об одну.

Рисунок 1.3. Візуалізація відношення розмірів 1:1000, яке подібне до відношеня розмірів молекул і частинок у рідині. Таке відношення можна порівняти з різницею між розмірами малої риби і великого корабля.

## Ротаційні віскозиметри, осциляційні реометри та їх вимірювальна геометрія

Сучасні реометри можуть використовуватися для випробувань на зсув та кручення. Реометри використовують методи постійного обертання та обертального коливання (обертальної осциляції) (рис. 2.1). Спеціальні вимірювальні системи можуть бути використані у двох випадках: при одновісному дослідженні - розтягуванні в одному напрямку або для осциляційних тестів.

За допомогою віскозиметра можна визначити лише значення в'язкості зразка. Це можна зробити, виконуючи ротаційні тести, переважно із заданою швидкістю обертання, або за допомогою інших методів тестування. Результати представляють у вигляді реологічних кривих  або кривих в'язкості. Ви можете знайти багато методів та підходів для вимірювання в'язкості у відповідній статті. Реометри здатні визначати багато інших реологічних параметрів.

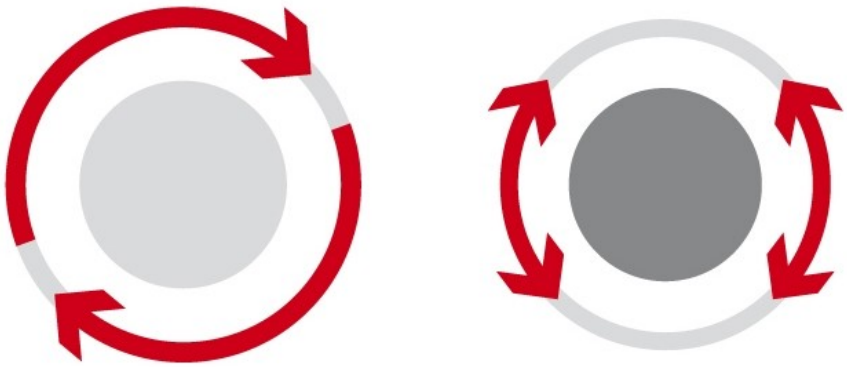

Рисунок 2.1. Вимірювальний принцип типового реометра для ротаційного тесту з постійним обертанням (зліва), або тесту з обертальним коливанням (справа).

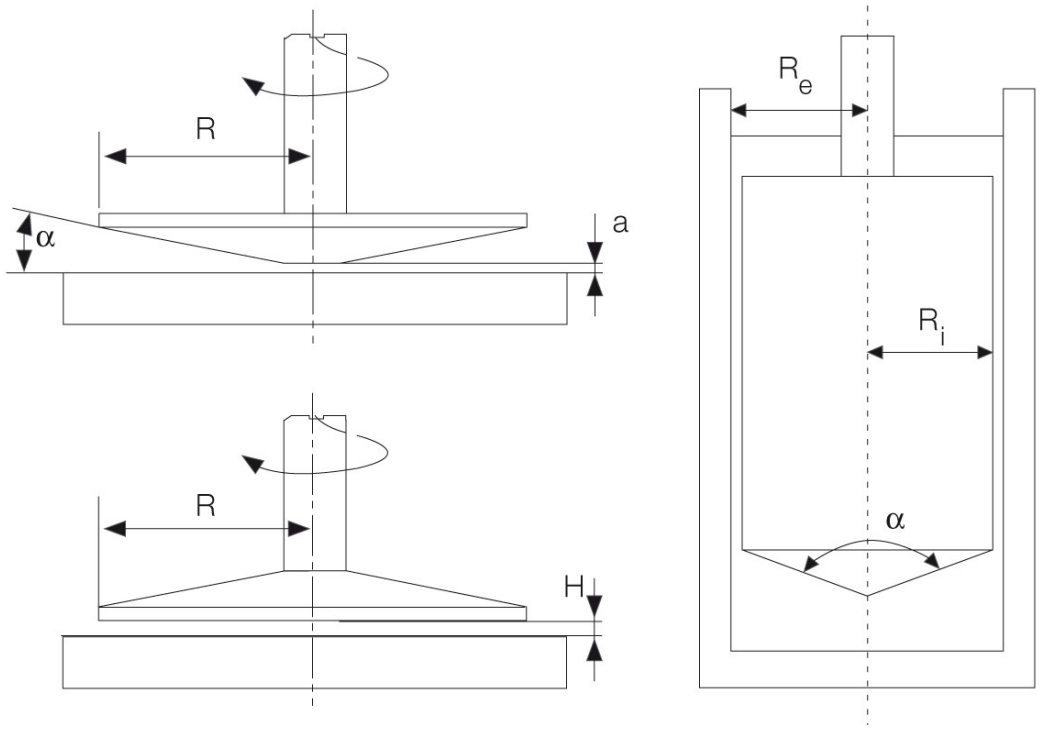


Рисунок 2.2. Вимірювальні системи: конус-пластина (радіус R, кут конуса α, зріз конуса a);паралельні пластини (радіус R, відстань між пластинами H); концентричні циліндри (радіус вимірювального валу $R_i$, радіус резервуару $R_e$, внутрішній кут при вершині вимірювального валу α).

Прості методи вимірювання в'язкості включають, так звані, відносні вимірювальні системи. Отримані результати завжди залежать від використаного пристрою і їх не можна порівнювати з результатами, отриманими на іншому приладі (наприклад, чашечні віскозиметри[a, b, c] або віскозиметри падіння/кочення[d, e]).

Абсолютні значення, наприклад, в'язкість, можна визначити лише за допомогою абсолютних вимірювальних систем. На відміну від відносних значень, абсолютні не залежать від розміру вимірювальної системи. Вони мають відносно вузький проміжок зсуву, визначений спеціальними стандартами для вимірювальних систем, такими як ISO 3219[f] та DIN 53019[g]. Ці стандарти описують наступні вимірювальні геометрії (рис. 2.2 і 2.3): конус-пластина, концентричні циліндри та паралельні пластини.

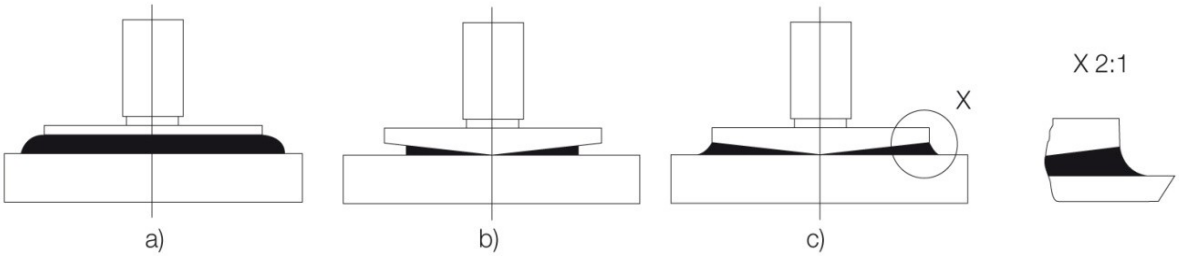


Рисунок 2.3. Заповнення зразком вимірювальної системи конус-пластина a) переповнена, b) недозаповнена, c) ідеальна кількість речовини (згідно стандарту DIN 51810-1)

# В’язкість і ротаційні тести

## Ротаційні тести

Ротаційні тести (рис. 3.1) з використанням реометра можуть виконуватися в одному з двох режимів роботи, які відрізняються заданими параметрами (Таблиці 2 і 3). Перший спосіб - задати швидкість, тобто швидкість обертання або швидкість зсуву, метод має назву «контрольована швидкість зсуву» (від англ. controlled shear rate **CSR** або **CR**). Цей метод імітує процеси, які залежать від швидкості потоку або об'ємної витрати, наприклад, під час фарбування стін щіткою, розпилювання фарб або протікання матеріалу через трубку (рис. 3.2). Другий спосіб полягає у попередньому встановленні рушійної сили за допомогою моменту сили або напруження зсуву, метод має назву «контрольоване напруження зсуву» (від англ. controlled shear stress, **CSS** або **CS**). Цей метод дослідження імітує процеси, в яких важливою є сила, оскільки сила необхідна для того, щоб почати відкачувати матеріал в стані спокою або витиснути герметик з туби, або витягнути матеріал з труби. Переведення моменту сили в дотичне напруження та швидкості обертання в швидкість зсуву і, навпаки, є можливим завдяки коефіцієнтам перетворення.

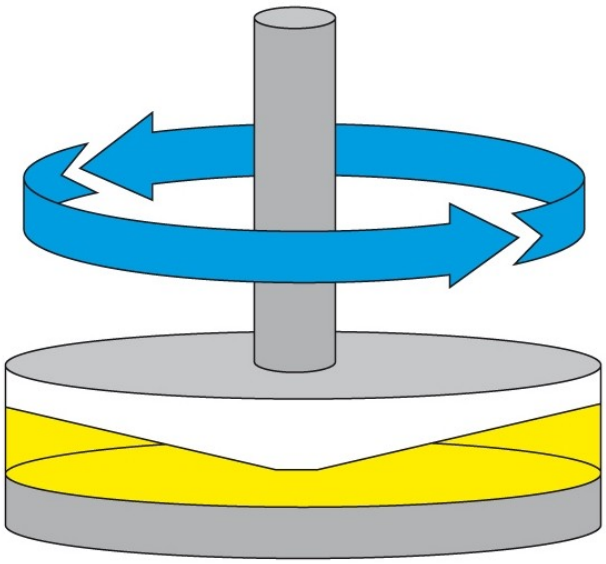

Рисунок 3.1. Ротаційний зсувний тест зі зразком: конус обертається, в той час як нижня пластина є нерухомою.

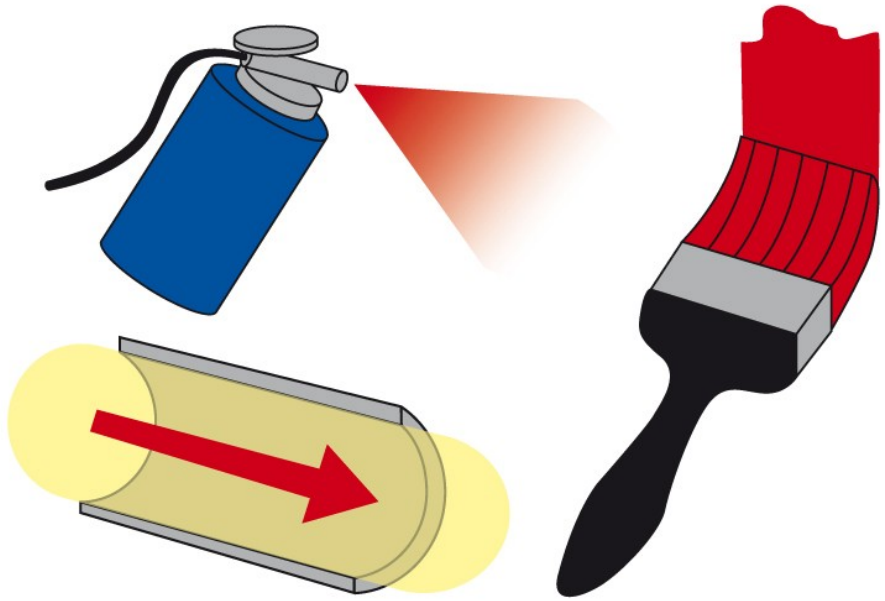

Рисунок 3.2. Тест з контрольованою швидкістю зсуву може бути використаний для випадків, які залежать від швидкості потоку або об'ємної витрати, наприклад, під час фарбування стін щіткою, розпилювання фарб або протікання матеріалу через трубку.

---

Таблиця 1. Ротаційний тест з контрольованою швидкістю зсуву (CSR), результати вимірювання і реологічні параметри.

| **Обертання із заданою швидкістю зсуву (CSR)** | **Задана велечина** | **Результат** |
|---|---|---|
| Результати вимірювання отримані на реометрі | Швидкість обертання V (хв$^{-1}$) | Момент сили M (Н·м) |
| Розрахована реологічна величина | Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (с$^{-1}$) | Дотичне напруження $\tau$ (Па) |

Таблиця 2. Ротаційний тест з контрольованим дортичним напруженням (CSS), результати вимірювання і реологічні параметри.

| **Обертання з контрольованим дотичним напруженням (CSS)** | **Задана величина** | **Результат** |
|---|---|---|
| Результати вимірювання отримані на реометрі | Момент сили M (Н·м) | Швидкість обертання V (хв$^{-1}$) |
| Розрахована реологічна величина | Дотичне напруження $\tau$ (Па) | Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (с$^{-1}$) |

---

Для розрахунку в'язкості режим роботи не має значення, оскільки такі параметри, як дотичне напруження та швидкість зсуву доступні або, як попередньо встановлені значення, або, як результати вимірювання.

**CSR та CSS заданий вигляд для реологічних кривих (Рисунок 3.3):**

1. Заздалегідь встановлена зміна швидкості обертання або швидкості зсуву зазвичай зростає або спадає покроково
2. Заздалегідь встановлений момент сили або дотичне напруження зазвичай зростає або спадає покроково

Для швидкості зсуву вище 1 $c^{-1}$ згідно з типовими налаштуваннями, рекомендованими для обох режимів, тривалість вимірювання має бути принаймні одна-дві секунди, оскільки зразок потребує певного часу, щоб адаптуватися до кожного етапу зсуву.

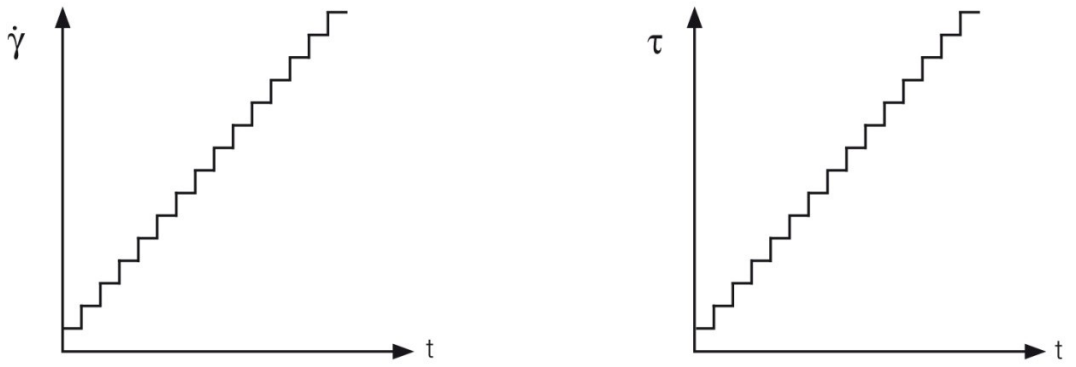


Рисунок 3.3. Заданий вигляд реологічної кривої в залежності від часу у покроковому тесті, має 15 сходинок для 15 точок вимірювання, відповідно, графік досліду з контрольованою швидкістю зсуву (CSR) росташовано зліва, дослід з контрольованим дотичним напруженням (CSS) - справа.

# Визначення понять: дотичне напруження, швидкість зсуву, закон в’язкості, кінематична в’язкість

Модель двох пластин використовується для визначення реологічних параметрів, необхідних для наукового опису поведінки потоку (рис. 4.1 та 4.2). Зразок, закріплений між двома пластинами, починають зсувати. Нижня нерухома пластина монтується на дуже жорстку опору, а верхня пластина може рухатись паралельно нижній. Перед тим, як розрахувати в'язкість, необхідно спочатку визначити дотичне напруження та швидкість зсуву.

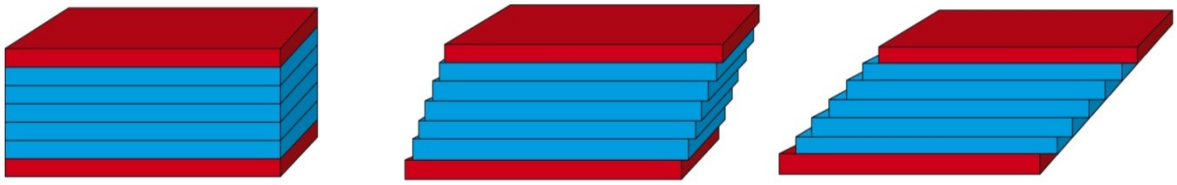

Рисунок 4.1. Модель двох пластин використана для зсувного тесту: зразок, який знаходиться між двома пластинами, зсувають; верхня пластина рухається, а нижня - зафіксована. На рисунку зображено ідеалізовану модель рідини, яку можна розділити на багато тонких шарів, які зсунуті один відносно іншого[1].

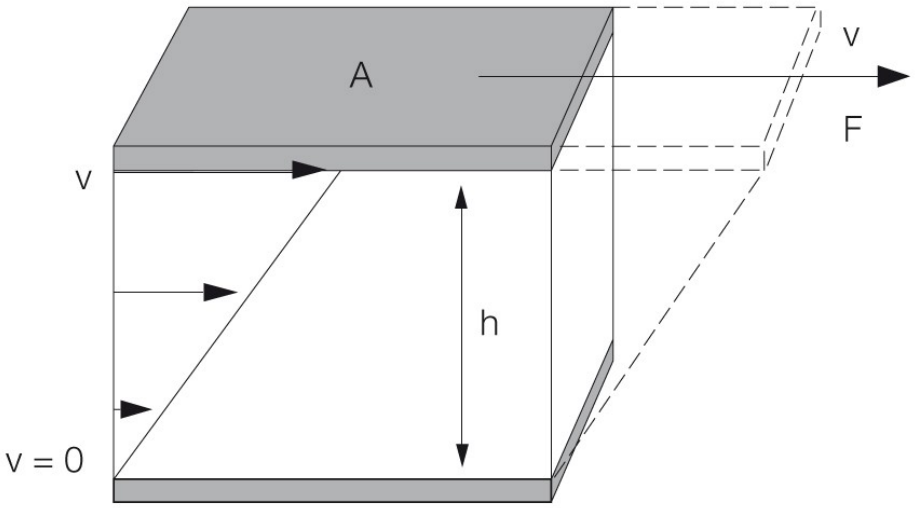


Рисунок 4.2. Розрахунок дотичного напруження та швидкості зсуву за допомогою моделі двох пластин з площиною, яку рухають A, відстанню між пластинами h, зсувною силою F і швидкістю V.

## Дотичне напруження

Визначення проводиться за формулою:

$\tau = F/A$ ,

де $\tau$ (кажуть «тау») – дотичне напруження,

F - сила зсуву [Н] (Ньютон) та

A - площа зсуву [$м^2$], (рис. 4.3).

Одиниці вимірювання дотичного напруження – 1 [$Н/м^2$]= 1 [Па] (Паскаль). Реометр записує силу зсуву, яку розраховує з моменту сили у кожній точці вимірювання.

### Швидкість зсуву

Визначення проводиться за формулою:

$\dot{\gamma} = V/h$,

де $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву (кажуть «гамма з крапкою»),

V - швидкість [м/с] та

h - відстань між пластинами [м], (рис. 4.4).

Одиниці вимірювання швидкості зсуву – $1/c = 1\ c^{-1}$ (обернена секунда або секунда в мінус першому степені). Реометр записує швидкість, яку розраховує з швидкості обертання у кожній точці вимірювання.. Відстань між пластинами вимірювальної системи відома.

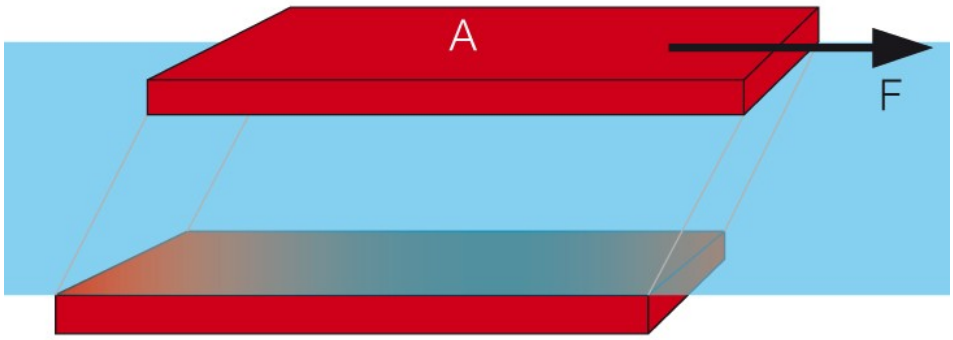


Рисунок 4.3. Модель двох пластин використана для означення дотичного напруження за допомогою зсувної сили F і площини зсуву A, верхньої рухомої пластини.

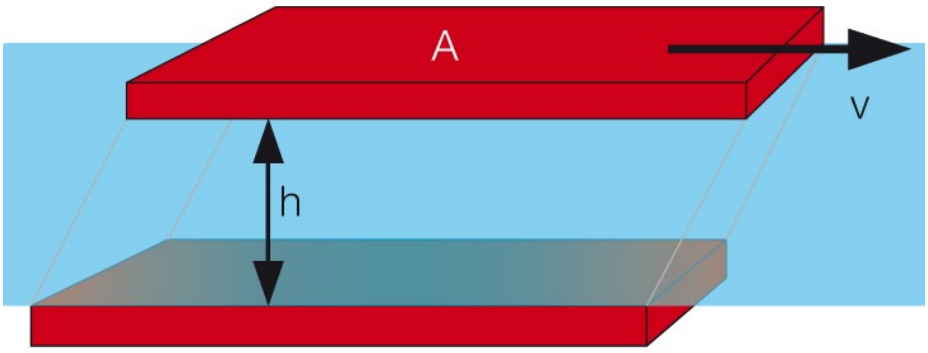


Рисунок 4.4. Модель двох пластин використана для означення швидкості зсуву, за допомогою швидкості V, з якою рухається верхня пластина та відстанню між пластинами h.

## В’язкість або динамічна в’язкість / закон в’язкості

Рисунок 4.5. Закон в’язкості.

**Рисунок 4.5.** Закон в'язкості: В'язкість η визначається як дотичне напруження τ, поділене на швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (ліворуч). Закон в'язкості, зображений таким чином: дотичне напруження τ – це швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ помножена на в'язкість η (праворуч).

Визначення проводиться за формулою:

$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$,

де η - в'язкість (кажуть «ета»),

τ - дотичне напруження [Па] та

$\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву [$с^{-1}$], див. рис. 4.5 (деякі значення в'язкості викладені в Таблиці 1).

Таблиця 1. Деякі значення в’язкості (при нормальній температурі, якщо не вказане зворотне)

| **Рідкий матеріал** | **Значення в’язкості** |
|---|---|
| Газ/повітря | Від 0,01 мПа·с до 0,02 мПа·с / 0,018 мПа·с |
| Вода при 20°C<br>( 0 °C/ 40 °C/ 60 °C/ 80 °C/ 100 °C) | 1,0 мПа·с (1,8 мПа·с / 0,65 мПа·с / 0,47 мПа·с / 0,35 мПа·с / 0,28 мПа·с) |
| Молоко, вершки | Від 2 мПа·с до 10 мПа·с |
| Соняшникова олія | Приблизно 100 мПа·с |
| Моторне масло<br>(для прикладу SAE 10W-30, при +23 °C/ +50 °C/ +100 °C) | Від 50 мПа·с до 1000 мПа·с (175 мПа·с / 52 мПа·с / 20 мПа·с) |
| Полімерні розчини<br>(температура від T = +150°C до +300°C і при зсувних швидкостях від 10 до 1000 $с^{-1}$) | Від 10 мПа·с до 10 000 мПа·с |

Таблиця 1. Деякі значення в’язкості (при нормальній температурі, якщо не вказане зворотне)

| **Рідкий матеріал** | **Значення в’язкості** |
|---|---|
| Полімерні розчини (нульова динамічна в’язкість, що означає зсувні швидкості менше 1 $с^{-1}$) | Від 1 кПа·с до 1 мПа·с |
| Бітум при Т = +80°С/ +60 °С/ +40 °С/ +20°С/ 0 °С | 200 мПа·с / 1 кПа·с / 20 кПа·с / 0,5 мПа·с / 1 мПа·с |

Всі три величини: дотичне напруження, швидкість зсуву та в’язкість можуть бути точно виміряні, якщо наявний ламінарний потік, який було попередньо створено, а отже і однорідний потік (Рисунок 4.6 та 4.1). Це означає, що не повинна створюватись турбулентна течія з вихрами.

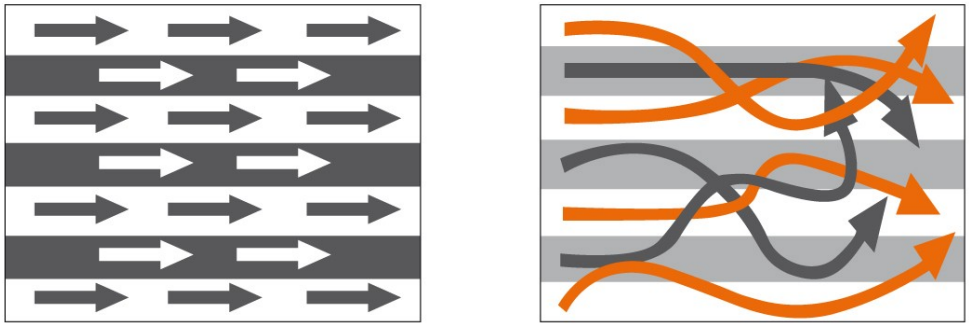

Рисунок. 4.6. Однорідна або ламінарна течія (зліва) та турбулентна течія з вихрами (справа).

## Кінематична в’язкість

Інший тип в’язкості – це кінематична в’язкість $\nu$ (кажуть «ню»).

Визначення проводиться за формулою:

$\nu = \eta/\rho$ ,

де $\eta$ – динамічна в’язкість, одиниці вимірювання [Па·с], а

$\rho$ – густина, одиниці вимірювання [кг/$м^3$].

Одиниці вимірювання кінематичної в’язкості – [$м^2$/с] = $10^6$ [$мм^2$/с]. Примітка для розрахунків: одиниці вимірювання в’язкості – [кг/$м^3$] та [г/$см^3$], при цьому 1000 [кг/$м^3$]= 1 [г/$см^3$].

Одиниці вимірювання динамічної в’язкості – 1 [Па·с] = 1000 [мПа·с] (паскаль секунди і міліпаскаль секунди).

Інші одиниці вимірювання: 1 кПа·с = 1000 Па·с (кіло-Па·с), 1 МПа·с = 1 000 000 Па·с (мега-Па·с). Раніше використовувались такі одиниці вимірювання як 1 сП = 1 мПа·с (сантипуаз, гарно звучить по-французьки), але сП не є одиницею СІ і ці одиниці вимірювання вже не є актуальними.

Кінематична в'язкість є виміряною величиною, якщо вимірювання проводиться завдяки силі тяжіння або вазі зразка як рушійній силі. Це стосується, наприклад, тестів з чашечними та капілярними віскозиметрами, а також з кульковими віскозиметрами падіння. Раніше, як одиниця вимірювання для кінематичної в'язкості, використовувався 1 сСт = мм$^2$/с (сантистокс), але сСт не є одиницею СІ і ця одиниця вимірювання також не є актуальною.

СІ – це міжнародна система одиниць (з Французької: système international d'unités)[2].

## Поведінка течії, реологічні криві та криві в'язкості

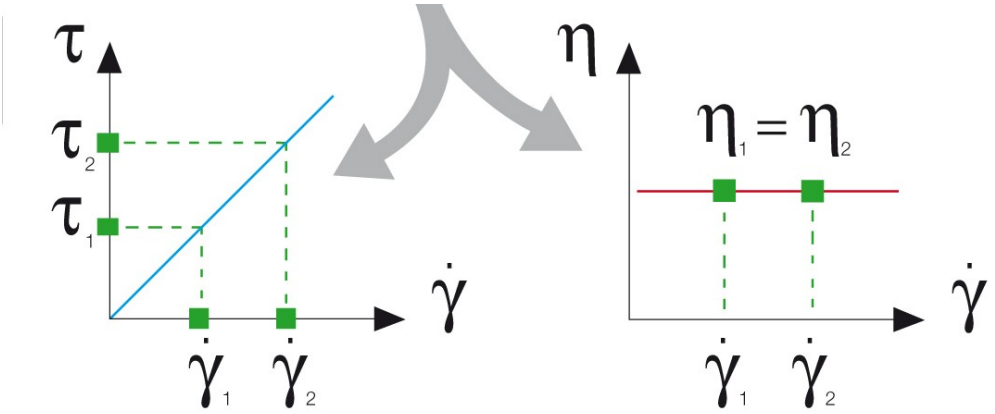


Рисунок 5.1 Реологічна крива, отримана шляхом побудови графіка залежності дотичного напруження від швидкості зсуву (зліва). Графік в'язкості (справа).

Значення в'язкості не є сталим, оскільки на нього впливає багато чинників. Предметом обговорення даного розділу є поведінка потоку при зсуві за постійної температури. Поведінка потоку може бути описана двома типами діаграм (рис. 5.1):

- Реологічні криві, побудовані в координатах дотичне напруження τ і швидкість зсуву γ̇, де, зазвичай, остання, нанесена на вісь x.
- Криві в'язкості, побудовані в координатах в'язкість η та швидкість зсуву γ̇ (або дотичним напруженням τ, де, зазвичай, остання, нанесена на вісь x. В'язкість для кожної точки вимірювання розраховується наступним чином: η = τ/γ̇

Ідеально в'язка поведінка потоку (або ньютонівська) означає, що вимірювана в'язкість не залежить від швидкості зсуву (рис. 5.2, крива 1). Типові матеріали з цієї групи: вода, мінеральні масла, силіконові масла, олія, розчинники, такі , як ацетон, а також еталони в'язкості (наприклад, масла, які використовуються для калібрування).

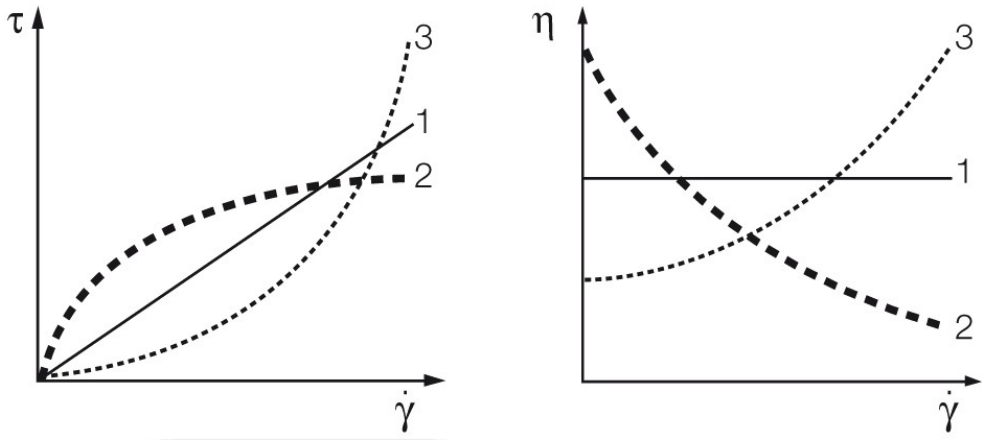


Рисунок 5.2 Реологічні криві (зліва) та криві в'язкості (справа), (1) ідеально в'язка рідина, (2) псевдопластична рідина, (3) дилатантна рідина.

Псевдопластична поведінка характеризується зменшенням в'язкості з підвищенням швидкості зсуву (рис. 5.2, крива 2). Типовими матеріалами, які демонструють цю поведінку, є лакофарбові покриття, клеї, шампуні, полімерні розчини та розплави. Оскільки в'язкість залежить від зсуву, про неї потрібно говорити, враховуючи зсувні умови. Приклад: $\eta_1$ ($\dot{\gamma}_1$) = 0,5 Па·с (при 10 $с^{-1}$) і $\eta_2$ ($\dot{\gamma}_2$) = 0,1 Па·с (при 100 $с^{-1}$).
Псевдопластична поведінка матеріалу пов'язана з внутрішньою структурою зразка.
Дилатантна поведінка зразка означає збільшення в'язкості з підвищенням швидкості зсуву (рис. 5.2, крива 3). Матеріали, які зазвичай демонструють таку поведінку, це- високонасичені дисперсії, такі як: керамічні суспензії, дисперсії крохмалю, пластизолеві пасти, в яких відсутня достатня кількість пластифікатора, стоматологічні композити, а також спеціальні композитні матеріали для захисного одягу.
Для оцінки поведінки речовини в діапазоні малих швидкостей зсуву корисно використовувати графіки реологічних кривих та кривих в'язкості у логарифмічному масштабі по обом осям. Перевага графіків у логарифмічному масштабі полягає в тому, що можна проілюструвати дуже великий діапазон значень (декілька порядків) на одному графіку . Найчастіше найбільші зміни в'язкості відбуваються лише в межах низької швидкості зсуву, що нижче $\dot{\gamma}$ = 1 $с^{-1}$, а на графіку в'язкості в нормальному масштабі цей діапазон може бути зображений лише в обмеженій мірі.

## Підходи до вимірювання в'язкої поведінки

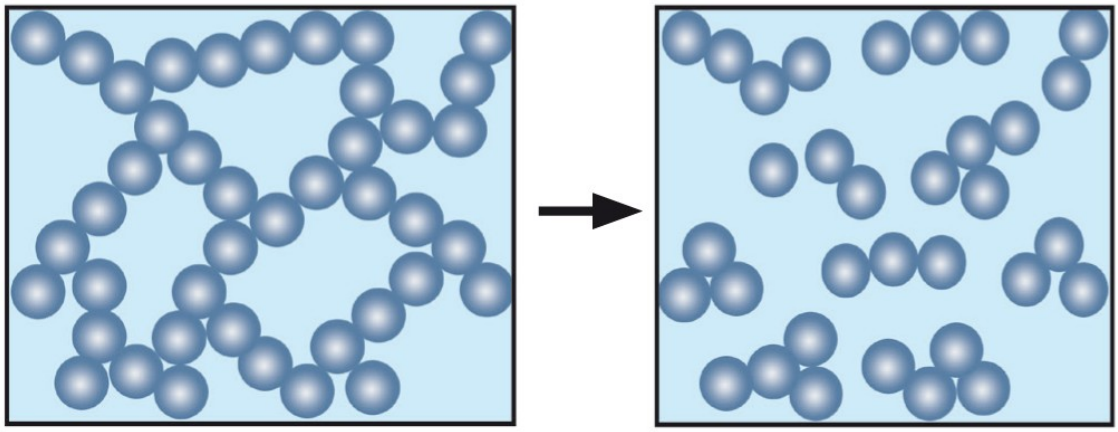

Рисунок 6.1. У стані спокою взаємодіючі сили між частками утворюють стабільну, тривимірну решітку. Матеріал знаходиться в твердому стані (лівий рисунок). Після того, як перевищується границя плинності, руйнуються міжмолекулярні зв'язки, і матеріал може почати текти (правий рисунок).

Границя плинності – це найнижче значення дотичного напруження, вище якого речовина буде поводитися як рідина, а нижче - вона буде поводитись як (іноді, як дуже м'яка) тверда речовина (відповідно до prEN ISO 3219-1). Границя плинності (границя текучості) - це мінімальна сила, яку потрібно прикласти для того, щоб зруйнувати внутрішню структуру зразка у стані спокою і завдяки цьому перевести його у рідкий стан.

Надструктуру зразка можна уявити як стійку тривимірну послідовну фізико-хімічну мережу сил, взаємодіючих між окремими компонентами зразка; наприклад: між частинками реологічної добавки в дисперсії (рис. 6.1).

Для того, щоб оцінити залежність поведінки потоку від часу, дотичне напруження залишається сталим. У тестових випробуваннях з декількома інтервалами вимірювання дотичне напруження залишається сталим на кожному окремому інтервалі. Щоб дослідити залежність поведінки потоку від часу, рекомендується провести покрокове дослідження, в нашому випадку - це ротаційний тест з трьома інтервалами. Зазвичай проводиться залежне від часу вимірювання з контрольованою швидкістю зсуву:

- Інтервал (1) Дуже низький ступінь зсуву для моделювання поведінки у спокої з попередньо встановленою швидкістю зсуву
- Інтервал (2). Сильний ступінь зсуву для імітації структурного руйнування зразка під час обробки з попередньо встановленою швидкістю зсуву, наприклад, при нанесенні фарби щіткою або обприскуванні
- Інтервал (3) Дуже низький ступінь зсуву для імітації структурної регенерації в стані спокою після застосування тієї самої попередньо встановленої швидкості зсуву, як і у першому інтервалі.

Приклад поведінки фарби перед, під час і після нанесення щіткою (Рисунок 6.2):

Рисунок 6.2. Вигляд графіка залежності швидкості зсуву для покрокового тесту з трьома інтервалами дослідження, проведеного для оцінки поведінки фарби при нанесенні щіткою: (1) стала низька швидкість зсуву, як в стані спокою, (2) стала висока швидкість зсуву, як при нанесенні фарби щіткою і (3) та сама швидкість зсуву, як на першому інтервалі, як під час відновлення структурної будови фарби після нанесення.

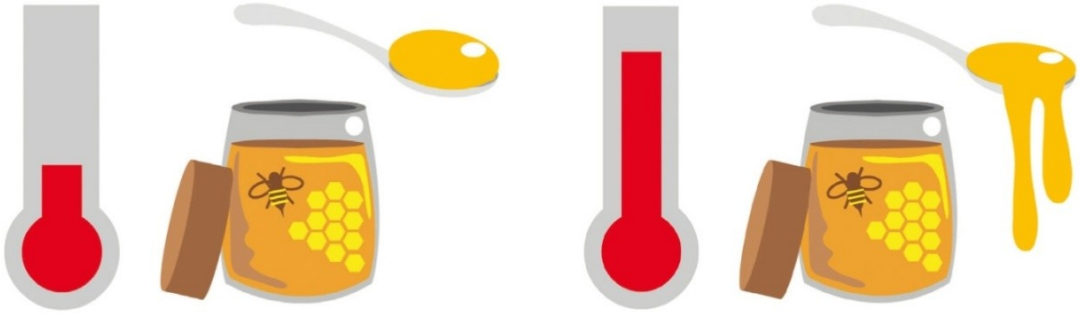

Рисунок 6.3. Типова зміна поведінки зразка в залежності від температури: мед стає м’якше і рідше, якщо його нагріти[1].

Багато матеріалів не показують структурного відновлення, але утворюють гелі або затвердівають за сталих зсувних умов.

Для оцінки температурної залежності поведінки потоку зсувне напруження зберігається сталим. Також часова залежність температури залишається заздалегідь заданою. Як результат, зазвичай аналізується функція температурної залежності в'язкості. Градієнт температури в камері, що оточує зразок, повинен бути якомога меншим. Для регулювання температури існують різні методи та пристрої.

Типові тести в цій галузі виконуються для дослідження температурної залежності поведінки зразка без хімічних модифікацій, наприклад: розм'якшення або плавлення зразків при нагріванні, затвердіння, кристалізація, або холодне гелеутворення при охолодженні (рис. 6.3). Інші загальні випробування досліджують температурну поведінку під час формування гелю або хімічного затвердіння.

# Осциляційний тест та в’язко-пружна поведінка

## В’язко-пружна поведінка

Багато матеріалів демонструють суміш в'язкої та пружної поведінки при зсуві (рис. 7.1). Це називається в'язко-пружною поведінкою. У наступному розділі розглядаються типові ефекти, викликані в'язко-пружною поведінкою, при цьому особлива увага приділяється пружній частині:

Рисунок 7.1. Чотири матеріали, які розташовано зліва направо: вода, як ідеально в'язка рідина, шампунь для волосся, як приклад в'язко-пружної рідини, а потім в'язко-пружна тверда речовина, наприклад, крем для рук, і Ейфелева вежа, як приклад ідеально пружного твердого об’єкта, який виконано з металу.

Часто пружна частина в'язко-пружної поведінки порівняно сильно виражена за наступних умов:

1. Швидші рухи, велика швидкість деформації або швидкість зсуву- більш висока частота коливань
2. Нижча температура - молекулярні зв’язки будуть менш гнучкими і жорсткішими. Чим швидше рух і/або вище температура, тим більш гнучкою і рухливою буде поведінка молекул. Саме тому часто неможливо визначити тільки в'язкість (з віскозиметром), оскільки в багатьох процесах можуть виникати яскраво виражені пружні ефекти. Ця суміш поведінки в'язкого потоку та поведінки пружної деформації відома як в'язко-пружна поведінка.

# Визначення таких понять: деформація зсуву або кутова деформація, модуль зсуву, закон Гука

Модель двох пластин використовується для визначення реологічних параметрів, необхідних для наукового опису деформації (рис. 8.1). Зразок піддають дотичному напруженню, затиснувши між двома пластинами, рухаючи верхню пластину, а нижня пластина залишається нерухомою.

**Дотичне напруження**

Визначення проводиться за формулою:

$\tau = F/A$ ,

$\tau$ - дотичне напруження (кажуть «тау»),

F сила зсуву [Н] (Ньютон) та

A - площа зсуву [$м^2$],

див. рис. 8.2. і 8.3. Одиниці вимірювання дотичного напруження – [$Н/м^2$] = [Па] (Паскаль).

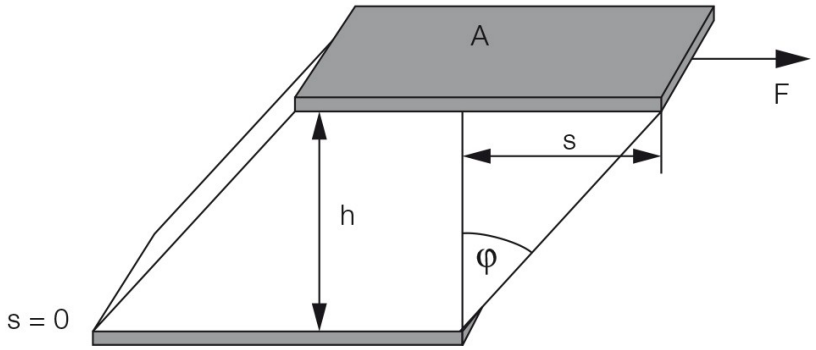


Рисунок 8.1. Модель двох пластин для зсувних тестів з площею зсуву A, відстаню між пластинами h, силою зсуву F, амплітудою відхилення s та кутом відхилення φ для розрахунку дотичного напруження та деформації зсуву або кутової деформації.

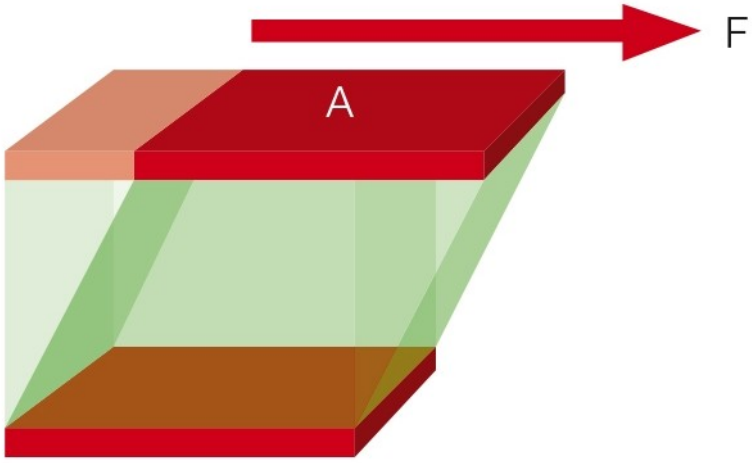


Рисунок 8.2. Модель двох пластин, використана для означення дотичного напруження, використовує такі величини, як сила зсуву F та площа A верхньої рухомої пластини.

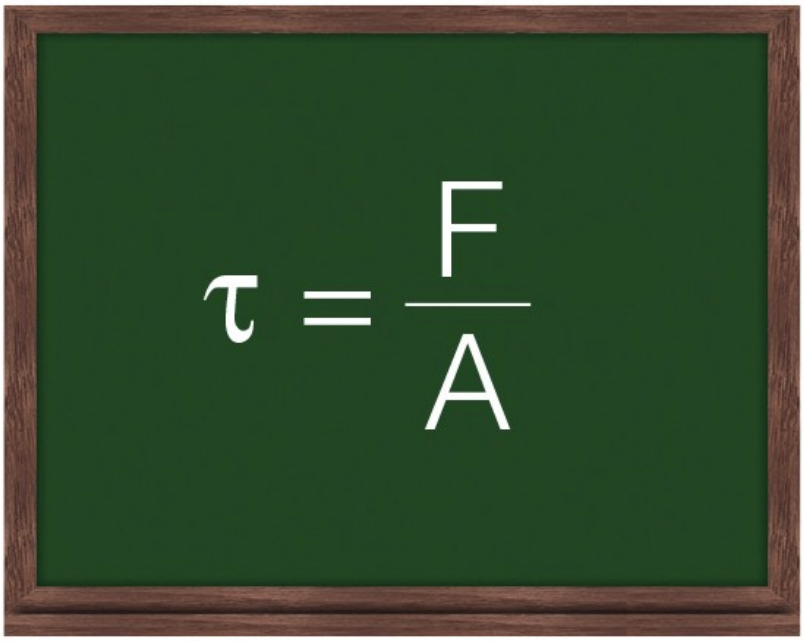


Рисунок 8.3. Дотичне напруження – це сила зсуву F поділена на площу зсуву A.

## Деформація зсуву або кутова деформація

Визначення проводиться за формулою:

$\gamma = s/h$ ,

де $\gamma$ – це деформація зсуву (кажуть «гамма»),

s - амплітуда відхилення [м] та

h - відстань між пластинами [м], див. рис. 8.4. Одиниці вимірювання деформації зсуву [м/м] = 1, це означає, що деформація зсуву безрозмірна величина. Зазвичай значення вказується у відсотках.

**Модуль зсуву G**

Визначення проводиться за формулою

$G = \tau/\gamma$ ,

де G – це модуль зсуву,

$\tau$ – дотичне напруження (одиниці вимірювання [Па]) та

$\gamma$ - деформація зсуву або ж кутова деформація (безрозмірна величина).

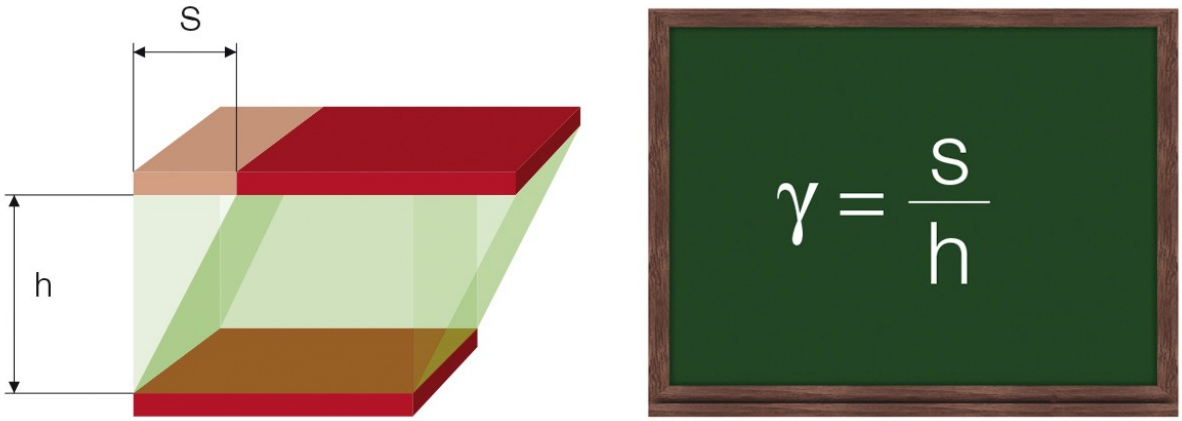


Рисунок 8.4. Модель двох пластин, яка використовується для означення деформації зсуву, за допомогою амплітуди відхилення s верхньої, рухомої пластини та відстані h між пластинами (лівий малюнок). Деформація зсуву $\gamma$ - це амплітуда відхилення s, поділена на відстань між пластинами h (правий малюнок).

Одиниці вимірювання модуля зсуву – Па (паскаль). Альтернативні одиниці вимірювання: 1 кПа (кілопаскаль) = 1000 Па, 1 МПа (мегапаскаль) = 1000 кПа = $10^6$ Па та 1 ГПа (гігапаскаль) = 1000 МПа = $10^6$ кПа = $10^9$ Па. Чим вище значення G, тим жорсткішим є матеріал. Закон пружності можна порівняти з законом Гука: F/s = C, де F - це сила, яка прикладається до пружини, амплітуда відхилення s і константа пружини C, яка описує жорсткість пружини.

## Підходи до вимірювання в'язкопружної поведінки

Модель двох пластин також може бути використана для опису осциляційних тестів (рис. 9.1). Зразок, затиснутий між двома пластинами, піддається зсуву, при цьому верхня пластина рухається, а нижня - залишається нерухомою. Стержень, який ,

прикріплено до ведучого колеса і рухає верхню плиту вперед і назад паралельно нижній плиті, доки колесо обертається. При постійній швидкості обертання модель працює на відповідній постійній коливальній частоті.

Амплітуда відхилення верхньої рухомої пластини вимірюється та реологічно оцінюється, як відхилення або деформація $\gamma$. При русі ведучого колеса будується графік залежності відхилення від часу. Графік має вигляд синусоїдальної кривої з амплітудою деформації $\gamma_A$ (рис. 9.2).

Графік, отриманий під час проведення осциляційного теста, зазвичай, має вигляд синусоїдальної кривої. Для моделі двох пластин, як описано вище, тест – це контрольований синусоїдальний деформаційний процес. Вигляд синусоїдальної кривої визначається амплітудою відхилення (максимальним відхиленням) і періодом коливання. Частота коливань є оберненою величиною до періоду коливань (рис. 9.3).

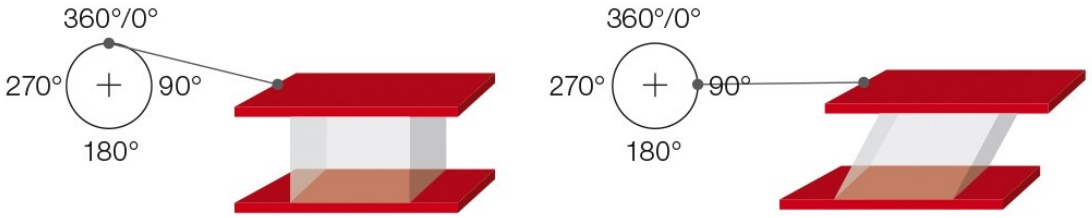


Рисунок 9.1. Осциляційний тест, проілюстрований за допомогою моделі двох пластин з колесом, яке веде, та стержнем для зсувних тестів. Показано відхилення верхньої пластини при кутах повороту колеса 0° /90° /180° /270° /360° [1].

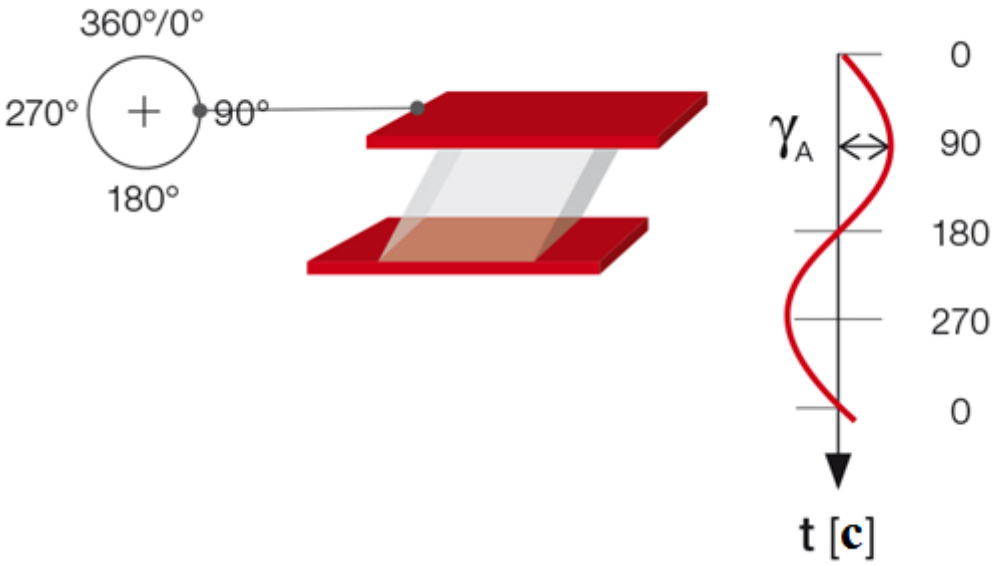


Рисунок 9.2. Осциляційний тест з використанням моделі двох пласти; на правому рисунку зображено графік залежності амплітуди відхилення $\gamma_A$, верхньої плити від часу. Синусоїда на осі часу, як результат вимірювання за час повного оберту колеса, яке веде.

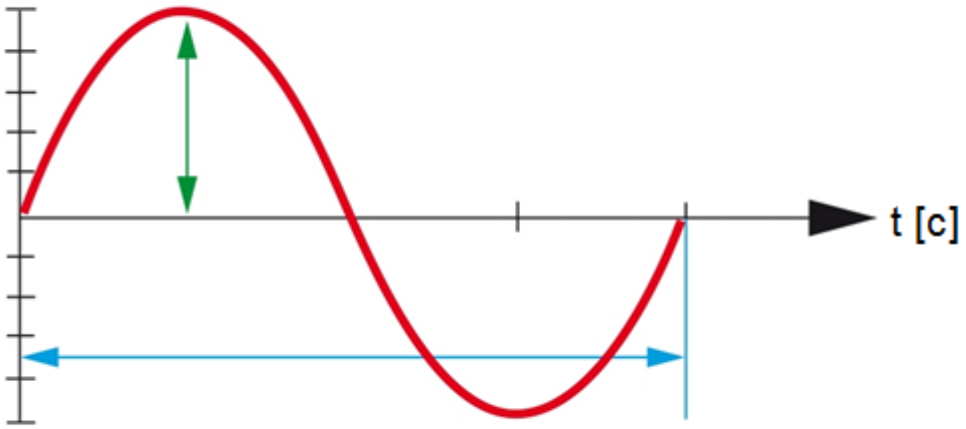


Рисунок 9.3. Синусоїда описується значенням амплітуди (максимальне відхилення) і періодом коливання або частотою коливання.

Крім того, вимірюється сила, яка діє на нижню стаціонарну пластину. Ця сила – це протидіюча сила, яка утримує нижню пластину нерухомою. Це значення сили реологічно оцінюється як дотичне напруження $\tau$. Якщо зразок не розтягується надто сильно, то отримують синусоїдальний графік залежності дотичного напруження від часу з амплітудою $\tau_A$. Обидві синусоїдальні криві, тобто попередньо встановлена, і крива, яка отримуєтсья, коливаються з тією ж частотою. Проте, якщо буде

встановлено занадто велике напруження, внутрішня структура зразка буде знищена, і отримана крива не буде мати вигляд синусоїди.

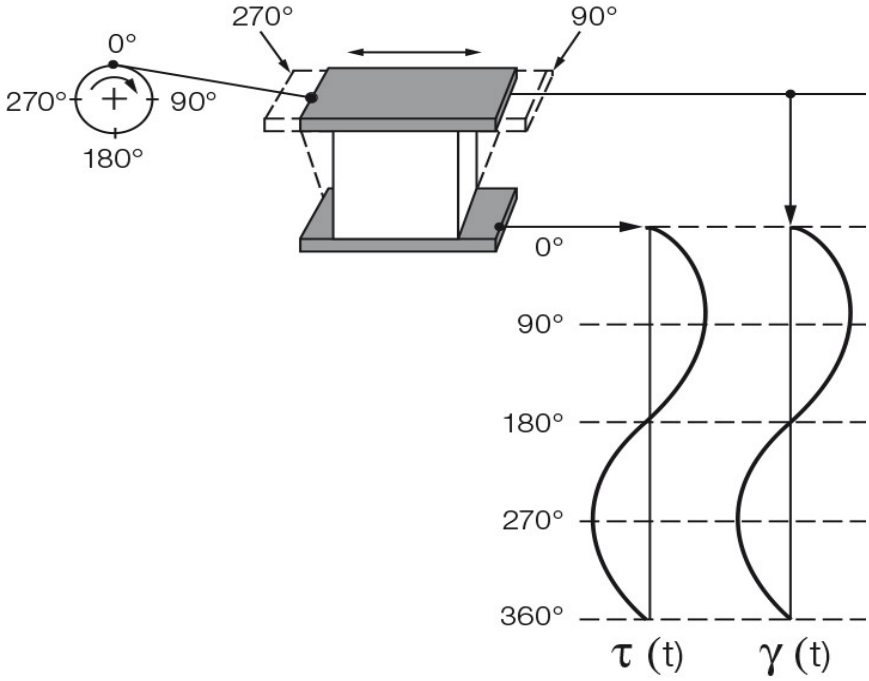


Рисунок 9.4. Осцилляційний тест з моделлю двох пластин для ідеально пружної поведінки. В данному випадку немає затримки між синусоїдами заданої деформації зсуву γ і результуючим дотичним напруженням τ.

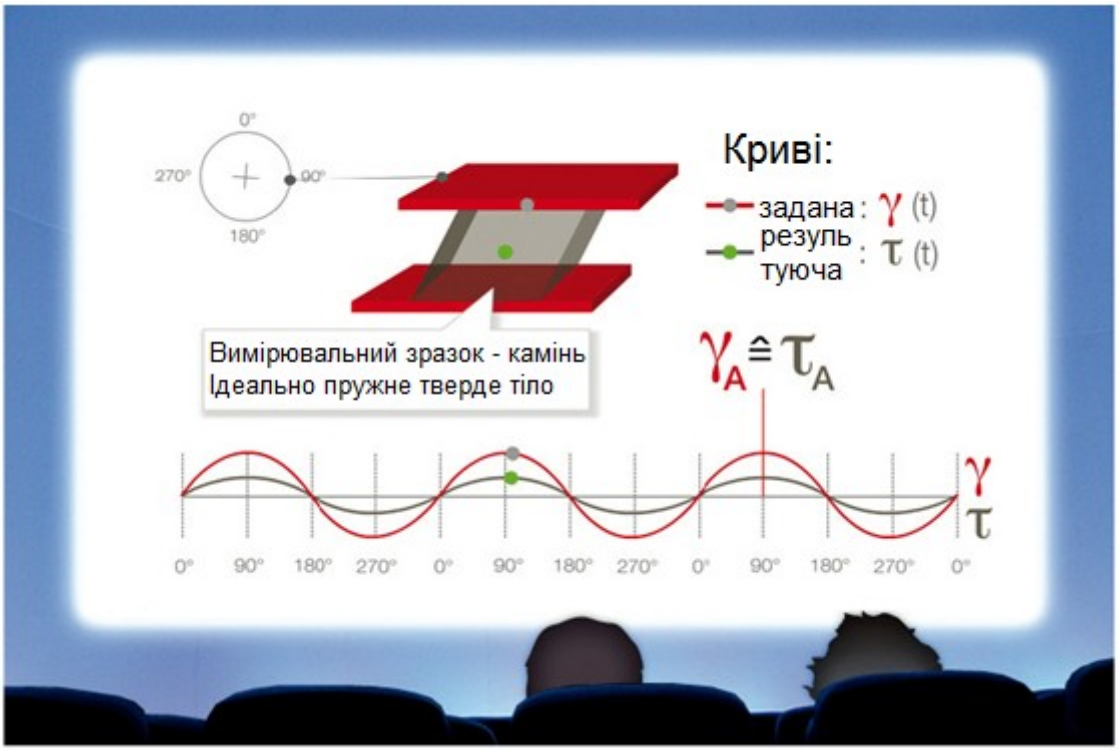


Рисунок 9.5. При ідеально пружній поведінці синусоїди деформації зсуву γ та дотичного напруження τ не мають зсуву фаз; це означає, що обидві криві перетинають вісь і досягають максимального значення в однакових місцях[1].

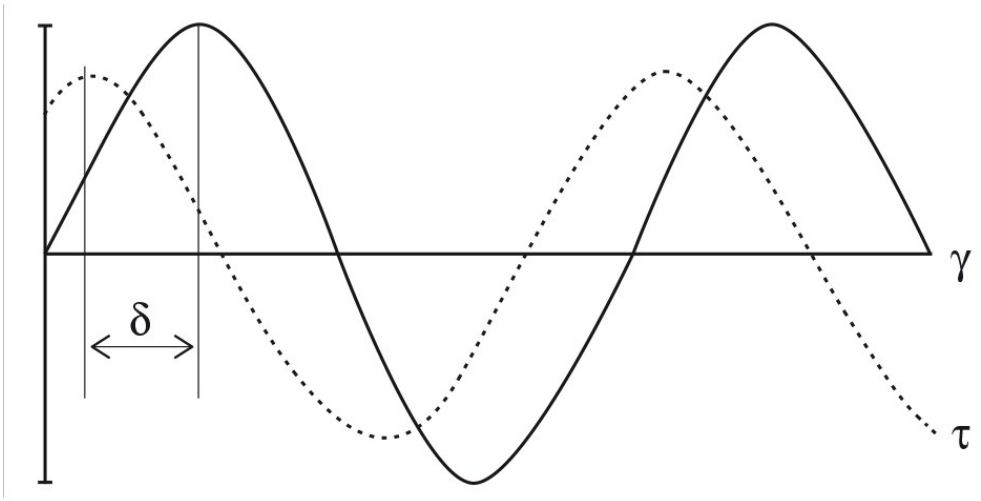


Рисунок 9.6. Осциляційний тест зі зразком, який має в’язкопружну поведінку, зображено у вигляді графіка синусоїди, яка залежить від часу: наприклад, із заданою деформацією зсуву $\gamma$ і результуючим графіком дотичного напруження $\tau$. Синусоїди мають різницю фаз $\delta$.

Для абсолютно жорсткого зразка, такого як сталь або камінь з ідеально в’язкою поведінкою, немає затримки часу між заданою і отриманою синусоїдами (рис. 9.4 та 9.5). Більшість зразків демонструють в'язкопружну поведінку. У такому випадку синусоїди заданої та результуючої фізичної величини показують відставання по часу. Ця затримка називається фазовим зсувом $\delta$ (кажуть «дельта», рис. 9.6 та 9.7). Він завжди знаходиться між 0 ° та 90 °.

Для рідкого стану справедливе наступне: зсув фази знаходиться між 45°- 90°, тобто $90° \geq \delta > 45°$. У цьому випадку матеріал в стані спокою є рідким. Для ідеально пружної поведінки деформація $\delta = 0°$ і для поведінки ідеально в'язкого потоку $\delta = 90°$ (рис. 9.8). Всі в'язкопружні матеріали мають сзув фаз $\delta$ між 0° і 90°.

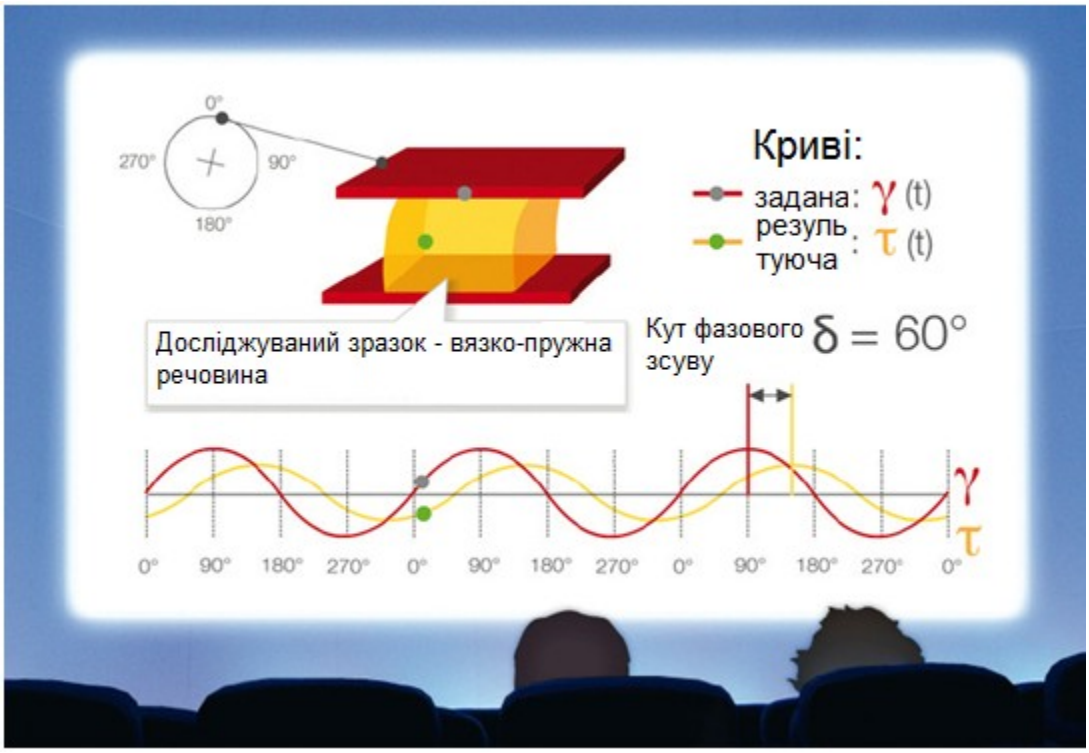


Рисунок 9.7. При в'язкопружній поведінці синусоїди деформації зсуву γ та дотичного напруження τ мають зсув фаз, що видно із затримки у часі між значеннями амплітуд[1].

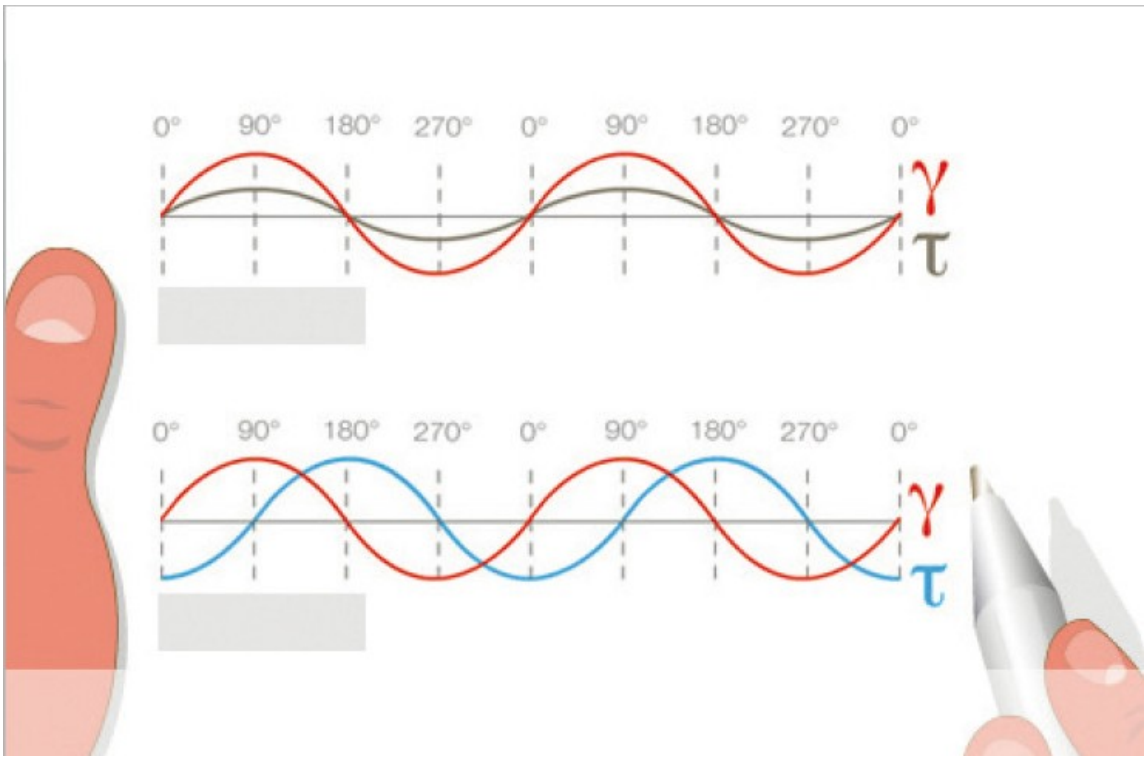


Рисунок 9.8. Пряме порівняння ідеально пружної поведінки (верхній рисунок) без зсуву фаз між заданою і результуючою кривою, та ідеально в'язкої поведінки (нижній рисунок) із зсувом фаз 90° між кривими.

У твердому і гелеподібному станах $\delta$ між 0° і 45°, тобто 45°> δ ≥ 0°. В таких випадках матеріал твердий у стані спокою, як наприклад пасти, гелі, крема, желе, пудинг, автомобільні шини.

## Комплексний модуль зсуву G*

Закон пружності для осциляційного зсувного тесту:

$G^* = \tau_A/\gamma_A$

Де G* це комплексний модуль зсуву (кажуть «же з зірочкою» одиниці вимірювання [Па]),

$\tau_A$ - амплітуда дотичного напруження (одиниці вимірювання [Па]) та

$\gamma_A$ -амплітуда деформації зсуву (безрозмірні одиниці вимірювання або %). G* говорить про в’язкопружну поведінку зразка і має назву комплексний модуль зсуву.

## Модуль пружності G' та модуль втрат G'' (модуль в’язкості)

Фазовий зсув $\delta$, який є затримкою в часі між заданою і результуючою синусоїдами, визначається в кожній точці вимірювання. Значення цього кута завжди лежить між 0° і 90°. Відкладемо цей кут від вектора G* (рис. 9.9). Вісь x проводиться з іншого кінця кута вправо, а вісь y проводиться перпендикулярно до осі x вгору. Частина значення G*, яка спроектована на вісь x, є пружною частиною в'язко-пружної поведінки, позначається як G', тоді як частина вектора G*, яка спроектована на вісь y, є в'язкою частиною – G''. Це означає, що повна векторна діаграма є представленням G* і $\delta$, або G' і G''(рис. 9.10).

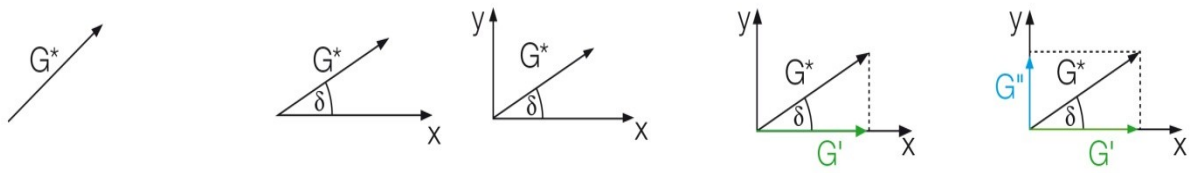


Рисунок 9.9. Побудова векторної діаграми в п'ять етапів за допомогою наступних параметрів: (1) Довжина вектора (значення) комплексного модуля зсуву G* , (2) кут фазового зсуву, що визначає положення осі x, (3) перпендикуляр до осі x – вісь y, поділ G* на складові: (4) G' – проекція на вісь x та (5) G'' – проекція на вісь y.

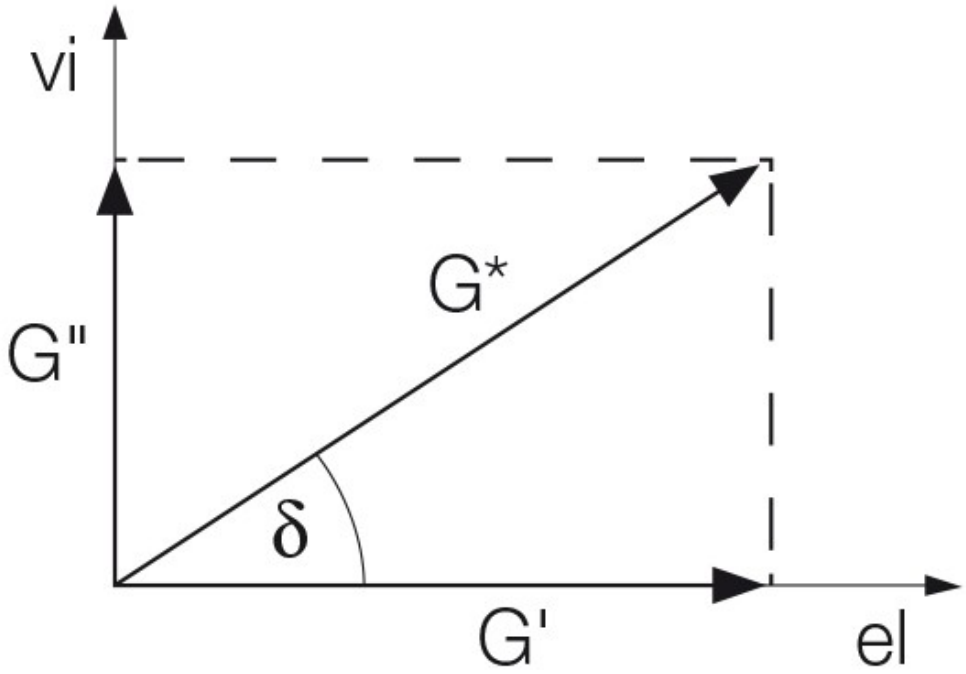


Рисунок 9.10. Векторна діаграма, яка ілюструє зв'язок між комплексним модулем зсуву G*, модулем пружності G' та модулем втрат G" з використанням кута фазового зсуву δ. Пружна частина в'язко-пружної поведінки проектуєтсья на вісь x, а в'язка частина на вісь y.

Модуль пружності G' (кажуть «же штрих», одиниці вимірювання [Па]) являє собою пружну частину в'язко-пружної поведінки, яка квазіописує «тверду» частину поведінки зразка. Модуль втрат G" (кажуть «же два штриха», одиниці вимірювання [Па]) характеризує в'язку частину в'язкопружної поведінки, яку можна розглядати як «рідку» частину поведінки зразка.

В'язка поведінка виникає через внутрішнє тертя між частинками і молекулами в рідині. Це тертя завжди пов’язане з нагріванням від тертя у зразку,тобто з перетворенням енергії деформації в теплову енергію. Ця частина енергії поглинається зразком, витрачається на внутрішні процеси тертя і більше не може бути використана зразком. Ця втрата енергії також називається дисипацією енергії.

Навпаки, пружна частина енергії зберігається в деформованому матеріалі, шляхом розширення та розтягування внутрішніх зв’язків без руйнування взаємодії між частинками та без надмірного розтягування або руйнування матеріалу.

Коли матеріал повертається до свого початкового стану, така невикористана енергія, що накопичилась, діє як рушійна сила для того, щоб повернути матеріалу до його початкової форми.

Модуль пружності G' говорить про накопичену енергію при деформації, а модуль втрат G" говорить про втрачену (десиповану) енергію деформації через внутрішнє тертя при течії. У в'язкопружних твердих речовин G' > G", тобто вони мають більший

модуль пружності , ніж модуль втрат. Це пов'язано з наявністю зв’язків всередині матеріалу, наприклад, хімічних зв’язків або фізико-хімічних взаємодій (рис. 9.11).

З іншого боку, у в'язкопружних рідин  G" > G', тобто вони мають більший модуль втрат, ніж модуль пружності. Причиною цього є те, що в більшості таких матеріалів немає таких міцних зв'язків між окремими молекулами (рис. 9.12).

Рисунок 9.11. Якщо подивитись через «лупу»: в’язко-пужні тверді речовини переважно складаються з молекул, зв’язаних хімічними або іншими сильними зв’язками.

Рисунок 9.12. Якщо подивитись через «лупу»: в’язко-пружні рідини зазвичай складаються з одиноких незв’язаних молекул, наприклад, таких як полімерні клубки.

## Коефіцієнт затухання або коефіцієнт втрат: tg δ = G''/G'

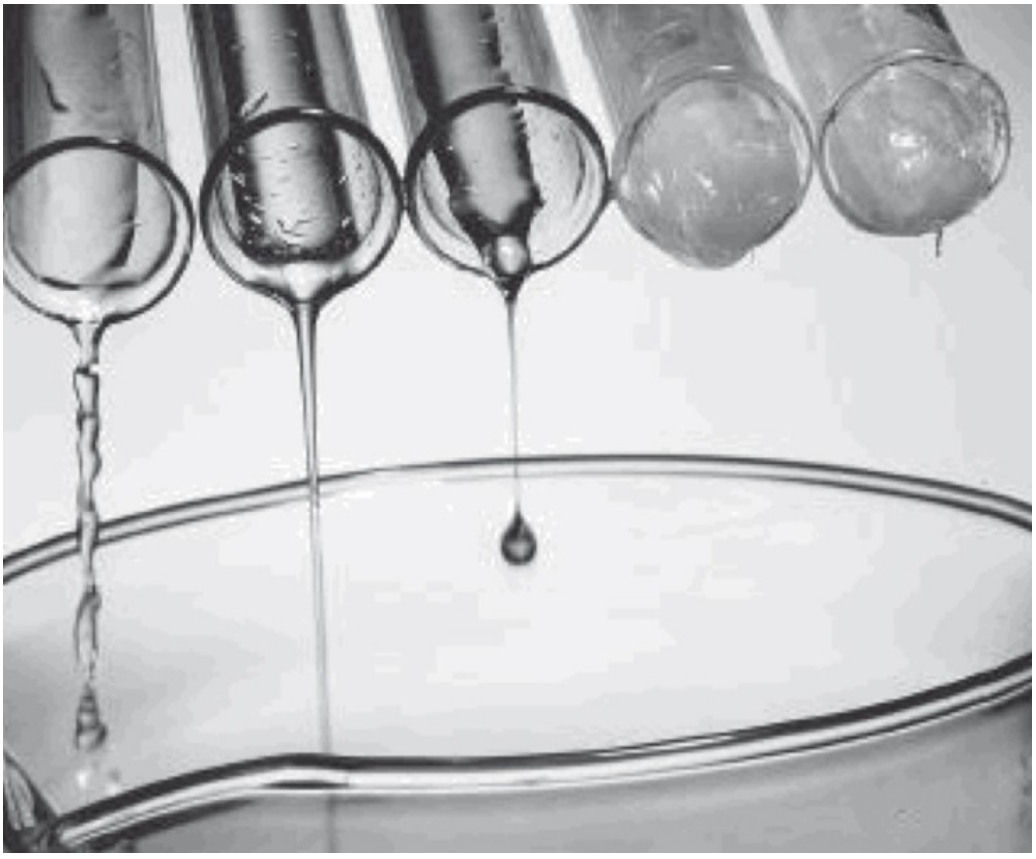

Рисунок 9.13. Демонстрація поведінки розчинів води зі збільшенням густини (зліва на право): ідеально в’язкий зразок, в’язко-пружна рідина, гель –золь перехід, в’язко-пружна тверда речовина (гелеподібна), ідеально пружна речовина.

δ (тангенс дельта) має безрозмірні одиниці вимірювання, або ж 1. Тангенс дельта говорить про відношення в’язкої та пружньої частин у в’язко-пружнійї поведінці зразка. Працюють два наступні твердження (розгляньте також векторну діаграму на рис. 9.10):

1. Для ідеально пружної поведінки δ = 0°. Тобто в’язка частина є відсутньою. Звідси слідує, що G'' = 0 і відповідно δ = G''/ G' = 0.
2. Для ідеально в’язкої поведінки δ = 90°. Тобто пружна частина є відсутньою. Звідси слідує, що G' = 0 і відповідно δ = G''/ G' буде прямувати до нескінченності через ділення на нуль.

На деяких діаграмах коефіцієнт затухання tg δ будується додатково до кривих G' і G'', зокрема, якщо в зразку відбувається фазовий перехід. Це також називають точкою переходу золь-гель або просто гель точка. Це означає, що характер зразка змінювався під час вимірювання з рідини або золь стану до твердого або гель стану, і навпаки. Як правило, у практичному застосуванні, рідину називають ідеально в'язкою,

якщо tg $\delta$ > 100 : 1 = 100, в той час як твердий матеріал називають ідеально пружним, якщо tg $\delta$ <1 : 100 = 0,01 .

Метод змінної амплітуди, як правило, використовується для опису поведінки деформації зразків в діапазоні деформації, в якому зразок не руйнується і при визначенні верхньої межі цього діапазону (рис 9.14). Часто цікаво описати поведінку, яка виникає при переході за верхню межу міцності зі збільшенням деформації, коли завдяки змінам у внутрішній структурі зразок стає м'якше, починає текти або кришиться.

Метод змінної частоти використовують для опису поведінки зразка в залежності від часу в діапазоні деформацій, у якому зразок не руйнуєтсья. Дослідження на високих частотах використовується для симуляції швидких рухів за короткий проміжок часу, в той час, як дослідження на низьких частотах проводиться для симуляції повільних рухів, розтягнутих у часі або у стані спокою. У методі змінної частоти (рис. 9.15), частота коливань збільшується або зменшується покроково від однієї точки вимірювання до іншої, зберігаючи постійну амплітуду.

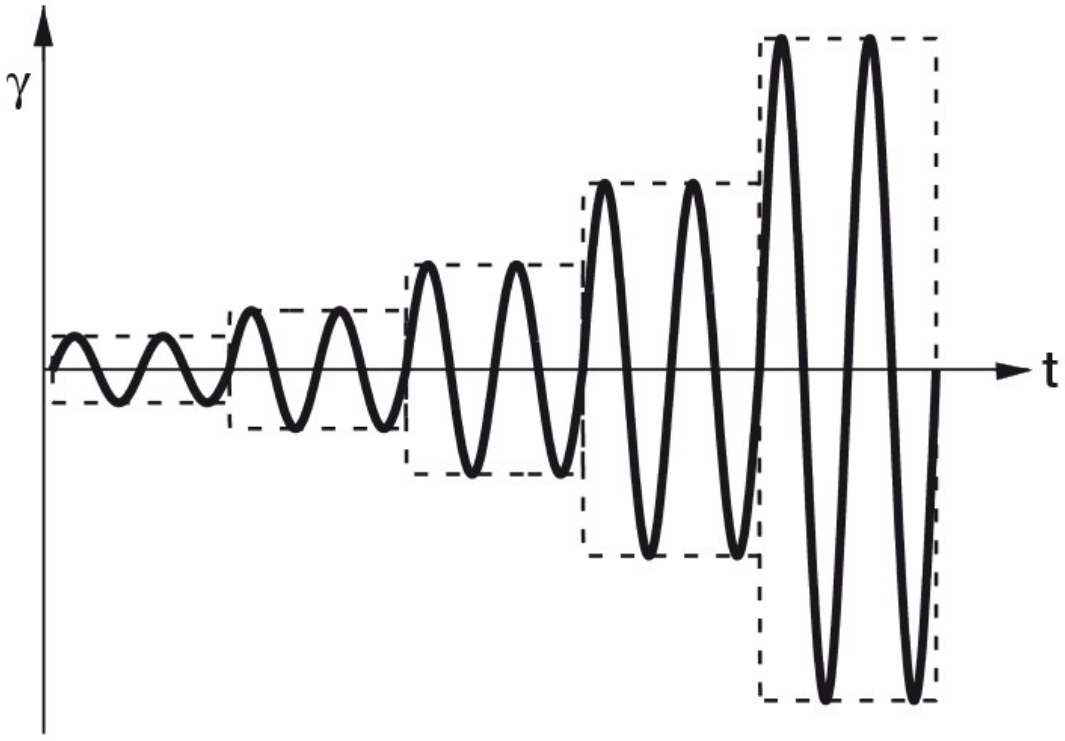


Рисунок 9.14. Постановка експерименту зі змінною амплітудою: амплітуда дотичної деформації зростає покроково п’ять разів. Частота коливання залишається незмінною на протязі всіх п’яти точок вимірювання.

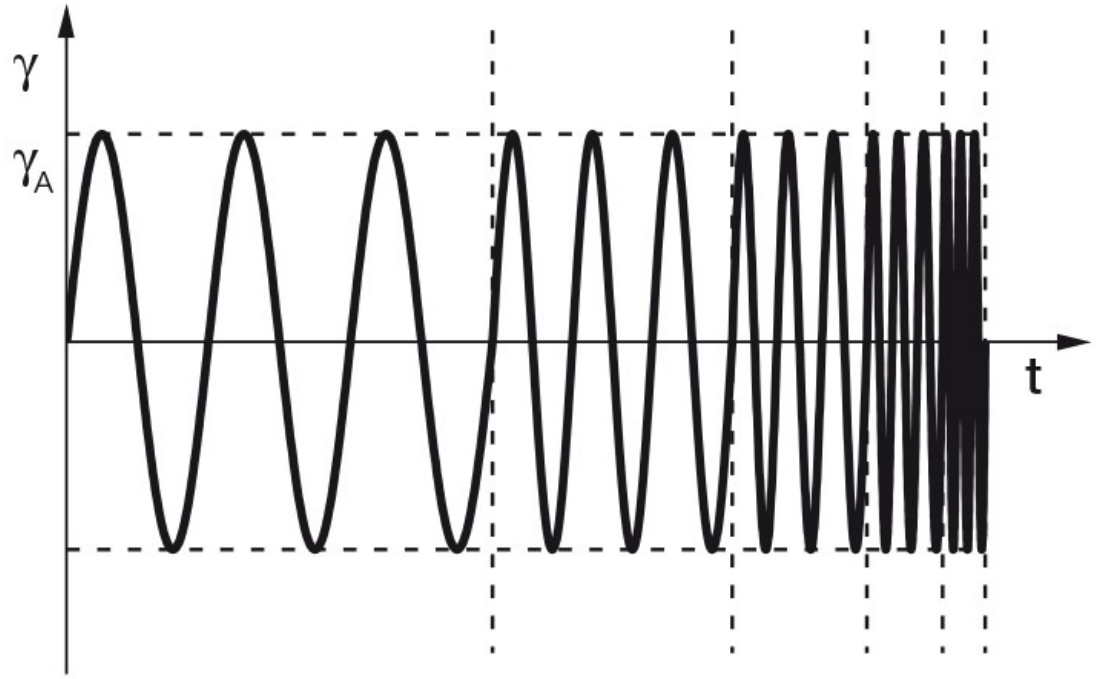


Рисунок 9.15. Постановка експерименту зі змінною частотою: амплітуда коливання змінюється покроково п’ять разів. Амплітуда деформації залишається $\gamma_A$ сталою на протязі всіх п’яти точок вимірювання.

Для оцінки в'язко-пружної поведінки, залежної від часу, осциляційний тест виконується при зсуві за постійних динамічно-механічних умов. Це означає, що і амплітуда, і частота залишаються сталими в кожній окремій точці вимірювання. Це також важливо при оцінці залежності в'язко-пружної поведінки від температури. Це означає, що лише температура змінюється. В результаті, як правило, аналізуються температурно-залежні функції G'і G".

# Підсумки

Рідини, які мають в’язку поведінку, та тверді речовини, які мають пружну поведінку, демонструють два крайніх випадки реологічної поведінки. Реологія вивчає в’язкі, в’язко-пружні , та пружні властивості матеріалів, та, як на них впливають різні чинники, такі як:

- зовнішні сили (дотичне напруження)
- деформація розтягом (деформація зсуву)
- швидкість розтягування (швидкість зсуву)
- час зсуву (у випадку тиксотропних речовин додатково враховують час релаксації)
- температура (наприклад від T = -150°C до T= +1600°C)

Попри це, існує багато інших чинників, які можуть вплинути на реологічну поведінку зразка. Існує велика кількість спеціальних вимірювальних інструментів і приладів. Інші чинники, які впливають на реологічну поведінку: тиск (наприклад надлишковий тиск, який перевищує 1000 Бар = 100 МПа), магнітне або електричне поля, ультрафіолетове випромінювання (УФ) з контрольованою інтенсивністю.

Додаткова інформація за темою може бути знайдена на сторінці dlu.com.ua та на сторінці виробника Anton Paar.

---

# Посилання та додаткова література

---


1. Anton Paar GmbH: e-learning course (on CD) – Basics of Rheometry, part 1: Rotation; part 2: Oscillation;Basics of Viscometry. Graz, 2010 (https://www.anton-paar.com/corp-en/elearning/)
2. The International System of Units (SI), Bureau International des Poids et Mesures, ISBN 92-822-2213-6, 2006 (8th edition)
3. Mezger, T.G.: Applied Rheology, 2017 (4th edition).
4. Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K.: An introduction to rheology. Elsevier, Amsterdam, 1989. Barnes, H.A.: A handbook of elementary rheology. Inst. of Non-Newt. Fluid Mechanics, Aberystwyth, 2000. Barnes, H.A.: Viscosity. INNFM, Aberystwyth, 2000
5. Macosko, C.W.: Rheology, principles, measurements, and applications. Wiley, New York, 1994.
6. Mezger, T.G.: Das Rheologie-Handbuch. Vincentz, Hannover, 2016 (5th edition); The Rheology-Handbook. Vincentz, Hanover, 2014 (4th edition)

a. ISO 2431: Paints and varnishes: Flow time by use of flow cups. 2011
b. ASTM D1200: Viscosity by Ford Viscosity Cup. 2010 (2014)
c. (DIN 53211) Paints, varnishes and similar coatings; flow time using the DIN flow cup. 1987 (1996 withdrawn, replaced by DIN EN ISO 2431)
d. ISO 12058: Plastics: Viscosity using a falling-ball viscometer; part 1: Inclined-tube method. 1997
e. DIN 53015: Viscosity using the rolling ball viscometer according to Höppler. 2001
f. ISO 3219: Plastics (polymers/resins in the liquid state or as emulsions or dispersions): Viscosity using a rotational viscometer with a defined shear rate. 1993
g. DIN 53019: Viscometry: Viscosities and flow curves using rotational viscometers – Part 1: Principles and measuring geometries. 2008


Данна стаття є перекладом на українську мову оригінальної статті:

https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/#rheology-and-viscous-behavior

Переклад виконаний співробітниками Донау ЛАБ УКРАЇНА http://dlu.com.ua - ексклюзивного дистриб'ютора продукції Anton Paar GmbH в Україні та Молдові