

УДК 531.7

PACS 62.20.-x, 62.40. + Я, 07.05.Hd

DOI: <https://doi.org/10.24144/2415-8038.2016.39.134-144>

А.А. Горват, В.В. Мінькович, Є.І. Самусь

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: ahorvat@mail.ru

ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДИХ ТІЛ НА ІНФРАНИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ

Описано автоматизовану установку, яка дозволяє досліджувати модуль зсуву та інфранизкочастотне внутрішнє тертя (ВТ) з використанням оберненого крутильного маятника в режимі вільнозгасаючих або вимушених коливань на частотах 10^{-3} – 20 Гц в інтервалі відносної деформації 10^{-6} – 10^{-2} та діапазоні температур 100– 600 К.

Ключові слова: модуль зсуву, внутрішнє тертя, обернений крутильний маятник, відносна деформація.

Вступ

При розробці нових матеріалів особлива увага приділяється надійному, оперативному і дешевому дослідженню їх властивостей. Велику цінність мають такі методи і обладнання, які з одного боку дають можливість з високою точністю виміряти найбільш важливі параметри, а з іншого є вагомим інструментом для вивчення структурних перетворень та фізико-хімічних процесів. Маючи подібну експериментальну техніку і обладнання можна розв'язувати різнотипні задачі з оптимізації складу, технології виготовлення, а також наперед прогнозувати властивості матеріалів для потреб сучасної техніки.

Важливими для більшості матеріалів є їх механічні параметри. Досить часто необхідно мати дані про модулі пружності в широкому інтервалі температур [1, 2].

Найбільш якісними показниками механічних властивостей є компоненти комплексних модулів Юнга E^* та зсуву G^* , модуль Пуассона μ та тангенс кута механічних втрат $tg\delta$. Існують дві групи методів вимірювання цих характеристик – статистичні та динамічні. Використання динамічних методів, на відміну від статистичних, не призводить до руйнування зразків або зміни структури досліджуваних матеріалів, оскільки вимірювання проводяться при малих

напруженнях і деформаціях, тобто в області лінійної в'язкопружності. Так як в процесі вимірювання зразок не руйнується, то можна проводити вимірювання на одному і тому зразку в широкому інтервалі температур. Проведення таких вимірювань дозволяє одержати не тільки абсолютне значення динамічних механічних модулів матеріалів, а також виявити сукупність релаксаційних процесів у досліджуваному матеріалі в широкій області температур. Група методів дослідження, в якому в широкому інтервалі температур або діапазоні частот вимірюються тангенс кута механічних втрат $tg\delta$ і компоненти яких-небудь комплексних модулів пружності (наприклад, модуля Юнга E^* або модуля зсуву G^*) при дії на досліджуваний зразок періодичного механічного напруження, називаються методами динамічного механічного аналізу (ДМА) подібно до, наприклад, диференціально-термічного аналізу (ДТА).

Опис експериментальної установки

Існує ряд різних методів дослідження механічних властивостей матеріалів за допомогою ДМА, одним з яких є метод крутильних коливань. Цей метод відомий вже понад 100 років, однак і сьогодні привертає увагу розробників апаратури для реологічних досліджень [3, 4] і

дозволяє вимірювати складові комплексного модуля зсуву а також внутрішню тертя, що характеризується тангенсом кута втрат і добротністю. У найбільш досконалих пристроях цього типу використовується обернений крутильний маятник [5,10], у якому інерційна частина розташована на тонкому підвісі (торсіоні) над досліджуваним зразком і врівноважується противагою, або підвішується між нерухомими опорами на торсіонах [6].

Слід зауважити, що вимірювання цих характеристик є досить складною задачею для дослідників, так як найкраща вимірювальна техніка досить дорога, а можливості навіть дороговартісного обладнання не завжди забезпечують потреби замовників. Тому розробка і вдосконалення методів дослідження реологічних характеристик є актуальною проблемою.

З урахуванням наведених вище факторів для дослідження широкої області матеріалів та розв'язання різних фізичних задач створено автоматизовану вимірювальну установку, засновану на використанні вільнозгасаючих або вимушених коливань оберненого крутильного маятника, зовнішній вигляд та узагальнена схема якої приведена на рис. 1, а спрощена блок-схема на рис. 2.

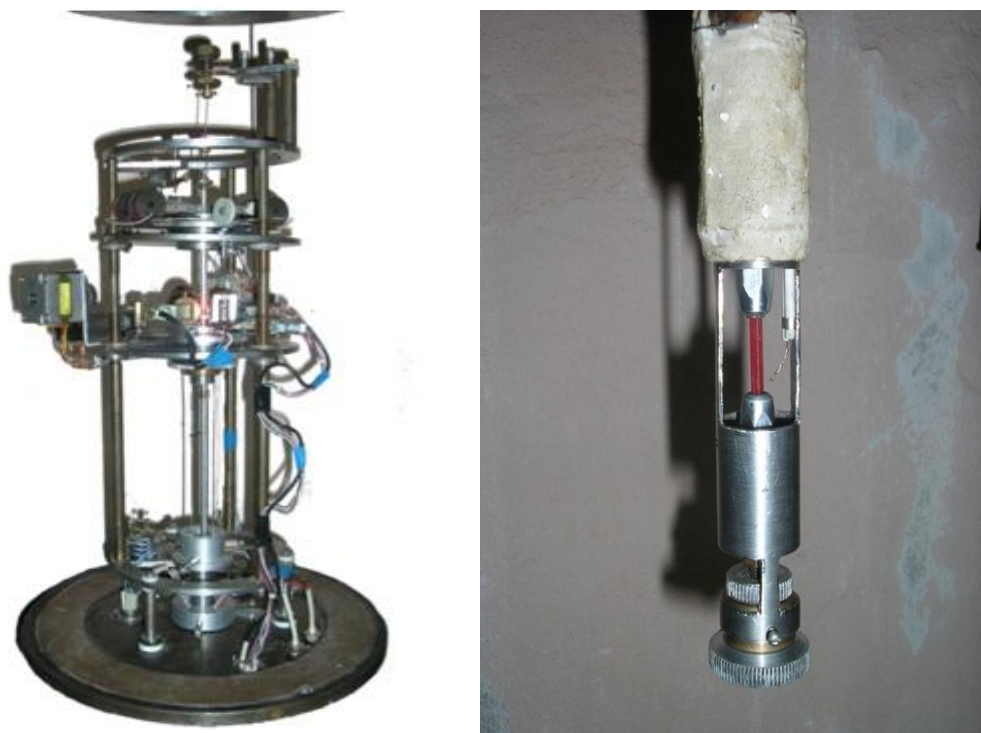
Маятник зібраний на платформі, яка закріплена на металевих швелерах, вмонтованих у масивну стіну, що сприяє зменшенню впливу зовнішніх вібрацій. Маятникова система скручування, яка складається зі сталевого стержня Е з легким титановим коромислом І, підвішена на тонкій сталевій нитці (підвісі) до противаги J, що дозволяє розвантажити зразок і в процесі вимірювань працювати практично без статичного механічного навантаження, прикладеного до зразка. Момент інерції маятникової системи можна змінювати з допомогою додаткових вантажів-насадок різної маси, закріплених на коромислі, і таким чином варіювати частоту власних коливань маятника від 5 до 20 Гц.

Для створення моменту кручення використовується електромагнітна система спеціальної конструкції, яка складається з

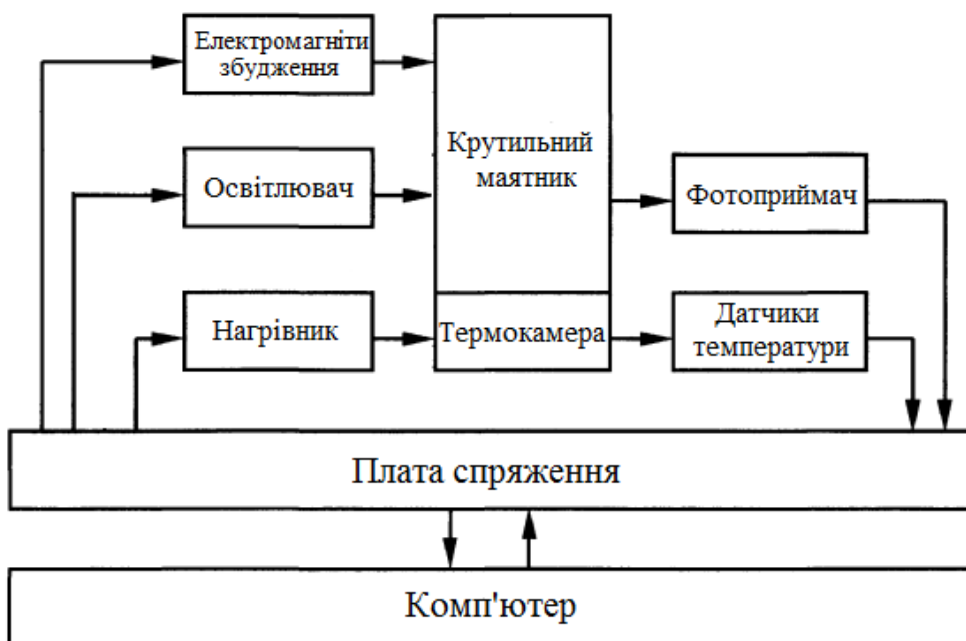
постійних магнітів, закріплених на коромислі, та двох котушок Гельмгольца Н, розташованих діаметрально протилежно відносно осі маятника. Лінійна залежність між моментом кручення та вихідною напругою функціонального генератора сигналів спеціальної форми F забезпечується перетворювачем "напруга-струм" T.

Деформація, яка виникає у зразку, визначається за допомогою фотоелектричного датчика, який складається із освітлювача L (напівпровідникового лазера) та диференціального фотодіода P. Механічні переміщення крутильного маятника з допомогою цієї системи перетворюються в електричну напругу, пропорційну куту закручування, і через підсилювач S подаються на пристрій вводу-виводу Ю, який приєднаний до персонального комп'ютера. Досліджуваний зразок А у вигляді круглого або квадратного бруска розмірами діаметром (сторонаю) 2 і довжиною 20 мм закріплюється в цангових затискачах D, один з яких є нерухомих, а інший жорстко з'єднаний з маятниковою системою скручування. Зразок А оточує термостат С, температура якого регулюється нагрівником В до 600 К. Термостат оточений кожухом, який може охолоджуватись рідким азотом або його парами. Електронний блок регулятора температури побудований на основі промислового ПІД-регулятора МС-2438. Він забезпечує лінійну зміну температури зразка із заданою швидкістю (від 0,5 до 4 К/хв) в інтервалі 100-600 К та її стабілізацію.

Контроль, регулювання та стабілізація температури здійснюється з похибкою не більше $\pm 0,1$ К програмним чином з допомогою платинового терморезистора, або термопари, сигнали із яких після попереднього підсилення теж подаються на пристрій вводу виводу Ю. Вся маятникова система поміщена закриту камеру, яка через кран G під'єднується до вакуумного насосу, що дозволяє проводити вимірювання при залишковому тиску повітря $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ Па, або використовувати інше контрольоване газове середовище.



а.



б.

Рис.1. Зовнішній вигляд (а) та узагальнена схема (б) установки.

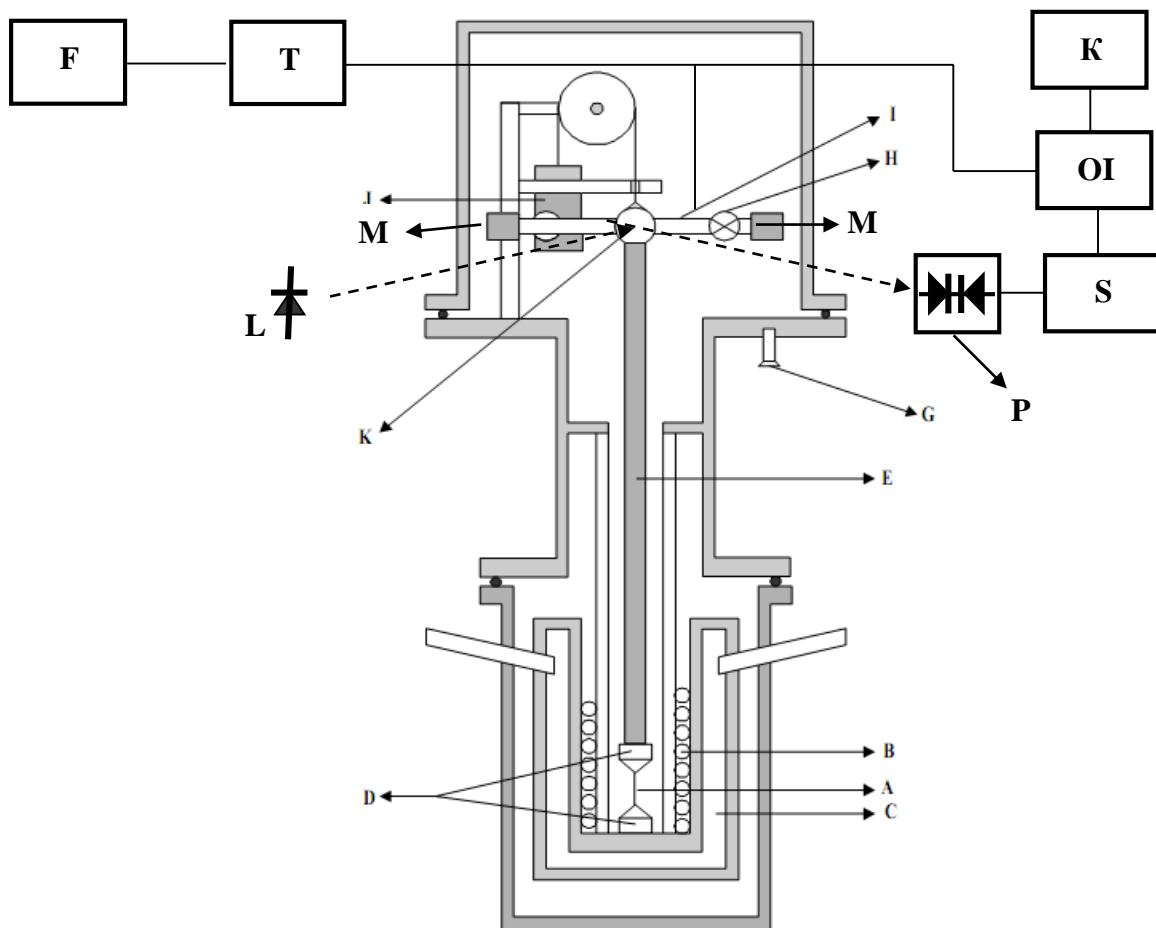


Рис. 2. Блок-схема установки для вимірювання внутрішнього тертя та модуля зсуву.

Описана установка дозволяє в діапазоні температур від 77 до 600 К, механічних напружень – від 0 до 10^7 Па та амплітуд відносної деформації кручення – від 10^{-6} до 10^{-1} проводити такі види вимірювань:

- у режимі статичних навантажень – дослідження релаксації деформації $\varepsilon(t)$ при $\sigma = \text{const}$, або механічного напруження $\sigma(t)$ при $\varepsilon = \text{const}$, отримання термомеханічних кривих твердих тіл $\varepsilon(T)$ при $\sigma = \text{const}$,
- у режимі власних вільнозгасаючих коливань – визначення температурно-частотних залежностей внутрішнього тертя $Q^{-1} = \text{tg}\delta$ та модуля зсуву G в діапазоні частот 1 – 20 Гц,
- в режимі вимушених інфранизько-частотних коливань ($f = 10^{-4}$ – 10^{-1} Гц) – запис петель механічного гістерезису з послідовним визначенням квазістатичного модуля зсуву,
- вимірювання в комбінованих режимах, тобто запис петель механічного гістерезису

або вільнозгасаючих коливань статично навантаженого зразка.

Методика розрахунку механічних параметрів

Вільні загасаючі коливання оберненого крутильного маятника описуються рівнянням

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + D_k^* \varphi = 0 \quad (1)$$

де φ - кут відхилення маятника від положення рівноваги; I - момент інерції коливальної системи; D_k^* - комплексна жорсткість комбінованої коливної системи зразок-підвіска. Комплексна жорсткість такої системи рівна сумі комплексних жорсткостей зразка D_1^* і підвіски D_2^* :

$$\begin{aligned} D_k^* &= D_1^* + D_2^* = (D_1' + D_2') + i(D_1'' + D_2'') = \\ &= (D_k' + iD_k'') \end{aligned} \quad (2)$$

Підставивши в диференціальне рівняння загасаючих коливань (1) розв'язок у вигляді

$$\varphi = \varphi_0 [\exp(-\alpha_k t)] \sin \omega t \quad (3)$$

можна визначити дійсну і уявну частини комплексної жорсткості коливної системи, а також тангенс кута механічних втрат:

$$D_k' = I(\omega_k^2 - \alpha_k^2) \quad (4)$$

$$D_k'' = 2I\alpha_k\omega_k \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\alpha_k\omega_k}{\omega_k^2 - \alpha_k^2}. \quad (6)$$

Тут ω_k -циклічна власна частота коливань комбінованої системи, а α_k – її коефіцієнти загасання.

Для знаходження комплексної жорсткості зразка D_1^* представимо, що в комбінованій коливній системі зразок відсутній. Тоді повертаючий момент сил визначається тільки пружністю підвіски і рівняння коливань набуває вигляду:

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + D_2^* \varphi = 0 \quad (7)$$

За аналогією з попереднім розглядом складові комплексної пружності підвіски матимуть вигляд:

$$D_2' = I(\omega_0^2 - \alpha_0^2) \quad (9)$$

$$D_2'' = 2I\alpha_0\omega_0 \quad (10)$$

де ω_0 циклічна частота, а α_0 -коефіцієнт загасання системи без зразка.

Звідси знаходимо співвідношення для дійсної і уявної частини комплексної жорсткості зразка

$$D_1' = D_k' - D_2' = I(\omega_k^2 - \omega_0^2 - \alpha_k^2 + \alpha_0^2) \quad (11)$$

$$D_1'' = D_k'' - D_2'' = 2I(\alpha_k\omega_k - \alpha_0\omega_0) \quad (12)$$

Величини α_0 і ω_0 є власними незмінними параметрами коливної системи при даному моменті інерції.

Для призматичних зразків жорсткість $D_1 = M/\varphi$, де M – обертальний момент прикладений до одного з кінців стержня (інший кінець зазвичай жорстко закріплений), φ – кут повороту одного поперечного перерізу стержня відносно іншого, l – відстань між цими перерізами або робоча довжина зразка, $\theta = \varphi/l$ – відносний кут закручування. З вимірних значень жорсткості та геометричних розмірів зразка в подальшому може бути розрахований модуль зсуву G матеріалу. Зокрема, для круглого стержня діаметром d крутильна жорсткість зв'язана з модулем зсуву простим співвідношенням $D_1 = \pi d^4 G / 32l$ [7].

У випадку зразка прямокутного поперечного перерізу $D_1 = G/F_g$, де F_g – форм-фактор, який залежить від товщини h та ширини b зразка

$$F_g = \frac{3l}{bh^3 \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{h}{b} \cdot K(b, h) \right)}.$$

Тут

$$K(b, h) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \cdot \operatorname{th} \frac{(2n+1)\pi b}{2h} \approx \sum_{n=0}^2 \frac{1}{(2n+1)^5} \cdot \operatorname{th} \frac{(2n+1)\pi b}{2h}.$$

Як показує аналіз останнього виразу для зразків квадратного перерізу із стороною a можна скористатись наближеним виразом $D = Ga^4/6l$ [7].

Враховуючи зв'язок (2.4) між D_1^* і G_1^* , отримаємо шукане співвідношення для складових комплексного модуля зсуву і тангенса механічних втрат:

$$G_1' = F_g D_1' = F_g I(\omega_k^2 - \omega_0^2 - \alpha_k^2 + \alpha_0^2), \quad (13)$$

$$G_1'' = F_g D_1'' = 2F_g I(\alpha_k\omega_k - \alpha_0\omega_0), \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G_1''}{G_1'} = \frac{2(\alpha_k\omega_k - \alpha_0\omega_0)}{\omega_k^2 - \omega_0^2 - \alpha_k^2 + \alpha_0^2}. \quad (15)$$

Таким чином, для визначення складових комплексного модуля зсуву матеріалу необхідно виміряти циклічну частоту і коефіцієнт затухання системи торсіон-зразок.

У випадку вимушених коливань у рівнянні коливань (1) необхідно врахувати зовнішній обертальний момент сил $M=M_0\sin\omega t$:

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D_k^*\varphi = M_0 \sin \omega t, \quad (16)$$

Загальний розв'язок рівняння (16) громіздкий і, звичайно, залежить від початкових умов. Характер коливань маятника, що описується рівнянням (16) зрозумілий: під дією вимушуючого моменту сил виникнуть коливання, амплітуда яких буде зростати. Цей перехідний режим досить складний і залежить від початкових умов. Однак з плином часу коливний режим встановиться, амплітуда коливань перестане змінюватись. Саме такий стаціонарний режим коливань у багатьох випадках представляє основний інтерес. Нехтуючи розглядом переходу системи до стаціонарного режиму коливань, сконцентруємо увагу на описі та вивченні цього режиму. При такій постановці задачі нема необхідності задавати початкові умови, так як стаціонарний режим від них не залежить, його характеристики повністю визначаються самим рівнянням (16). (Аналогічна ситуація виникає при русі тіла в рідині під дією постійної зовнішньої сили та сили в'язкого тертя.) В цьому випадку

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t - \delta), \quad (17)$$

де

$$\varphi_0 = \frac{M_0}{I[(\omega_k^2 - \omega^2)^2 - 4\alpha_k^2 \omega^2]^{1/2}} \quad (18 \text{ a})$$

та

$$\text{tg } \delta = \frac{2\alpha_k \omega}{\omega_k^2 - \omega^2} \quad (18 \text{ б})$$

Один із поширених методів вимірювання внутрішнього тертя передбачає побудову резонансної кривої, тобто залежності амплітуди коливань від частоти зовнішньої сили. У цьому випадку величину внутрішнього тертя розраховують за формулою:

$$\text{tg } \delta = \frac{\omega_+ - \omega_-}{\sqrt{3}\omega_p} \quad (19)$$

де $\omega_p = (\omega_k^2 - 2\alpha_k^2)^{1/2}$, ω_+ , ω_- – циклічні частоти, що відповідають максимуму

амплітуди коливань, а також амплітудам, які дорівнюють половині максимальної праворуч та ліворуч від максимуму.

У разі слабкого згасання (величина внутрішнього тертя менше, ніж приблизно 0,001) похибка методу резонансної кривої стає непринятно великою. Тоді використовують інші методи визначення внутрішнього тертя. Згідно з одним із них, його величину розраховують за формулою:

$$\text{tg } \delta = \frac{\ln(\varphi_1 / \varphi_n)}{\pi}, \quad (20)$$

де φ_1 та φ_n – відповідно, амплітуди першого та n-го коливань. Похибка такого методу, навпаки, зростає із зростанням величини внутрішнього тертя. Тому розглянуті два методи доповнюють один одного.

Автоматизація вимірювань

Для автоматизації вимірювань нами використано програмне середовище LabVIEW від National Instruments [8,9], яке є найбільш поширеною в світі системою графічного програмування для збору і обробки даних. LabVIEW дозволяє інженерам і вченим швидко розробляти власні проекти за допомогою додаткових спеціалізованих бібліотек. До того ж практично кожен виробник техніки для збору та обробки даних передбачає наявність відповідних драйверів до LabVIEW. Таким чином LabVIEW є високоефективним середовищем графічного програмування, в якій можна створювати гнучкі додатки вимірювань, управління та тестування з мінімальними часовими і фінансовими затратами.

Крім вищезгаданих переваг LabVIEW поєднує в собі гнучкість традиційної мови програмування з інтерактивною технологією віртуальних приладів (ВП). Інтуїтивно зрозумілий процес графічного програмування дозволяє приділяти більше уваги вирішенню проблем, пов'язаних з вимірюваннями і управлінням, а не програмуванням. LabVIEW пропонує:
- інтуїтивно зрозумілий процес графічного створення додатків для вимірювань, управління та тестування;
- повноцінну мову програмування;

- вбудовані засоби для збору даних, управління приладами, обробки результатів, генерації звітів, передачі даних та ін.;
- сумісність з різноманітними приладами завдяки наявності великої кількості драйверів і можливості генерації коду інтерактивним майстром;
- шаблони додатків, тисячі прикладів;
- високу швидкість виконання компільованих програм.

Саме з урахуванням перерахованих факторів графічне середовище програмування LabVIEW було обране для вирішення завдання автоматизації процесу

вимірювання температурно-частотних залежностей внутрішнього тертя і модуля зсуву твердих тіл.

На рис. 3. наведена спрощена блок-схема алгоритму програми. Дані від всіх датчиків надходять в аналого-цифровий перетворювач сигналів, після цього перетворювач сигналів, по USB інтерфейсу, передає дані в ПК, відбувається їх відображення на екрані ПК в режимі реального часу і збереження на жорсткому диску. На рис. 4 представлено тіло програми, на графічній мові програмування.

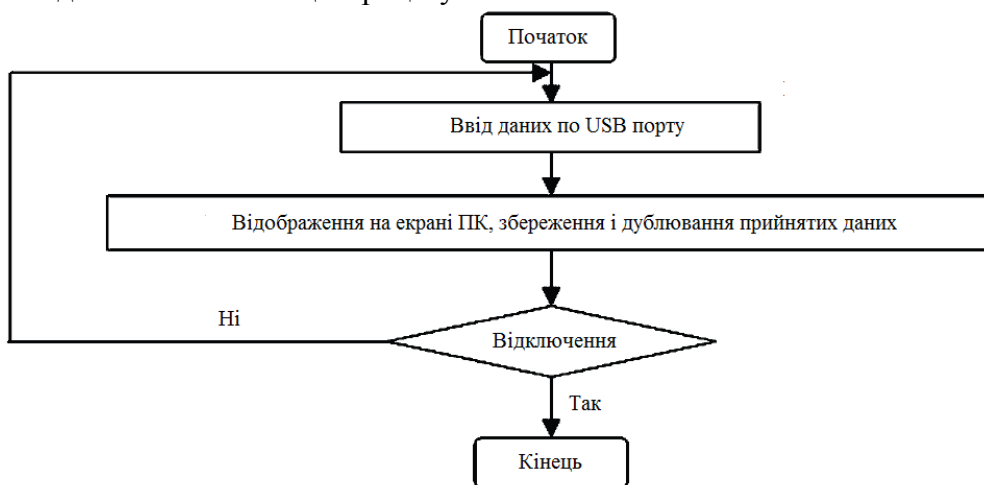


Рис. 3. Блок-схема алгоритму програми автоматизації вимірювань.

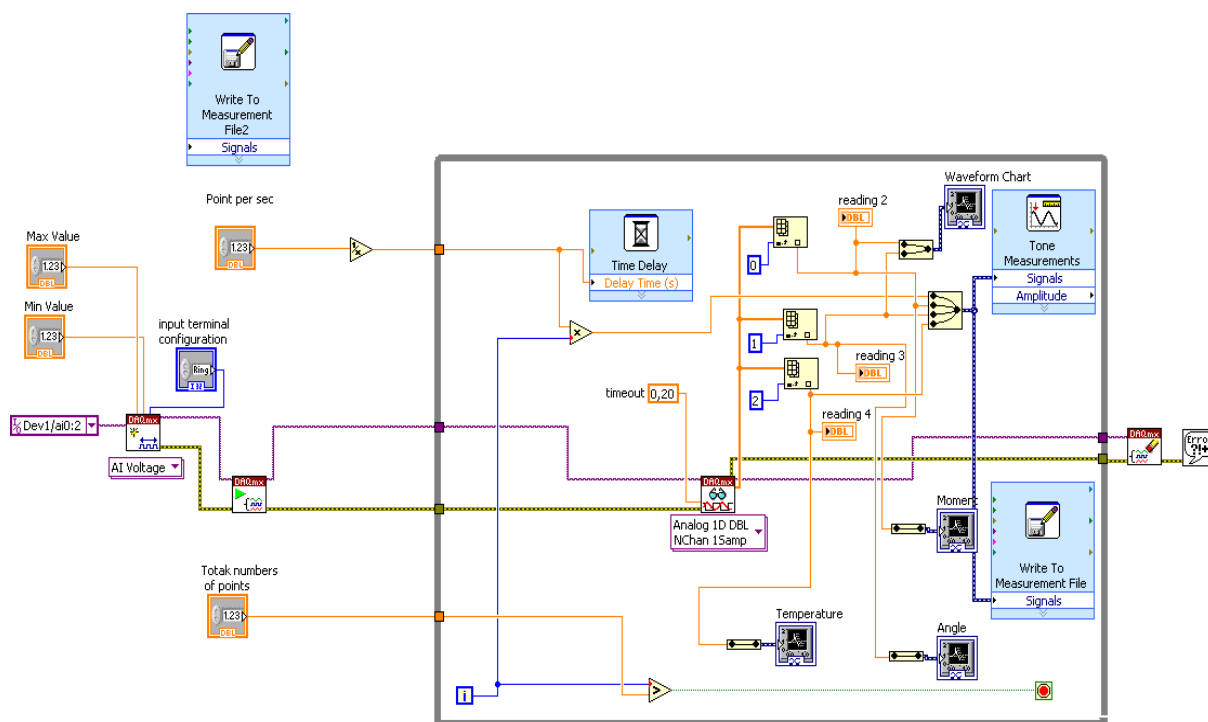


Рис. 4. Тіло програми реєстрації результатів вимірювань.

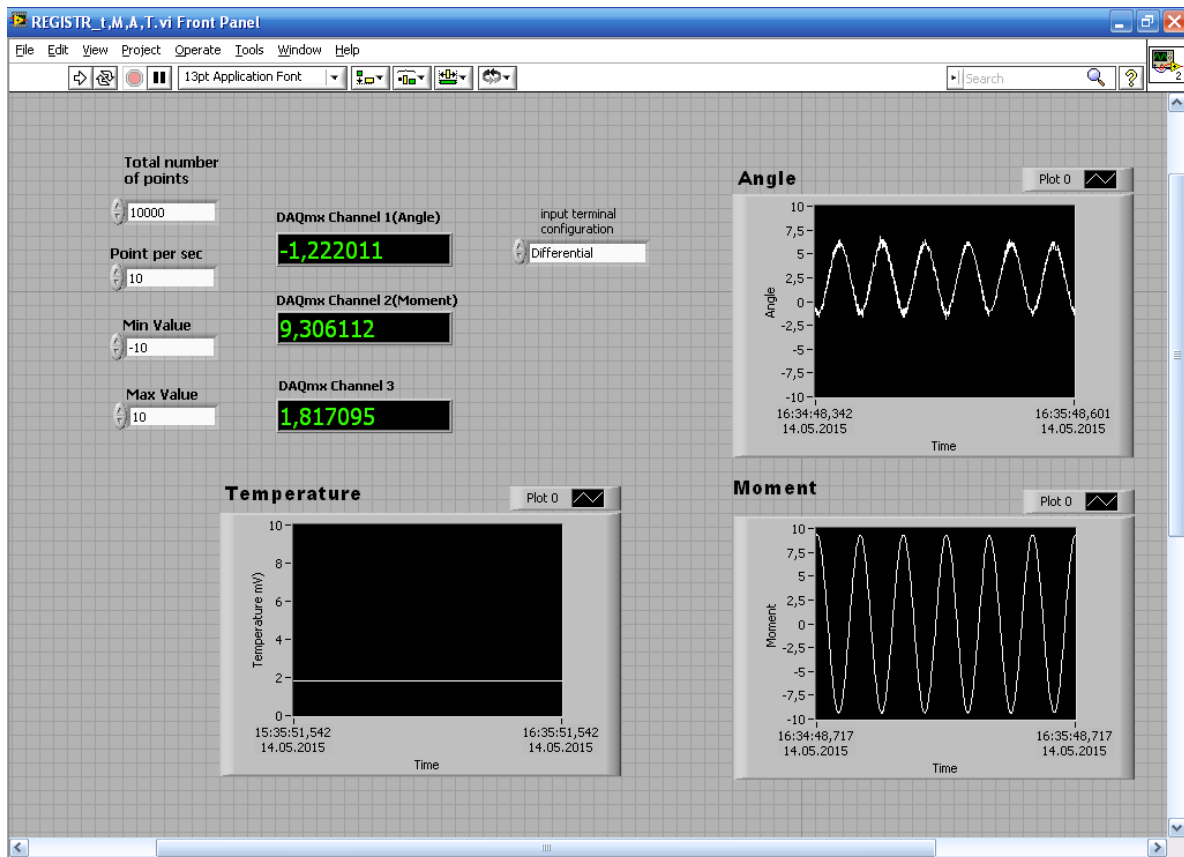


Рис.5. Лицева панель ВП відображення у реальному часі результатів вимірювань.

Зовнішній вигляд готового програмного продукту - лицева панель реєстрації та відображення результатів вимірювань представлена на рис. 5. На передній панелі розташовані:

- поле налаштування параметрів АЦП;
- термінал введення чисельних даних Num Ctrl числа точок вимірювання;
- термінал введення чисельних даних Num Ctrl кількості вимірів за секунду;
- термінали відображення чисельних даних Num Ind, які відображають поточне значення температури, деформації та струму через котушки збудження, що пропорціональний механічному моменту, прикладеному до зразка;
- індикатори XY Graph цих же параметрів.

Висновки

Розроблена установка та програмне забезпечення для автоматизації вимірювань успішно застосовується нами при

проведенні експериментів з дослідження механічних властивостей халькогенідних склоподібних матеріалів як у статичному режимі, так і на низьких та інфранизьких частотах, однак може бути використана для дослідження характеристик широкого кола матеріалів (від полімерів до надміцної кераміки) і вирішення спектра фізичних задач (вимірювання коефіцієнтів загасання і модулів пружності, вивчення структурних і фазових перетворень, вияснення механізмів деформації і релаксації в матеріалах при зовнішніх навантаженнях і при температурному впливі). До її переваг слід віднести можливість відстеження процесу деформації зразка у реальному часі, що дозволяє контролювати хід процесу проведення експерименту і при необхідності виконати його коригування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Blanter M.S., I.S. Golovin, H. Neuhauser, H.-R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin (2007).
2. Leszek B. Magalas. *Mechanical Spectroscopy – Fundamentals. Solid State Phenomena Vol. 89* (2003) pp 1-22.
3. Пилипенко А.Н. Автоматизированная система релаксационной спектроскопии. *Физика и техника высоких давлений*. 2013, том 23, № 4, с. 135-143.
4. Аржавитин В.М., Финкель В.А., Шахов Ю.Н. Установка для измерения низкочастотного внутреннего трения при низких температурах. – *Вопр. атомной науки и техники*. –2006, №1, с. 127 –129.
5. R. S. Lakes. Viscoelastic measurement techniques. *Rev. Sci. Instrum.* 75, 797, 2004.
6. Старцев О.В., Мелетов В.П., Вапиров Ю.М. Крутильный маятник для измерения вязкоупругих свойств материалов: А.С. 1221542 СССР/- опубл. в Б.И., 1986, №12.- с.199.
7. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. Изд. 10-е, перераб. и доп. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
8. Суранов А. Я. *LabVIEW 7: справочник по функциям*. - М.: ДМК Пресс, 2005. – 512 с.
9. *LabVIEW System Design Software [Электронный ресурс]* / Режим доступа: <http://www.ni.com/labview/>
10. Carlos Grandini. Low cost automatic system for anelastic relaxation measurements. *Revista Brasileira de Aplicacoes de Vacuo*. 2002, v.21, N1, p. 13 – 16.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2016 р.

А.А. Горват, В.В. Минькович, Е.И. Самусь
Ужгородский национальный университет,
88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Описана автоматизированная установка, которая позволяет исследовать модуль сдвига и инфранизкочастотное внутреннее трение (ВТ) с использованием обратного крутильного маятника в режиме свободнотухающих или вынужденных колебаний на частотах 10^{-3} - 20 Гц в интервале относительной деформации 10^{-6} - 10^{-2} и диапазоне температур 100 - 600 К.

Ключевые слова: модуль сдвига, внутреннее трение, обратный крутильный маятник, относительная деформация.

PACS 62.20.-x, 62.40. + Я, 07.05.Hd

A.A. Horvat, V.V. Minkovitch, Y.I. Samus

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

MECHANICAL PROPERTIES MEASUREMENT OF SOLIDS AT INFRALOW FREQUENCIES

Abstract

Background: The most qualitative indicators of solid state mechanical properties are complex Young's or shear modulus - E^* , G^* , Poisson module- μ and mechanical losses tangent - $\text{tg}\delta$. There are several different methods for the study of mechanical properties using DMA, one of which is a method of torsional vibrations. This method has been known for over 100 years, but even today attracts developers of equipment for rheological studies and to measure the complex shear modulus and internal friction.

Methods: We described the most advanced devices of this type, called as inverse torsion pendulum, in which the inertial part is suspended on thin torsion over the studied sample and balanced by counterweight. The electromagnetic system, consisting of permanent magnets and two Helmholtz coil located diametrically opposite to the axis of the pendulum are used to create a torsion moment. The deformation, that occurs in the sample, is determined by the photoelectric sensor that consists of a semiconductor laser and a differential photodiode.

Results: An automated measurement setup, based on the free or forced oscillations of torsion pendulum, allows at temperature range from 77 to 600 K, mechanical stress - from 0 to 10^7 Pa amplitudes of relative deformation - from 10^{-6} to 10^{-1} carry out the following types of measurements:

- in static load mode - study the strain ε (at $\sigma = \text{const}$), or mechanical stress σ (at $\varepsilon = \text{const}$) relaxation, getting thermomechanical curves $\varepsilon(T)$ of solids at $\sigma = \text{const}$,

- in free damped vibrations mode - determination of temperature and frequency dependence of internal friction $Q^{-1} = \text{tg}\delta$ and shear modulus in the frequency range 1 - 20 Hz,

- using forced oscillation at infralow frequencies (10^{-4} - 10^{-1} Hz) - recording mechanical hysteresis loops with further definition of the quasi-static shear modulus,

- combined measurement modes - i.e. mechanical hysteresis loop recording or free damped oscillations observation at statically loaded sample.

LabVIEW graphical programming environment was chosen for the automating the measuring process of the temperature and frequency dependence of internal friction and shear modulus.

Conclusion: The developed measurement devices and automation software has been successfully applied in experiments to investigate the mechanical properties of chalcogenide glassy materials both in static and low and infralow frequencies, but can be used to study the characteristics of a wide range of materials (from polymers to high-strength ceramics) and measuring attenuation coefficients and elastic moduli, studying structural and phase transformations, clarification the mechanisms of deformation and relaxation under external loads.

Keywords: shear modulus, internal friction, reverse torsion pendulum, relative deformation.

PACS NUMBER: 62.20.-x, 62.40. + Я, 07.05.Hd

REFERENCES:

1. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhauser H., Sinning H.-R., (2007), Internal Friction in Metallic Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin

2. Magalas Leszek B., (2003), Mechanical Spectroscopy – Fundamentals. Solid State Phenomena Vol. 89 pp. 1-22.

3. Pilipenko, A.N., (2013), “Automated system of relaxation spectroscopy” [“Avtomatizirovannaya sistema relaksatsionnoy spektroskopii”], Fizika i tehnika vysokih davleniy., tom 23, № 4, s. 135-143.
4. Arzhavtin V.M., Finkel V.A., Shahov Yu.N., (2006), “Apparatus for measuring low-frequency internal friction at low temperatures”, [“Ustanovka dlya izmereniya nizkochastotnogo vnutrennego treniya pri nizkih temperaturah”], Vopr. atomnoy nauki i tehniki, №1, s. 127 –129.
5. Lakes R. S., (2004), Viscoelastic measurement techniques. Rev. Sci. Instrum. 75, 797.
6. Startsev O.V., Meletov V.P., Vapirov Yu.M., (1986), “Torsion pendulum to measure the viscoelastic properties of materials”, [“Krutilnyiy mayatnik dlya izmereniya vyazkouprugih svoystv materialov”], A.S. 1221542 SSSR/- opubl. v B.I, №12,-s.199
7. Feodosev V. I., (1999), “Strength of materials”, “Soprotivlenie materialov”, Izd. 10-e, pererab. i dop. - M.: MGTU im. N. E. Baumana, 592 s.
8. Suranov A. Ya., (2005), “LabVIEW 7: Function Reference”, [“LabVIEW 7: spravochnik po funktsiyam”], M.: DMK Press,. - 512 s.
9. LabVIEW System Design Software [Elektronnyy resurs] / Rezhim dostupa: <http://www.ni.com/labview/>
10. Grandini Carlos, (2002), Low cost automatic system for anelastic relaxation measurements. Revista Brasileira de Aplicacoes de Vacuo., v.21, N1, p. 13 – 16.

© Ужгородський національний університет