

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ДИАГНОСТИКИ

PACSnumbers: 07.10.-h, 46.40.-f, 46.70.Hg, 46.80.+j, 62.20.F-, 62.20.Hg, 62.30.+d, 81.70.-q

Спосіб визначення зміни пластичних властивостей металевої платви за частотами мод натягнутої над нею струни

Ю. Й. Стрілецький, В. А. Ровінський*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15,*

76019 Івано-Франківськ, Україна

**Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57,*

76018 Івано-Франківськ, Україна

Запропоновано спосіб дослідження деформаційної плазучості та релаксації сталі за їхнім впливом на моди коливань струни, яку натягнуто між двома опорами, цупко закріпленими на досліджуваній платві. Розроблено пристрій для підтримання коливань натягнутої металевої струни. Запропоновано алгоритм розрахунку безрозмірного коефіцієнта, який описує ступінь впливу пластичних властивостей металу на частоти мод натягнутої струни. Вказаний коефіцієнт дає можливість оцінювати зміни пластичних властивостей металу без використання еталонних досліджень. Проведено експериментальні дослідження впливу пластично деформованої ділянки сталевих зразків на частоти коливань мод натягнутої струни і встановлено, що пластичні деформації приводять до зростання коефіцієнта відношення частот, причому структурні зміни в сталі марки Ст3 оцінюються більшим значенням коефіцієнта, ніж зміни в трубній сталі 09Г2ФБ.

Corresponding author: Yuriy Yosypovych Striletskyy
E-mail: momental@ukr.net

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska Str., 76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine

**Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
57 Shevchenko Str., 76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Please cite this article as: Yu. Yo. Striletskyy and V. A. Rovinsky, Method of Determination of Changes of Plastic Properties of a Metal Plate by Means of Frequencies of Modes of the String Stretched above It, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, No. 10: 1377–1393 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.10.1377.

Ключові слова: коливання натягнутої струни, моди струни, пружньо-пластична деформація, деформація плазучости металу, релаксація деформації металу.

The method is proposed to study deformation creep and relaxation of a metal by their influence on the vibrational modes of string stretched between two points rigidly fixed on the investigated plate. A device for supporting the vibrations of the stretched metal string is developed. An algorithm is proposed for calculating a dimensionless coefficient, which describes the degree of influence of plasticity properties of a metal on the modes' frequencies of a strained string. The mentioned coefficient makes it possible to evaluate changes in the plasticity properties of the metal without usage of etalon studies. The practical investigations of the influence of the plastically deformed area of steel samples on the frequencies of the vibrational modes of the strained string are carried out. As determined, the structural changes in the St3 steel are estimated by the higher value of proposed coefficient than the changes in the pipe 09G2FB steel.

Keywords: vibrations of the strained string, vibrating modes of string, viscoelastic deformation, creep deformation of a metal, deformation relaxation of a metal.

Предложен способ исследования деформационной текучести и релаксации стали по их влиянию на моды колебаний струны, натянутой между двумя опорами, жёстко закреплёнными на исследуемой пластине. Разработано устройство для поддержания колебаний натянутой металлической струны. Предложен алгоритм расчёта безразмерного коэффициента, который описывает степень влияния пластических свойств металла на частоты мод натянутой струны. Указанный коэффициент позволяет оценивать изменения пластических свойств металла без использования эталонных исследований. Проведены экспериментальные исследования влияния пластически деформированного участка стальных образцов на частоты колебаний мод натянутой струны и установлено, что пластические деформации приводят к росту коэффициента отношения частот, причём структурные изменения в стали марки Ст3 оцениваются большим значением коэффициента, чем изменения в трубной стали 09Г2ФБ.

Ключевые слова: колебания напряжённой струны, моды струны, упруго-пластическая деформация, деформация ползучести металла, деформационная релаксация металла.

(Отримано 9 вересня 2017 р.)

1. ВСТУП

Сучасні машини і механізми потребують раціонального вибору з поміж наявних та розробки нових матеріалів із прогнозованими властивостями. Їх виготовлення вимагає розвиненої технологічної інфраструктури та проведення комплексу заходів від моделювання

до формотворення деталей. Одним із важливих етапів розробки є дослідження механічних властивостей матеріалів в експлуатаційних умовах. Розширення переліку параметрів для оцінки властивостей матеріалів в умовах експлуатації має велике значення для діагностування та прогнозування їхнього ресурсу роботи.

Теоретико-експериментальні підходи, які використовують непрямі методи діагностування фактичного технічного стану об'єкта за іншими доступними для вимірювання характеристиками, набувають все більшого розвитку. У роботах [1, 2] досліджено нестационарні процеси в одновимірних пружних системах за умови непружної взаємодії з довколишньою основою. Проблему забезпечення сумісного деформування свідка втомних пошкоджень та досліджуваного деталю розглянуто у роботі [3], а у роботі [4] експериментально досліджено характеристики оболонкових пружних елементів. У праці [5] проведено шляхом аналізу методом скінчених елементів чисельні дослідження характеристик пружних вузлів (цупкість, міцність, демпфування). Стійкість алюмінію бурильної труби з протекторним потовщенням, досліджено в праці [6], а коливання колони штанг верстата-качалки вивчали дослідники в [7]. Автори робіт [8, 9] дослідили вплив механічних властивостей матеріалів труб на динаміку прихопленої бурильної колони у свердловині.

У роботах [10, 11] досліджено вплив навантаження на мікроелектрохімічну неоднорідність сталі. В роботах [12, 13] розглянуто різні види структурних змін, які спостерігаються у металах, і також показано, що при надмірному навантаженні, коли механічні напруження перевищують границю плинності металу, виникає незворотна залишкова деформація. Такі зміни у структурі металу проходять внаслідок процесів, що відбуваються на окремих ділянках кристалічної ґратниці під дією механічних напружень.

Деформування деталю внаслідок дії механічного навантаження проходить у декілька етапів, причому кожному етапу відповідає новий стан деформованого тіла, що утворюється внаслідок структурної перебудови у відповідності до принципу Ле Шательє–Брауна [12]. Внаслідок пластичної деформації до певної межі в металі має місце наклеп. При цьому розвантажений деталь залишається пружним, хоча із залишковими деформаціями та із частково зміненою структурою. Відомо, що при різкому навантаженні реальне тверде тіло різко деформується і тільки через деякий час деформація стає відповідною до Гукового закону. На рисунку 1 наведено взаємозв'язок між механічним напруженням σ і деформацією ε абстрактного металевого зразка [14].

При навантаженні зразка деформування відбувається поступово за час τ_n . При відсутності навантаження під дією повертальної сили відбувається релаксація, яка триває протягом часу τ_p . Залежно від частоти прикладання навантаження релаксаційні процеси пояс-

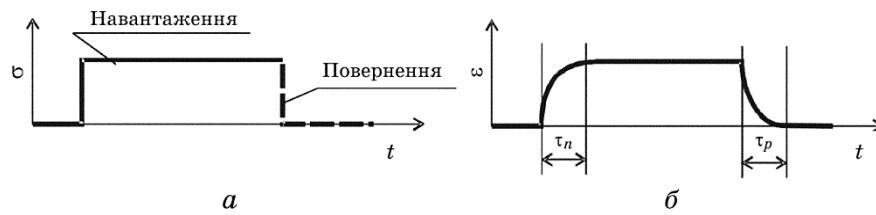


Рис. 1. Прояв пластичних властивостей металу при динамічному навантаженні: *а* — залежність прикладеної сили від часу, *б* — залежність деформації від часу, синхронно із прикладеною силою.

Fig. 1. Plasticity properties of a metal under dynamical load: *a*—dependence of the applied force on time, *б*—dependence of deformation on time synchronously with the applied force.

нуються різними властивостями структури металу. Зміна структури металу приводить до зміни параметрів релаксації. Їх можна визначити за допомогою відомих метод, наприклад методи резонансного стрижня, за якою вимірюють власні коливання стрижня із досліджуваного матеріялу [12].

У процесі експлуатації циклічні навантаження металу викликають структурні зміни, які проявляються зростанням втрат енергії у металі [15]; при цьому зростає і час релаксації [16]. Втрати енергії у твердому тілі пояснюються його пластичністю. Пластичність є однією з характеристик, які впливають на механічний імпеданс матеріялу, а він, в свою чергу, впливає на частоту власних коливань деталю. Для випадку простих геометричних форм деталей встановлено залежності, які уможливають визначити власні частоти механічних коливань кожного конкретного деталю, залежно від розмірів і властивостей матеріялу, з якого його виготовлено [17, 18]. Збудивши та вимірявши власні коливання у деталю, можна порівняти їх із теоретично розрахованими та встановити ступінь розбіжності.

Складна форма деталю ускладнює розрахунок частот власних коливань за теоретичними залежностями, тому зручно побудувати коливну систему, складовою частиною якої є сам досліджуваний деталю. Коливання при цьому збуджуються у простих за формою елементах системи. На частоту їхніх коливань впливають механічні властивості всіх складових коливної системи. Елементом із відомими механічними параметрами, який зручно використовувати для досліджень механічних коливань системи є натягнута струна [19].

Методи оцінювання властивостей металу ґрунтуються на обробленні діагностичних сигналів, які формуються шляхом механічного впливу на відповідну конструкцію чи окремий зразок. У загальному випадку можна виділити декілька видів сигналів для формування збудювального впливу, реалізація яких потребує використання електромагнетних, акустичних і п'єзоелектричних перетво-

рювачів, зокрема [20]: одиночний імпульсний сигнал, хвилі якого поширюються матеріалом, зазнаючи спотворень. У ході оброблення таких прийнятих сигналів оцінюється час їхнього поширення та ступінь затухання амплітуди; циклічні імпульсні сигнали, формування яких передбачає введення системи у квазирезонансний режим збудження хвилі. У ході оброблення оцінюється швидкість поширення таких сигналів і на основі зміни цієї швидкості оцінюють стан досліджуваного матеріалу.

На час поширення хвилі менше впливає стан поверхні деталю, однак виявлення незначних змін структури матеріалу унеможливується недостатньою роздільною здатністю засобів оцінки форми хвилі, зокрема при незначних розмірах об'єкта. У випадку використання циклічного збудження хвилі зростає кількість даних про її форму пропорційно до тривалості спостереження. Це дозволяє покращити роздільчу здатність вимірювання часових параметрів поширення хвилі в автоколивному режимі за рахунок зменшення впливу випадкової похибки.

До спільних недоліків вищевказаних метод [20] слід віднести необхідність використання зразків тестових матеріалів для налаштування чутливості первинних перетворювачів систем діагностування, а також їх обмеженість локальними вимірюваннями, що приводить до необхідності створення систем сканування для виявлення місць локальної зміни властивостей, пов'язаних зі змінами в структурі металу, наприклад, через пластичну деформацію.

Метою даної роботи є розробка неруйнівного способу оцінки зміни пластичних властивостей металу на вибраній ділянці платви, використовуючи аналізу частот мод натягнутої над нею струни, яка разом із цією смугою утворює спільну коливну систему.

2. ТЕОРІЯ МЕТОДИ

Струна є циліндром, діаметер якого набагато менший за його довжину. Пружність і відповідно здатність до коливних переміщень струна значною мірою отримує під впливом сили повздовжнього натягу F . У даній роботі розглядається струна, видовжена на фіксовану величину за рахунок прикладання сили у повздовжньому напрямку. Розглянемо струну, натягнуту і закріплену на її кінцях (рис. 2).

Задача поширення хвиль у гнучкій однорідній натягнутій струні досліджувалась багатьма вченими, включно із такими відомими як Бернуллі, Ойлер, Лягранж. У найпростішому випадку, процес поширення поперечних хвиль в струні без втрат описується хвильовим рівнянням вигляду [21]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (1)$$

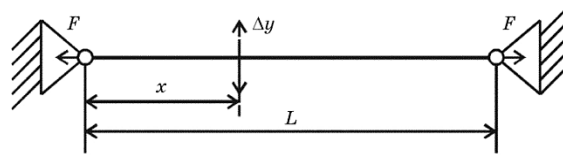


Рис. 2. Схема натягу струни між двома нерухомими точками.

Fig. 2. Scheme of a string strained between two fixed points.

де y — вертикальне зміщення струни, t — час, b — стала, що залежить від параметрів натягу і маси струни, x — горизонтальна координата.

З розв'язку цього рівняння випливає залежність, що описує власні частоти коливань струни, які кратні її довжині:

$$\omega_n = k_n \sqrt{\sigma/\rho}, \quad (2)$$

де σ — механічні напруження в струні, ρ — погонна густина струни, $k_n = 2\pi n/\lambda$ — хвильове число, λ — довжина хвилі, що дорівнює половині довжини L натягнутої струни. Для ідеальної струни номер моди n визначає частоту її коливання згідно з (2). Коливання струни в загальному випадку є сумою коливань різних мод.

У реальних струнах частоти коливань вищих мод не є кратними між собою [22]:

$$\omega_n^2 \approx \sigma k_n^2/\rho + \alpha k_n^4, \quad (3)$$

де α — додатна константа, наявність якої спричинено власною цупкістю струни. Сила опору струни зі зростанням номера моди зростає, проте доданок залежності пропорційний до цупкості струни зростає швидше. Цупкість струни, за умови незмінності її довжини, має більший вплив на частоти вищих мод.

Окрім поперечних коливань, у струні є й повздовжні коливання. Повздовжні коливання струни через опори передаються на основу, на якій вказана струна закріплена. Це призводить до збудження механічних коливань і в основі. Щоб оцінити їх вплив на частоти коливань мод струни розглянемо наступну схему (рис. 3, а).

Струна 1 цупко закріплена на цупких опорах 3 в точках А і В. Опори цупко встановлено на основі 2. Таким чином, струна натягнута між двома точками довільної основи A_1B_1 . При своїх поперечних коливаннях струна спричиняє приріст сили, прикладеної до плечей висотою AA_1 та BB_1 відповідно. Внаслідок дії цих сил основа деформується (рис. 3, б). Вона вигинається під дією сили натягу струни, а випрямляється під впливом власних пружних властивостей. При вигині основи A_1B_1 віддаль між точками А і В зменшується, що призводить до зміни частоти коливань струни.

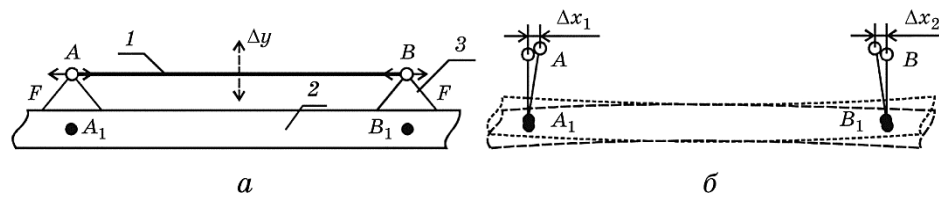


Рис. 3. Деформація металевої основи при коливанні натягнутої струни: *a* — схема дослідної установки, *б* — вигляд згинаючих деформацій, що виникають в основі.

Fig. 3. Deformation of the metal base during vibration the strained string: *a* — scheme of the experimental installation, *б* — form of bending deformations arising in the base.

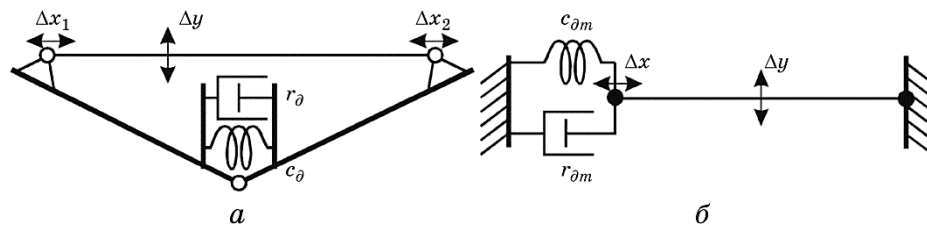


Рис. 4. Побудова моделю коливної системи зі струною: *a* — моделювання цупкими балками, *б* — моделювання пружньо-пластичною вставкою.

Fig. 4. Construction of a model of vibration system with strained string: *a* — simulations by hard beams, *б* — modelling by a viscoelastic insert.

Для спрощення подальшої аналізи пружньо-пластичну основу 2 представимо двома цупкими балками, що з'єднані шарнірно між собою (рис. 4, *a*) як, наприклад, в [23]. Якщо зафіксувати одну із балок, на якій закріплено опору, то її переміщення стане рівне нулю. Закріплена на іншій цупкій балці опора буде переміщатися на величину $\Delta x = \Delta x_1 - \Delta x_2$. Тому струну, натягнуту між двома точками пружньо-пластичної балки можна представити струною, натягнутою послідовно із пружньо-пластичним елементом, який враховує властивості основи між нерухомими точками (рис. 4, *б*). Пружньо-пластичні властивості основи, в даному випадку можна представити моделлю Кельвіна–Фойгта [24].

Подальші дослідження механічних процесів системи проведено із врахуванням еквівалентності між механічними й електричними коливаннями [25, 26]. Для опису коливної системи вибрано електричну модель заміщення, у якій сила представляється струмом, а швидкість — напругою. Згідно з цим моделлю, пластичність представляється електричною провідністю, пружність — електричною індуктивністю, а маса — електричною ємністю. Схему еквівалент-

ного електричного моделю коливної системи, утвореної струною, натягнутою на пружньо-пластичній основі, наведено на рис. 5.

Множину мод коливань струни представлено паралельно включеними послідовними LC -ланками. Пружньо-пластична основа представлена елементами L_0 , G_0 . Напряга між точками E і D еквівалентна до механічної швидкості переміщення кінця струни, закріпленого на пружньо-пластичній основі. У процесі коливань струни її повздовжній натяг деформує основу, що приводить до зменшення віддалі між точками кріплення струни і, як наслідок, до зменшення довжини хвилі.

Сила, прикладена до основи в точках кріплення струни, завжди одного знаку протягом всього коливного циклу. Коливання струни у поперечному напрямку спричиняє зростання сили F в крайніх положеннях струни і повернення до початкового положення (рис. 6).

Враховуючи, що переміщення є інтегралом від швидкості, легко знайти сигнал еквівалентний переміщенню кінця струни у процесі коливання за допомогою інтегрування спаду напруги на ділянці ED . Один знак інтеграла визначається пошуком модуля від інтегро-

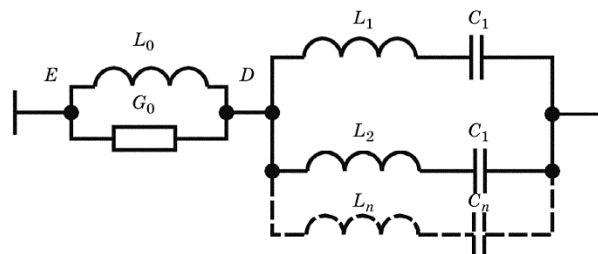


Рис. 5. Електрична принципова схема, що моделює коливну систему пружньо-пластичної основи зі струною.

Fig. 5. Electrical schematic that simulates vibrational system containing viscoelastic base with a string.

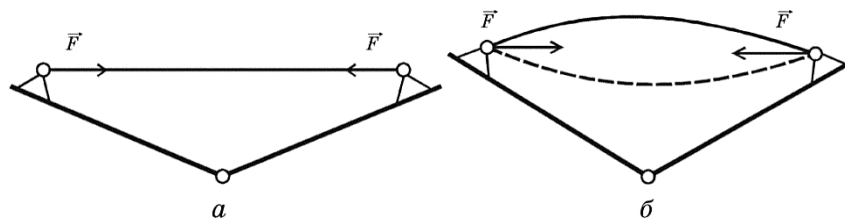


Рис. 6. Вплив положення струни на параметри її натягу: a — натяг, спричинений відхиленням струни, b — повернення до початкового положення.

Fig. 6. Influence of a string position on parameters of its tension: a —tension caused by the deviation of the string, b —return to the original position.

ваного значення. Сигнал, еквівалентний деформації, отримується додаванням коефіцієнта, пропорційного попередньому натягу струни. Цей сигнал впливає на параметри пружності струни, які в еквівалентному електричній схемі моделю представлено індуктивностями L_1, L_2, L_n . Звідки, відповідно, для першої моди коливань:

$$L_1(t) = L_{01} \left(1 - \wp \left| \int u_{AB}(t) dt \right| \right), \quad (4)$$

де L_{01} — початкова індуктивність, обернено пропорційна пружності струни в стані спокою, \wp — коефіцієнт впливу напруги на індуктивність, $u_{AB}(t)$ — функція спаду напруги на ділянці ED .

Із наведеної залежності (4) видно, що індуктивність завжди менша за початкову. Тому при коливанні струни, закріпленої на пружній основі, частота коливань завжди буде меншою, ніж при коливанні на абсолютно цупкій основі.

Колівання струни модулюють самі себе за частотою, оскільки

$$\omega^2(t) = \frac{1}{L_1(t) C_1} = \frac{1}{L_{01} \left(1 - \wp \left| \int u_{ED}(t) dt \right| \right) C_1}. \quad (5)$$

У свою чергу,

$$u_{ED}(t) = \frac{1}{L_1(t)} \frac{i\omega(t)L_0}{1 + i\omega(t)G_0L_0}, \quad (6)$$

де i — уявна одиниця.

Принципова електрична схема, яка моделює роботу коливної системи для двох мод наведена на рис. 7.

З використанням розробленого моделю було досліджено спектральні властивості струму, який стікає на загальну лінію. Струм електричного моделю еквівалентний силі, яка прикладається до основи в точках AB . Спектральну густину струму, знайдену в результаті числового експерименту, наведено на рис. 8.

Із наведеного графіка видно, що спектер коливань для кожної з мод має симетричний відносно ω_1 і ω_2 вигляд. Це характерно для частотно-модульованих сигналів [27]. Ширина смуги, зайнята модою, залежить від L_0 , тобто від пружних властивостей основи. Зменшення L_0 , що еквівалентно зменшенню пружності основи, приводить до звуження смуги навколо центральних спектральних складових на частотах ω_1 і ω_2 . Зменшення ж провідності G_0 , що еквівалентно зменшенню пластичності матеріялу, приводить до зміни ω_1 і ω_2 . Частоти власних коливань системи можна знайти за її імпедансом:

$$Z(\omega) = \frac{i\omega L_0}{1 + i\omega G_0 L_0} + \frac{[i\omega L_1 + 1/(i\omega C_1)][i\omega L_2 + 1/(i\omega C_2)]}{i\omega L_1 + 1/(i\omega C_1) + i\omega L_2 + 1/(i\omega C_2)}, \quad (7)$$

Прийнявши, що пружність струни на різних модах незмінна, а міняється тільки погонна густина струни на довжину хвилі, можна прийняти для їх електричних аналогів:

$$L = L_1 = L_2, \quad C = C_1 = 2C_2. \tag{8}$$

Запишемо вираз для імпедансу ланки, за допомогою якого можна визначити власні частоти коливної системи і вплив на них зміни провідності:

$$Z(\omega) = [i\omega^5 L_0 G_0 (LC)^2 + \omega^4 C^2 L(L + 2L_0) - 3i\omega^3 L_0 G_0 LC - 3\omega^2 C \times (L + L_0) + 2i\omega L_0 G_0 + 2] / [(2i\omega^3 CLL_0 G_0 + 2CL\omega^2 - 3i\omega L_0 G_0 - 3)\omega C]. \tag{9}$$

На частотах власних коливань імпеданс ланки $Z(\omega) \rightarrow 0$, а адмі-

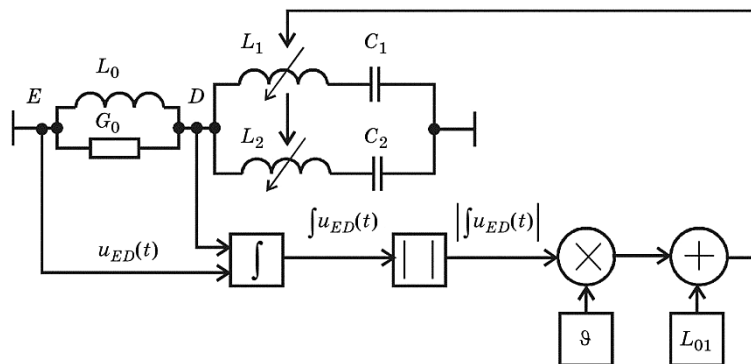


Рис. 7. Удосконалена принципова електрична схема моделю коливної системи пружньо-пластичної основи зі струною.

Fig. 7. The improved electrical scheme of vibration-system model with viscoelastic base and strained string.

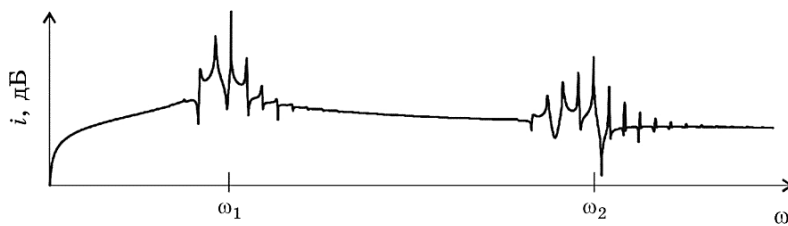


Рис. 8. Спектральна густина сигналу (струму), пропорційного амплітуді коливань струни, натягнутої на пластично-пружній основі.

Fig. 8. Spectral density of signal (current), which is proportional to vibration amplitude of string strained on the viscoelastic base.

танс $Y(\omega) = 1/Z(\omega)$ зростає. Зростає і струм у ланці, який еквівалентний силі, що діє на основу. Чисельне моделювання виразу (9) виявило, що при зростанні провідності G_0 , що характерно для збільшення втрат енергії в металі основи, частоти власних коливань струни зростають. Причому швидкість зростання частот нижчих мод більша. Результати дослідження наведено в графічному вигляді на рис. 9. Наявність елементів L_0G_0 слабо впливає на моди. Тому вимірювати частоту треба з високою точністю.

Як видно із наведеної графічної залежності, зміна пластичних властивостей металу пружньо-пластичної основи призводить до зростання резонансної частоти коливної системи. Приймавши частоту коливання першої моди за опорну, можна шукали оцінку відхилення частот коливань вищих мод за допомогою певного коефіцієнта, який визначається згідно формули

$$q = \frac{n\omega_1}{\omega_n}, \quad (10)$$

де n — номер моди, ω_1 — частота коливань 1-ї моди, ω_n — частота коливань n моди. Для ідеальної натягнутої струни, кінці якої зафіксовані, даний коефіцієнт буде дорівнювати 1. У реальних струн, цупкість яких визначається не тільки силою її натягу, а й власною цупкістю матеріалу, з якої виготовлено струну, що враховано в (3), коефіцієнт q буде меншим за 1. Зміни в структурі металу, які приводять до перерозподілу енергії деформування пружньо-пластичної основи, мають різний вплив на натяг струни. За наявності значних втрат енергії деформації, пов'язаних із пластичними властивостями металу основи, на якій натягнуто струну, коефіцієнт q має бути більшим за 1.

При коливанні струна створює малі зусилля на основу, тому для

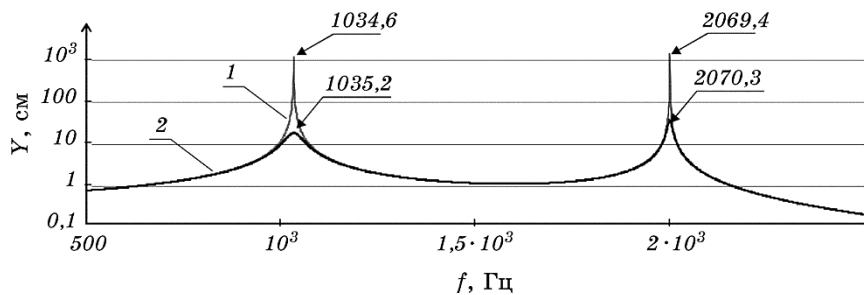


Рис. 9. Результати розрахунку адмітансу ланки коливної системи: 1 — без втрат, 2 — із урахуванням втрат.

Fig. 9. Results of calculation of admittance of the vibrational-system circuit: 1—without losses, 2—with losses.

виявлення впливу пружньо-пластичних властивостей металевої основи необхідно використовувати циклічні вимірювання та застосовувати накопичувальні методи оброблення сигналів, причому впродовж всього часу вимірювання амплітуда коливань струни має бути сталою.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для перевірки запропонованого способу виявлення зміни пластичних властивостей металу було розроблено і виготовлено експериментальну дослідну установку. Механічну частину установки наведено на рис. 3, а, а структурну схему електронного блоку — на рис. 10.

Збудження коливань струни здійснювали магнетоелектричним способом. Певна ділянка натягнутої струни знаходилась у магнетному полі. По струні пропускали струм, який за рахунок сили Ампера викликав її механічне переміщення. У свою чергу, переміщення струни в магнетному полі викликає появу сили Лоренца, яка у виді напруги генерується на кінцях струни.

Початкове збудження струни відбувається під дією джерела широкосмугового сигналу, яке забезпечує її початкове переміщення. На власних частотах коливань швидкість переміщення струни бі-

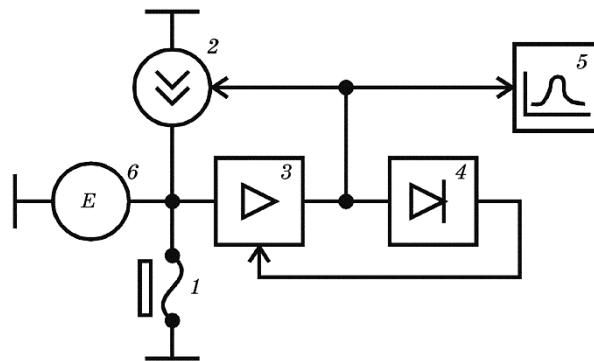


Рис. 10. Структурна схема електронного блоку експериментальної установки, що забезпечує коливання струни та оцінку її власних частот: 1 — струна в магнетному полі, 2 — кероване джерело струму, 3 — підсилювач напруги із керованим коефіцієнтом підсилення, 4 — випрямляч системи автопідсилення, 5 — аналізатор спектра, 6 — джерело широкосмугового збуджуючого сигналу.

Fig. 10. Structural scheme of the electronic control unit of the experimental installation, which provides the vibration of the string and estimation of its own frequencies: 1—string in the magnetic field, 2—controlled current source, 3—voltage amplifier with variable gain, 4—rectifier of the autoamplification system, 5—spectrum analyser, 6—source of broadband excitation signal.

льша, а відповідно більша і генерована нею напруга на цих частотах. Підтримання діючого значення напруги на фіксованому рівні забезпечує коливання струни тільки на власних частотах. Розташування струни в колі зворотнього зв'язку дало можливість отримати автоколивну систему, спектер сигналу якої визначається швидкістю переміщення струни і відповідно залежить від механічних властивостей всієї коливної системи.

За даною структурною схемою було виготовлено дослідний варіант установки. На основі запропонованого способу та з використанням розробленого приладу проведено ряд експериментальних досліджень, під час яких, в ході формування та опрацювання діагностичних сигналів використовували різноманітні тестові зразки з різних матеріалів, зокрема трубної сталі 09Г2ФБ і конструкційної сталі Ст3, виготовлені згідно з рекомендаціями [28]. На цих зразках нерухомо встановлювали опори і між ними кріпили натягнуту металеву струну. Фото зразків наведено на рис. 11. Довжина зразків становила близько 300 мм. Площа поперечного перерізу 540 мм². Для імітації зміни структури металу використовували зразки із конструкційної (зразок 1) та трубної (зразок 2) сталі з ділянкою, на якій відбулась пластична деформація за рахунок однобічного розтягування. Додатково досліджували зразки з трубної сталі з нерівномірною структурою у поперечному перерізі. Нерівномірність полягала у наявності поперечного зварного шва (зразок 3), отриманого ручним електродуговим зварюванням, а також у зміні площі поперечного перерізу в середній частині зразка 4. За еталон було виб-



Рис. 11. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків.

Fig. 11. Exterior view of the investigated samples.

рано недеформований зразок 5 з трубної сталі без дефектів.

У ході експериментальних досліджень визначено коефіцієнт ступеня відхилення частоти гармонік першої моди до частоти вищих мод згідно (10) для різноманітних металевих зрізів (1–5). Результати досліджень у графічному вигляді подано на рис. 12.

Із наведених графічних залежностей видно, що коефіцієнт q на зразках 1 і 2 вже з третьої моди стає ustalено більшим 1. Водночас для зразка 5 коефіцієнт $q < 1$, що пов'язано із малими пластичними деформаціями основи. Зразки 3 і 4 хоч і мають неоднорідності, проте їх пластичні властивості не приводять до зростання q вище за 1.

Розроблений спосіб та його схемна реалізація дозволяють ефективно оцінювати зміну пружньо-пластичних властивостей металеві основи шляхом визначення коефіцієнта відношення гармоніки першої моди до частоти вищих мод коливання струни, натягнутої на цій основі.

Запропонований підхід опосередкованого оцінювання зміни пластичних властивостей шляхом збудження коливань у металевій основі за допомогою натягнутої між опорами металеві струни, розширює функціональні можливості неруйнівних метод за рахунок того, що струнний перетворювач може бути легко інтегрований у реальну конструкцію, наприклад, шляхом його встановлення на несучих конструкціях мостів, опор, кранів, переходів трубопроводів тощо, і працювати протягом всього терміну експлуатації. Це дозволить оперативно проводити постійний моніторинг стану металеві

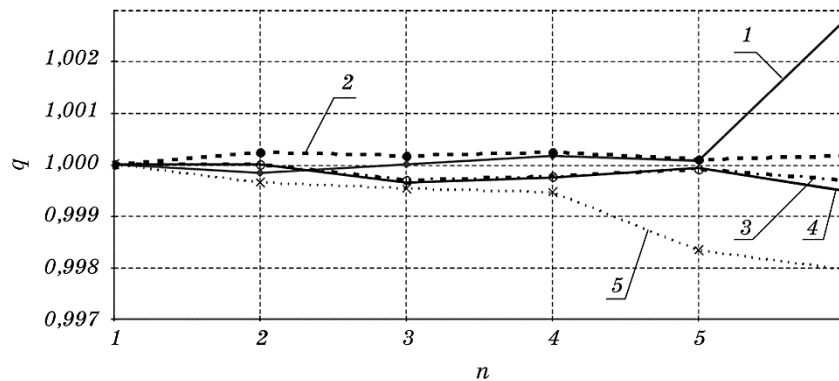


Рис. 12. Залежність коефіцієнта q для різних мод струни, натягнутої на досліджуваних зразках: 1 — Ст3, 2 — зразок з пластично деформованою ділянкою, 3 — із зварним швом, 4 — із різною товщиною вздовж зразка, 5 — однорідний без дефектів (зразки 2–5 із трубної сталі).

Fig. 12. Coefficient q for various mods of the string strained on the investigated samples: 1—Ст3, 2—sample with a plastically deformed zone, 3—with a welded seam, 4—with different thickness along the sample, 5—homogeneous without defects (samples 2–5 from tube steel).

вої конструкції та своєчасно реагувати на його зміну.

4. ВИСНОВКИ

Для дослідження пружньо-пластичних властивостей металу запропоновано використовувати механічні коливання, які збуджуються коливаннями натягнутої на опорах струни, шляхом вимірювання частот власних коливань струни і визначення співвідношення між частотами цих коливань на вищих модах і гармоніками частоти коливань першої моди. При цьому, можливість безеталонно оцінити наявність пластичних деформацій у металі зразка обумовлюється впливом втрат в ньому механічної енергії при циклічних навантаженнях і розвантаженнях на частоти коливань механічної коливної системи.

Розроблено спосіб та експериментальну установку для проведення досліджень зміни пластичних властивостей сталей, за допомогою якого проведено серію експериментів, в яких визначено відносний коефіцієнт зміни частот коливань на різних модах для різноманітних металевих зразків.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність теоретичних досліджень: встановлено, що за наявності пластично деформованої ділянки у металевій пластині коефіцієнт відношення гармоніки першої моди до частоти коливань вищих мод більший за одиницю. Вказаний коефіцієнт має більшу величину для зразка зі сталі Ст3, що можна пояснити структурними особливостями цієї сталі у порівнянні з трубною сталлю 09Г2ФБ. Виявлено, що у зразка зі зварним швом змінюються пластичні властивості металу, про що свідчить зростання коефіцієнта відношення гармоніки першої моди до частоти вищих мод коливань струни, у порівнянні з еталонним зразком.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. П. Шацкий, В. В. Перепичка, *Прикл. механика техн. физика*, **54**, № 6: 175 (2013).
2. I. Shatskyi and V. Perepichka, *Proc. 22nd Int. Sci. Conf. 'Mechanika 2017' (May 19, 2017)* (Kaunas, Lithuania: 2017), p. 348.
3. I. P. Shats'kyi, O. M. Lyskanych, and V. A. Kornuta, *Strength Mater.*, **48**, No. 3: 469 (2016).
4. A. S. Velichkovich, I. I. Popadyuk, and V. M. Shopa, *Chem. Pet. Eng.*, **46**, Iss. 9–10: 518 (2011).
5. A. S. Velichkovich and T. M. Dalyak, *Chem. Pet. Eng.*, **51**, Iss. 3–4: 188 (2015).
6. O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and O. Rogal, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 1(85): 25 (2017).
7. I. Steliga, J. Grydzhuk, and A. Dzhus, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **2**,

- № 7 (80): 20 (2016).
8. К. Г. Левчук, В. М. Мойсишин, І. В. Цідило, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1655 (2016).
 9. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Oil Gas Sci. Technol.*, **72**, No. 5: 27-1 (2017).
 10. Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, А. В. Горбатский, *Физ.-хим. механика матер.*, **23**, № 3: 40 (1987).
 11. Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, *Защита металлов*, **25**, № 2: 233 (1989).
 12. М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, *Структура и механические свойства металлов* (Москва: Металлургия: 1970).
 13. Д. А. Коллинз, *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение* (Москва: Мир: 1984).
 14. R. Lakes, *Viscoelasticity Notes Adapted from Viscoelastic Materials*, <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VENotes.html>
 15. O. Scott-Emuakpor, T. George, C. Cross, and M.-H.H. Shen, *J. Strain Anal. Eng. Des.*, **45**, Iss. 4: 275 (2010).
 16. S. K. Paul, N. Stanford, A. Taylor, and T. Hilditch, *Int. J. Fatigue*, **80**: 341 (2015).
 17. *Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник* (Ред. И. А. Биргер, Я. Г. Пановко) (Москва: Машиностроение: 1968), т. 3.
 18. К. Г. Левчук, *SOCAR Proc.*, Iss. 2: 23 (2017).
 19. Ю. Й. Стрілецький, *Методи та прилади контролю якості*, № 37: 79 (2016).
 20. В. В. Панасюк, *Механіка руйнування і міцність матеріалів* (Львів: Фіз.-механ. інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України: 2001), т. 5.
 21. Г. Лэмб, *Динамическая теория звука* (Москва: Гос. изд. физ.-мат. лит.: 1960).
 22. Ф. Крауфорд, *Волны* (Москва: Наука: 1984).
 23. Я. Г. Пановко, *Введение в теорию механических колебаний* (Москва: Наука: 1991).
 24. Дж. Мейз, *Теория и задачи механики сплошных сред* (Москва: Мир: 1974).
 25. *Mobility analogy*, http://www.wikiwand.com/en/Mobility_analogy
 26. H. A. C. Tilmans, *J. Micromech. Microeng.*, **6**, No. 3: 359 (1996).
 27. И. С. Гоноровский, *Радиотехнические цепи и сигналы* (Москва: Радио и связь: 1986).
 28. *ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение* (Москва: ИПК стандартов: 1986).

REFERENCES

1. I. Shatskii and V. Perepichka, *Prikl. Mekhanika Tekhn. Fizika*, **54**, No. 6: 175 (2013) (in Russian).
2. I. Shatskyi and V. Perepichka, *Proc. 22nd Int. Sci. Conf. 'Mechanika 2017' (May 19, 2017)* (Kaunas, Lithuania: 2017), p. 348.
3. I. P. Shats'kyi, O. M. Lyskanych, and V. A. Kornuta, *Strength Mater.*, **48**, No. 3: 469 (2016).
4. A. S. Velichkovich, I. I. Popadyuk, and V. M. Shopa, *Chem. Pet. Eng.*, **46**, Iss. 9-10: 518 (2011).
5. A. S. Velichkovich and T. M. Dalyak, *Chem. Pet. Eng.*, **51**, Iss. 3-4: 188 (2015).

6. O. Vlasiiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and O. Rogal, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 1(85): 25 (2017).
7. I. Steliga, J. Grydzhuk, and A. Dzhus, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, **2**, No. 7 (80): 20 (2016).
8. K. G. Levchuk, V. M. Moisyshyn, I. V. Tsidylo, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1655 (2016) (in Ukrainian).
9. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Oil Gas Sci. Technol.*, **72**, No. 5: 27-1 (2017).
10. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, and A. V. Horbatskyi, *Fiz.-Khim. Mekhanika Mater.*, **23**, No. 3: 40 (1987) (in Russian).
11. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, and L. Ya. Ropyak, *Zashchita Metallov*, **25**, No. 2: 233 (1989) (in Russian).
12. M. L. Bernshtein and V. A. Zaimovskiy, *Struktura i Mekhanicheskie Svoystva Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1970) (in Russian).
13. D. A. Collins, *Povrezhdenie Materialov v Konstruktsiyakh. Analiz, Predotvrashchenie* (Moscow: Mir: 1984) (Russian translation).
14. R. Lakes, *Viscoelasticity Notes Adapted from Viscoelastic Materials*, <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VENotes.html>
15. O. Scott-Emuakpor, T. George, C. Cross, and M.-H. H. Shen, *J. Strain Anal. Eng. Des.*, **45**, Iss. 4: 275 (2010).
16. S. K. Paul, N. Stanford, A. Taylor, and T. Hilditch, *Int. J. Fatigue*, **80**: 341 (2015).
17. *Prochnost. Ustoychivost. Kolebaniya: Spravochnik* (Eds. I. A. Birger and Ya. G. Panovko) (Moscow: Mashinostroenie: 1968), vol. 3 (in Russian).
18. K. G. Levchuk, *SOCAR Proc.*, Iss. 2: 23 (2017) (in Russian).
19. Yu. Yo. Striletskyi, *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, No. 37: 79 (2016) (in Ukrainian).
20. V. V. Panasyuk, *Mekhanika Ruynuvannya i Mitsnist Materialiv* (Lviv: Fiz.-Mekhan. Instytut im. G. V. Karpenka NAN Ukrayiny: 2001), vol. 5 (in Ukrainian).
21. H. Lamb, *Dinamicheskaya Teoriya Zvuka* [The Dynamical Theory of Sound] (Moscow: Gos. Izd. Fiz.-Mat. Lit.: 1960) (Russian translation).
22. F. S. Crawford, Jr., *Volny* [Waves] (Moscow: Nauka: 1984) (Russian translation).
23. Ya. G. Panovko, *Vvedenie v Teoriyu Mekhanicheskikh Kolebaniy* (Moscow: Nauka: 1991) (in Russian).
24. G. E. Mase, *Teoriya i Zadachi Mekhaniki Sploshnykh Sred* [Theory and Problems of Continuum Mechanics] (Moscow: Mir: 1974) (Russian translation).
25. *Mobility Analogy*, http://www.wikiwand.com/en/Mobility_analogy
26. H. A. C. Tilmans, *J. Micromech. Microeng.*, **6**, No. 3: 359 (1996).
27. I. S. Gonorovskiy, *Radiotekhnicheskie Tsepi i Signaly* (Moscow: Radio i Svyaz: 1986) (in Russian).
28. *GOST 1497-84. Metally. Metody Ispytaniy na Rastyazhenie* (Moscow: IPK Standartov: 1986) (in Russian).