

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 539.6: 66971

**ВИВЧЕННЯ КІНЕТИКИ СТРУКТУРНИХ І ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
МЕТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Слободяник А.Д., Зузяк П.М., Вінницький національний технічний університет,
м. Вінниця, Україна*

Розроблена математична модель визначення фізико-технічних параметрів металів та сплавів на їх основі. Такий підхід дозволяє встановлювати просторово-часовий розподіл дефектів структури, їх взаємодію і перерозподіл

Вступ

Створення перспективних конструкційних матеріалів і посилення їх технічної спрямованості потребує поліпшення структури шляхом пошуку і наукового обґрунтування принципово нових прогресивних технологій обробки металічних матеріалів на підставі знання механізмів і кінетики структурних та фазових перетворень з урахуванням стану кристалічної ґратки, наявності дефектів структури, їх взаємодії та перерозподілу. Такі структурні зміни і фазові перетворення відбуваються в метастабільних станах металів і сплавів. Вони супроводжуються зменшенням вільної енергії і обумовлюють перехід матеріалів у більш стабільний термодинамічний стан. Науковою базою для розробки методів отримання металічних матеріалів з підвищеними механічними та оптичними властивостями служать дослідження механізмів і кінетики перетворень, що відбуваються саме в метастабільних станах.

В останні роки з'явилися нові експериментальні методи дослідження стану електронів в металах і сплавах [1 - 3]. Застосування спектрометрів з високою роздільною здатністю дозволяє отримати важливі дані про характер симетрії електронів в зовнішніх електронних смугах металів та їх сплавів. У видимій частині спектру метали досить сильно поглинають випромінювання, маючи коефіцієнт поглинання порядку 10^5 см^{-1} . Характерною особливістю більшості металів є те, що на деякій характерній для даного металу довжині хвилі коефіцієнт поглинання значно зменшується. Таке поглинання спостерігається для чистих металів за відсутністю домішок, коли поглинання вільними електронами незначне у порівнянні з власним поглинанням [4]. Селективність поглинання випромінювання металами можна використати для оцінки фізико-механічних властивостей металів та сплавів на їх основі.

Мета та об'єкт досліджень

Проблема вивчення кінетики процесів переходу металів у стабільний зміцнений стан досі залишається актуальною. Важливо встановити механізм

цих процесів і знайти можливості керувати ними з метою отримання термодинамічно рівноважного стану зі стабільними експлуатаційними характеристиками.

Вивчення оптичних властивостей металів методами застосування оптики пояснюється їх чутливістю до різних дефектів кристалічної будови та розподілі дефектів на їх зображенні. При цьому розрізняють лінійну та кутову здатність, яка визначається відповідно мінімальною відстанню між точками і мінімальним кутом дезорієнтації двох субструктурних складових, за якими ці дефекти розрізняються на зображенні.

Оптичні методи дослідження поверхневого стану металів та сплавів на їх основі можна поділити на дві групи. Перша група характеризується локальними змінами напрямів дифрагованих променів після взаємодії з досліджуваними матеріалами. Інша група характеризується локальними змінами інтенсивності дифрагованих променів після взаємодії з досліджуваними матеріалами. До двох вказаних методів дослідження структури кристалів відносяться методи Лауе, Шульги, Брега – Баррета, Ламбо, Ланга, Бормана, методи оптики розсіюючих матеріалів та інші.

Спільним для усіх методів, з використанням відповідно розробленої методики, є унікальна можливість досліджень недосконалостей внутрішньої будови металів та їх сплавів без руйнування досліджуваних зразків. Використання цих методів дозволяє виявити дефекти упаковки, субграниці, границі зерен, далекодіючі поля зовнішніх навантажень тощо, крім того, окремі дислокації в металах та їх сплавах. В основі цих методів використовується залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від напрямку розміщення дислокацій та від ступені досконалості й орієнтації кристалічної ґратки в досліджуваних металічних матеріалах.

Для повного аналізу металічного стану речовини необхідно розглядати не тільки окремі метали, але й сплави на їх основі. Тому проблема встановлення електронної структури металів та сплавів є досить складною, невирішеною і актуальною.

Математична модель

Найбільш розповсюджений метод вивчення структури речовини полягає в дослідженні розподілу випромінювання, розсіяного при його зіткненні з атомами мішені. Експериментальні дані завжди порівнюються з результатами розрахунків, що базуються на квантовій теорії розсіяння. В основі квантової теорії розсіяння є рівняння Шредінґера

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi. \quad (1)$$

Якщо випромінювання взаємодіє з мішенню, яка складається з N однакових частинок, то гамільтоніан такої системи має вигляд:

$$H = H_0 + V; \quad H_0 = H_n + H_A, \quad (2)$$

де H_n – гамільтоніан поширення падаючого випромінювання;

H_A – гамільтоніан мішені, яка складається з N частинок;

V – взаємодія падаючого випромінювання з усіма частинками мішені, причому

$$V = \sum_{\alpha=1}^N V_{\alpha} = \sum_{\alpha=1}^N V(r_n - r_{\alpha}), \quad (3)$$

де r_n – оператор положення падаючого випромінювання;

r_{α} – оператор положення частинки мішені.

Розв'язок рівняння Шредінгера дає можливість визначити диференціальний переріз, що припадає на одиничний інтервал енергії розсіяного випромінювання [5]

$$\frac{d\sigma(\theta)}{dE} = N\alpha^2 \frac{k_f}{k_i} S(k, \omega), \quad (4)$$

$$\text{де } S(k, \omega) = \frac{1}{2\pi\hbar N} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t) \sum_{\alpha, \beta} \langle \langle \exp\{-ikr_{\alpha}(0)\} \exp\{ikr_{\beta}(t)\} \rangle \rangle dt;$$

$d\sigma(\theta)$ – диференціальний переріз;

α – довжина розсіяння падаючого випромінювання;

k_f – імпульс фотона після розсіяння;

k_i – імпульс падаючого фотона;

$S(k, \omega)$ – динамічний структурний чинник.

Експериментальне вимірювання диференціального перерізу, що входить у формулу (4) дає можливість визначити динамічний структурний чинник $S(k, \omega)$. Такий підхід дозволяє встановлювати структуру просторово-часового розподілу атомів в мішені досліджуваних металів та сплавів на їх основі застосовуючи метод внутрішнього тертя [6-7].

Колір металу визначається залежністю його коефіцієнта дифузного відбивання $R(\omega)$ від частоти: деякі частоти відбиваються краще ніж інші. Відмінність кольору міді, цинку, та алюмінію вказує на те, що залежність коефіцієнта відбивання від частоти може суттєво змінюватись при переході від одного металу до іншого. Визначення коефіцієнта дифузного відбивання $R(\omega)$ методами розсіюючого випромінювання дозволяє визначити зміну фізико-механічних параметрів металів та їх сплавів в полях зовнішніх напружень. Такими параметрами, що залежать від структурних та фазових змін металу та сплаву в полях зовнішніх напружень, є електропровідність та теплопровідність металу, мікротвердість.

З теорії електромагнітних хвиль випливає, що коефіцієнт відбивання $R(\omega)$ металу визначається його провідністю, яка залежить від частоти ω

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau}, \quad \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m},$$

де σ_0 – статична електропровідність металу;

n – концентрація електронів в одиниці об'єму;

$$\tau = \frac{m}{\rho n e^2} \text{ – час релаксації;}$$

ρ – питомий опір.

Структура коефіцієнта відбивання за моделлю вільних електронів є досить спрощеною, щоб пояснити характерні різкі зміни досліджуваних коефіцієнтів відбивання реальних металів та їх сплавів. Такі зміни коефіцієнта відбивання пов'язані з різного роду механізмами поглинання енергії. У моделі вільних електронів залежність коефіцієнта відбивання від частоти зумовлена тільки поглинанням енергії в наслідок зіткнення випромінювання з вільними електронами. В такій моделі не враховується, що при зіткненні випромінювання з електронами частина енергії поглинається електронами і перетворюється в теплову. Крім того, такий ефект проявляється на різних частотах, що не дає можливості виявити характерних особливостей різких змін коефіцієнта відбивання металів.

Взаємодію випромінювання з вільними електронами зручно представити, як потік фотонів з енергією $\hbar\omega$, здатних зумовити перехід електронів з одного рівня на інший $E' = E + \hbar\omega$. Для зміни енергії електрона на величину $\hbar\omega$, він повинен перейти з однієї зони в іншу. Мінімальна енергія $\hbar\omega$, яка необхідна для міжзонного переходу електронів, визначається за формулою [8]

$$\hbar\omega = \frac{\hbar^2}{2m}(2k_0 - k_F)^2 - \frac{\hbar^2}{2m}k_F^2,$$

де k_0 – довжина відрізка ГN між центром зони Бріллюена і серединою грані зони;

k_F – радіус сфери Фермі.

Розрахунок мінімальної енергії міжзонного переходу представлено на рис.1.

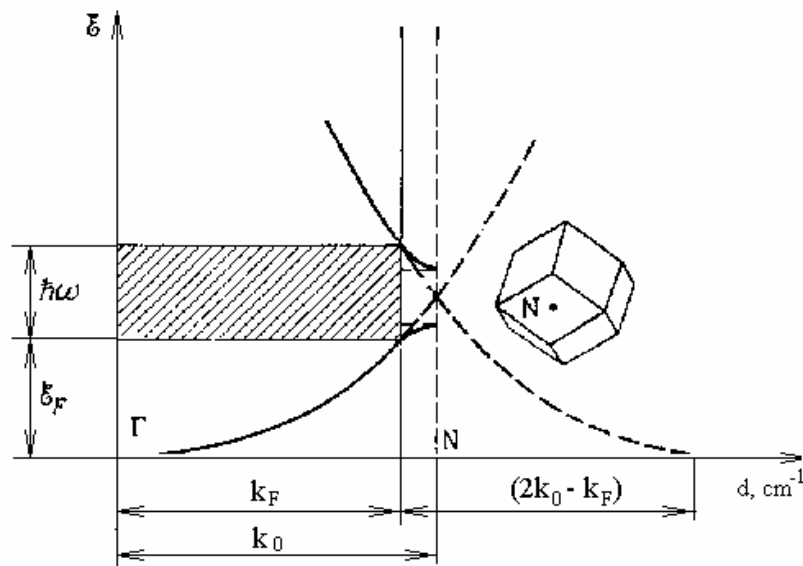


Рисунок 1 – Розрахунок мінімальної енергії міжзонного переходу металів за моделлю вільних електронів

При застосуванні такого підходу визначення параметрів зонної структури за оптичними властивостями є доступним, але не для всіх металів його можна провести безпосередньо. У багатовалентних металах на поверхні Фермі знаходяться точки, де зона провідності перекривається сусідньою зоною. Тому перехід електронів між зонами відбувається при менших енергіях, що призводить до зникнення чіткої межі міжзонного переходу.

Розроблена математична модель визначення фізико-технічних параметрів металів та сплавів на їх основі дозволяє встановлювати просторово-часовий розподіл дефектів структури, їх взаємодію і перерозподіл.

Висновки

1. Вирішується проблема підвищення міцності металів та їх сплавів шляхом визначення спектральних коефіцієнтів дифузного відбивання в умовах зовнішніх навантажень та при їх термоциклюванні.

2. Для визначення фізико-технічних параметрів металів створена математична модель, що дозволяє визначити динамічний структурний чинник $S(k, \omega)$. Такий підхід дозволяє встановлювати структуру просторово-часового розподілу атомів в мішені досліджуваних металів та сплавів на їх основі застосовуючи метод внутрішнього тертя.

3. Отримані результати дають можливість здійснювати подальші дослідження міцностних властивостей металів на основі встановлення їх внутрішньої будови за розсіяним випромінюванням.

Література

1. Гаврилюк К.В., Маяковський Є.А. Структурочутливі особливості бінарних сплавів системи Al-Cu // *Металознавство і обробка металів*. - 2001. - № 3. - С.61-68.
2. Зузяк П.М., Лисий М.В. Особливості внутрішнього тертя волокнистих композиційних матеріалів // *Фізика прочності і пластичності. Металлофізика і новейші технології*. -2000. - Т.24, №6. - С.843-848.
3. Коротаев А.Д., Дударев Е.Ф. и др. Некоторые актуальные проблемы физики пластичности и прочности моно- и поликристаллов // *Известия высших учебных заведений*. - 1998. -№ 8. - С5-15.
4. Дехтяр И.Я., Немошкаленко В.В. Электронная структура и электронные свойства переходных металлов и их сплавов. - К.: Наукова думка, 1971. - 304 с.
5. С.Сунакава. Квантовая теория рассеяния: Пер. с яп. - М.: Мир, 1979. - 268 с.
6. Гордиенко Л.К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов.- М.: Наука, 1973. -223 с.
7. Зузяк П.М., Білюк А.І., Ходак В.Й. та ін. Закономірності зміни механічних характеристик систем Al-Cu і Al-Zn під час еволюції субструктури // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. -2002. - №3. - С.119-121.
8. Ашкрофт Н., Мермін Н. Фізика твердого тела: Пер. с англ. -М.: Мир, 1979. - 399 с.

Слободяник А.Д., Зузяк П.М. Изучение кинетики структурных и фазовых превращений металлических материалов Разработана математическая модель определения физико-технических параметров металлов та сплавов на их основе. Такой подход разрешает устанавливать пространственно-часовое распределение дефектов структуры, их взаимодействие и перераспределение.	Slobodyanyk A.D., Zuzyak P.M. Kinetic study of structural and phase transformations of metal materials There had been developed the mathematical model for determining and technical parameters of materials and ferrons on their basis. Such an approach the special and time distribution of structure failures, their interaction and redistribution allows to determine.
--	--

*Надійшла до редакції
18 червня 2005 року*

УДК 681.7.013.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЛЬЕФНЫХ ТРАСС

Агалиди Ю.С., Левый С.В., Мачнев А.М., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

Представлены результаты экспериментальной оценки чувствительности и достоверности средств магнитооптической визуализации рельефных трасс на фоне рельефа поверхности ферромагнитного листового проката, с учётом фактора толщины неферромагнитного покрытия

Вступление

Чувствительность и достоверность являются базовыми понятиями и основными характеристиками неразрушающего контроля [1]. Очевидно, что появление новых методов (или применение известных методов по отношению к нерегламентированным для них классам или параметрам дефектов, новым условиям применения) должно сопровождаться новой оценкой их чувствительности и достоверности.

В данной статье исследуются характеристики магнитооптических средств [2] при визуализации полей рассеяния (обусловленных рельефом поверхности ферромагнитных изделий) сквозь слой неферромагнитного покрытия. Решение подобного рода задач необходимо, например, при экспертно-криминалистических исследованиях автотранспорта, когда требуется неразрушающими методами наблюдать рельефные трассы на поверхности металла кузова под слоем лакокрасочного покрытия. Обычно подобного рода исследования выполняют при оценке подлинности идентификационного номера автомобиля. Характер рельефа металлической поверхности в этом случае определяется сочетанием рельефа заготовки (прокатного листа) с рельефом штамповки кузовных деталей, на фоне которого эксперт-криминалист выявляет трассы последующей обработки или последствий взаимодействия с другими объектами.

Постановка задачі

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование средств магнитооптической визуализации рельефа поверхности по показателям чувствительности и достоверности с учетом фактора толщины неферромагнитного покрытия и фактора типичной шероховатости поверхности. Таким образом экспериментально исследовалась задача обнаружения сигнала (рельефных трасс) на фоне шума (рельефа поверхности заготовки) в условиях искажений (ослабления сигнала, обусловленного толщиной покрытия). Полученные значения данных показателей не характеризует в полном объеме достоверность экспертного решения, поскольку последняя определяется не только качеством визуализации, но и экспертной базой знаний, подходами к интерпретации, набором решающих правил. В то же время полученные значения чувствительности и достоверности визуализации могут выступать в виде количественного показателя качества данных, представляемых для экспертного исследования.

Описание тест-объекта и экспериментальной установки

Анализ нормативно-технической литературы [3-5], показывает, что для оценки чувствительности неразрушающего контроля используются образцы, содержащие искусственно созданные дефекты требуемых типов и размеров.

Для экспертно-криминалистических исследований автотранспорта характерным может считаться образец (тест-объект) выполненный на пластине тонколистовой кипящей стали марки 08кп ГОСТ 1577-70 толщиной 1мм и содержащий на поверхности набор рельефных трасс и символов с различными геометрическими параметрами профиля, в том числе – соответствующими предельным значениям диапазона трассологических объектов. Шероховатость поверхности заготовки по ГОСТ 16523-97 для III группы отделки не нормируется, - по результатам измерения Ra 12,6 мкм.

Фотографическое изображение поверхности тест-объекта (рис. 1) даёт наглядное представление о типе и расположении трасс и рельефных знаков. Трасса поз. 1 имеет профиль треугольного сечения ($2b_d = 100$ мкм; $h_d = 50$ мкм), что соответствует минимальному размеру рельефа, представляющему интерес для трассологических исследований. Трасса поз. 1* аналогична по геометрическим параметрам дефекту поз. 1, но ориентирована параллельно оси намагничивания. Трасса поз. 2 имеет профиль треугольного сечения ($2b_d = 300$ мкм; $h_d = 150$ мкм) и считается промежуточной для распределения трассологических сигналов объекта. Формообразование профиля трасс поз. 1, 1*, 2 выполнено путём бороздкования поверхности объекта, вследствие чего, по краям бороздки образованы валики металла, особенно значительные в случае трассы поз.2. Символ маркировки поз. 3 выполнены путём рельефного клеймления с использованием клейм шрифта размера 6мм. Параметры сечения символа шрифта: профиль треугольного сечения ($2b_d = 800$ мкм; $h_d = 400$ мкм), что соответствует максимальному размеру исследуемого рельефа.

Экспериментальные исследования заключались в выполнении магнитооптической визуализации рельефа поверхности тест-объекта в соответствии с

принципами способа [2]: в результате копирования (запись с подмагничиванием) полей рассеяния объекта на промежуточный магнитный носитель и последующей визуализации полученной копии в поляризованном свете с использованием магнитооптического эффекта Фарадея. В виде датчика - визуализатора магнитного поля, использован тонкоплёночный кристалл висмутсодержащего ферритграната состава $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.



Рисунок 1 – Тест-объект, содержащий рельефные трасы и знаки (фотографическое изображение поверхности)

Результаты магнитооптической визуализации магнитной копии поверхности тест-объекта (без покрытия) приведены на рис. 2а. Для имитации фактора толщины лакокрасочного покрытия были выполнены ещё три магнитных копии поверхности с использованием дистанцирующих неферромагнитных прокладок: толщиной 120 мкм и 180 мкм, что соответствует предельным значениям толщины лакокрасочного покрытия автомобилей по производственным нормам; а также толщиной 240 мкм, что соответствует существенному отклонению от производственных нормалей. Результаты магнитооптической визуализации этих копий представлены на рис. 2б – г. Оценка гистограмм яркости полученных изображений позволила получить распределения амплитуд шума и сигнала для всех типов трасс, пример распределений для рельефного символа поз. 3 представлен на рис. 2.

Качественная оценка полученных результатов показывает, что различимость трасс падает по мере увеличения дистанцирующей прослойки, что целиком согласуется со свойствами теоретической модели полей рассеяния поверхностных дефектов (несплошностей) [6]. Кроме того, распределения амплитуд шума и сигнала, приведенные на рис. 1б – г для символа поз.3, показывают, что имеет место децентровка распределений сигнала относительно шума («серого» фона). Смещение распределения сигнала в сторону «чёрного» также объясняется в рамках модели [6], поскольку амплитуда продольной составляющей поля рассеяния поверхностного дефекта имеет максимум в центральном сечении дефекта (область «чёрного» центра дефекта при визуализации), превосходящий по абсолютной величине амплитуды минимумов у кромок дефекта (области «белого» оконтуривания дефекта при визуализации).

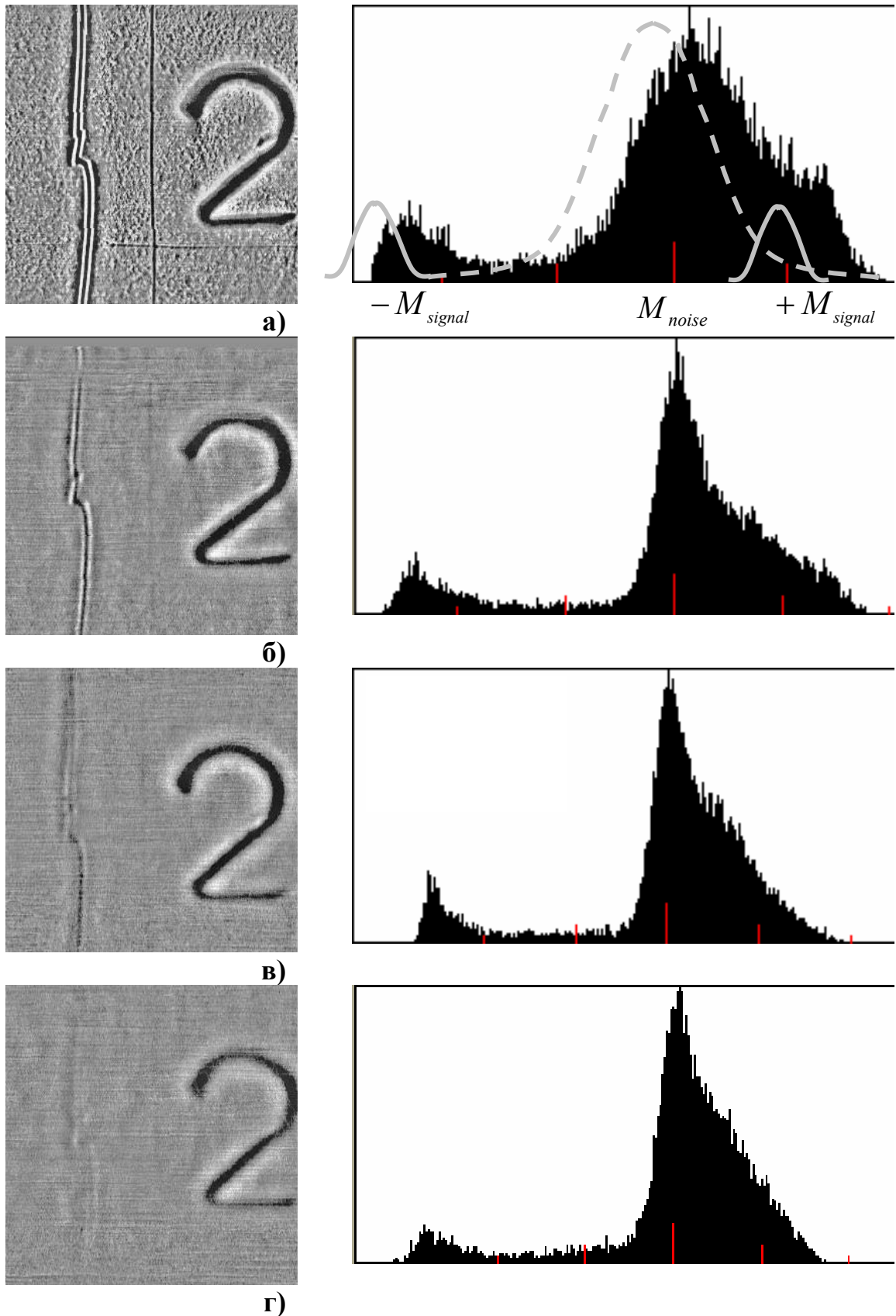


Рисунок 2 – Результати магнітооптичної візуалізації рельєфа тест-об'єкта, розподілення амплітуд шуму і сигналу (в області рельєфного знака поз. 3) для різних товщин покриття: а) – 0 мкм; б) – 120 мкм; в) – 180 мкм; г) – 240 мкм

Обработка экспериментальных данных

Для оценки достоверности обнаружения рельефных изображений были построены распределения амплитуд шума и сигнала. Была проверена гипотеза, что распределение шума мало отличается от нормального – проверка квантилей уровней δ и 2δ показала, что соответствующие вероятности отличаются не более чем на 0.02 от вероятностей, получаемых для соответствующих квантилей нормального распределения.

В качестве порога принятия решения было принято значение, при котором ошибка ложного обнаружения равна ошибке пропуска сигнала. Значение квантиля соответствующего табличным значениям квантиля [7] для нормального распределения с параметрами $(0, 1)$ рассчитывалось так:

$$u_p = \frac{|M_{signal} - M_{noise}|}{\delta_{signal} + \delta_{noise}}, \quad (1)$$

где $M_{noise}, \delta_{noise}$ – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение для шума,

$M_{signal}, \delta_{signal}$ – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение для сигнала.

В таблицах 1 - 4 приведены результаты вероятности правильного обнаружения символа и трасс (рис. 1, поз. 1-3), при этом использовано значение M_{signal} соответствующее («чёрному») центру трассы ($-M_{signal}, \delta_{signal}$ рис.2а).

Таблица 1

Параметры распределений сигнала и шума, вероятность правильного обнаружения символа (рис. 1, поз. 3) в зависимости от толщины покрытия

№	Объект	M_{noise}	δ_{noise}	M_{signal}	δ_{signal}	u_p	P
1	Без покрытия	143,8	23,4	27,2	12,9	3,19	>0.999
2	Покрытие 120 мкм	143,9	7,3	36,3	17,2	4,38	>0.999
3	Покрытие 180 мкм	144,4	6,1	40,7	10,4	6,30	>0.999
4	Покрытие 240 мкм	144,8	5,8	35,7	11,1	6,39	>0.999

Таким образом, по критерию превышения порогового уровня значением амплитуды сигнала в текущей точке изображения, обеспечивается обнаружение рельефного символа поз. 3 с вероятностью не хуже, чем 0.99 для всех вариантов покрытия.

Для других вариантов рельефных изображений вероятность изменяется в широких пределах и зависит от толщины покрытия, в некоторых случаях обнаружение по пороговому принципу вообще невозможно, так как распределения сигнала и шума полностью перекрываются.

Таблица 2

Параметры распределений сигнала и шума, вероятность правильного обнаружения трассы (рис. 1, поз. 2) в зависимости от толщины покрытия

№	Объект	M_{noise}	δ_{noise}	M_{signal}	δ_{signal}	u_p	P
1	Без покрытия	143,8	23,4	49,4	11,9	2,66	>0.99
2	Покрытие 120 мкм	143,9	7,3	75,5	13,4	3,29	>0.999
3	Покрытие 180 мкм	144,4	6,1	99,2	14,9	2,16	>0.98
4	Покрытие 240 мкм	144,8	5,8	143,5	10,1	0,08	>0.53

Таблица 3

Параметры распределений сигнала и шума, вероятность правильного обнаружения трассы (рис. 1, поз. 1) в зависимости от толщины покрытия

№	Объект	M_{noise}	δ_{noise}	M_{signal}	δ_{signal}	u_p	P
1	Без покрытия	143,8	23,4	41,6	12,6	2,82	>0.99
2	Покрытие 120 мкм	143,9	7,3	137,2	9,1	0,41	>0.65
3	Покрытие 180 мкм	Обнаружение невозможно					
4	Покрытие 240 мкм	Обнаружение невозможно					

Таблица 4

Параметры распределений сигнала и шума, вероятность правильного обнаружения трассы (рис. 1, поз. 1*) в зависимости от толщины покрытия

№	Объект	M_{noise}	δ_{noise}	M_{signal}	δ_{signal}	u_p	P
1	Без покрытия	143,8	23,4	132,9	16,0	0,27	>0.6
2	Покрытие 120 мкм	Обнаружение невозможно					
3	Покрытие 180 мкм	Обнаружение невозможно					
4	Покрытие 240 мкм	Обнаружение невозможно					

В то же время очевидно, что при экспертных исследованиях, когда решение об обнаружении сигнала выполняет оператор-эксперт, минимальное значение обнаруживаемого сигнала будет определяться не только отношением сигнал/шум полученного изображения, но и рядом других плохо формализуемых факторов, поскольку при обнаружении используются свойства зрения и особенности психофизиологической обработки визуальной информации, опыт экспертной практики, интуиция.

Так, по результатам експертних оценок, трасса поз. 1 уверенно обнаруживается при дистанцировании в 120 мкм, а трасса поз. 2 - при дистанцировании в 240 мкм.

Таким образом, предельную чувствительность средств визуализации рельефа поверхности в данном случае целесообразно оценивать по двум критериям:

- 1) Минимальный размер дефекта, обнаруживаемый с заданной достоверностью на заданной дистанции по пороговому принципу.
- 2) Минимальный размер дефекта, обнаруживаемый на заданной дистанции по экспертным оценкам (достоверность не нормируется).

В таблице 5 приведены результаты предельной чувствительности магнитооптических средств визуализации рельефа поверхности при вероятности правильного обнаружения $P > 0,99$ для порогового принципа, а также экспертные оценки этого показателя.

Таблица 5

Предельная чувствительность магнитооптических средств визуализации рельефа в зависимости от толщины покрытия

№	Объект	Минимальный размер дефекта ($2b_d \times h_d$), мкм	
		Пороговый контроль	Экспертные оценки
1	Без покрытия	100 x 50	< 100 x 50
2	Покрытие 120 мкм	300 x 150	\approx 100 x 50
3	Покрытие 180 мкм	800 x 400	< 300 x 150
4	Покрытие 240 мкм	800 x 400	\approx 300 x 150

Полученные результаты определяют уровень чувствительности магнитооптических средств [2] для описанных условий применения. Эти результаты не определяют условный уровень чувствительности магнитооптического метода, поскольку на экспериментальном уровне решалась задача практического характера – оценка влияния толщины покрытия на качество визуализации рельефа.

Тем не менее, оценка условного уровня чувствительности магнитооптического метода представляется актуальной задачей, поскольку результаты сравнения экспериментальных данных магнитопорошкового и магнитооптического методов при исследованиях остаточных напряжений показывают [8], что последний имеет перспективу использования в качестве метода измерения и неразрушающего контроля.

Выводы

1. По результатам анализа экспериментальных данных магнитооптический метод позволяет, по критерию превышения порогового уровня значением амплитуды сигнала в текущей точке изображения, выявление рельефных трасс на фоне рельефа прокатного листа ($Ra \approx 12,6$ мкм) при вероятности правильного обнаружения $P > 0.99$: профиль треугольного сечения $2b_d = 100$ мкм $h_d = 50$ мкм

без покриття; профіль трикутного сечення $2b_d = 300$ мкм $h_d = 150$ мкм при товщині покриття 120 мкм; профіль трикутного сечення $2b_d = 800$ мкм $h_d = 400$ мкм при товщині покриття 240 мкм.

2. Очевидно, что значения показателей чувствительности могут быть улучшены и приближены к результатам экспертных оценок путём применения более сложных алгоритмов обработки изображений (оптимальной фильтрации, накопления сигнала вдоль трассы и т.п.).

3. Представляется актуальной задача определения условного уровня чувствительности магнитооптического метода, например, с использованием стандартного контрольного образца для оценки чувствительности магнитопорошкового метода.

Литература

1. ДСТУ 2865-94. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення; Затвердж. та введ. 08.12.1994 вперше – К.: Держстандарт України. 1995 - 51с.
2. Патент на винахід (Україна) №42880 від 15. 11. 2001р., Бюл. №10, 7G 01N 27/82, 27/83: Спосіб магнітооптичного контролю виробу. Заявники патенту: Левий С.В., Агаліді Ю.С. По заявці № 99074257, від 22.07.1999. Приоритет від 05.10.2001. Автори винаходу: Левий С.В., Агаліді Ю.С.
3. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод; Введ. 01.01.1988 взамен ГОСТ 21105-75; Переизд. (апрель 1992 г.) с Изменением № 1, утвержденным в сентябре 1989 г. (ИУС 1-90) – М.: Изд-во стандартов. 1992 - 17с.
4. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые; Введ. 01.01.1988 взамен ГОСТ 14782-76, ГОСТ 22368-77 – М.: Изд-во стандартов. 1990 - 24с.
5. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиграфический метод; Введ. 01.01.1984 взамен ГОСТ 7512-75; Переизд. (декабрь 1994 г.) с Изменением № 1, утвержденным в марте 1988 г. (ИУС 6-88).– М.: Изд-во стандартов. 1990 - 22с.
6. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. - 265с.
7. Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. Математическая статистика – М. «Высшая школа» 1984г. - 248с.
8. Агаліди Ю.С., Левий С.В., Мачнев А.М. Сравнительный анализ магнитопорошкового и магнитооптического методов визуализации пространственного распределения магнитного поля при исследовании остаточных напряжений // Вісник НТУУ „КПІ”, серія Приладобудування. – 2006. – Вип.. 31. – С. 18 – 24.

Агаліді Ю.С., Левий С.В., Мачнев О.М. **Експериментальна оцінка чутливості та вірогідності магнітооптичної візуалізації рельєфних трас**

Наведено результати експериментальної оцінки чутливості та вірогідності засобів магнітооптичної візуалізації рельєфних трас на фоні рельєфу поверхні ферромагнітного листового прокату, із урахуванням фактору товщини неферромагнітного покриття.

Agalidy U., Lyevyu S., Machnyev A. **Experimental estimation of sensibility and validity of magnetic optical visualization of relief traces.**

Results of experimental estimation of sensibility and validity of magnetic optical tools are presented for relief traces on the background of ferromagnetic sheet products relief surface with an allowance for non-ferromagnetic cover.

*Надійшла до редакції
15 березня 2006 року*

УДК 681.2:621.3.082.1

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МЕТОД ВИМІРУ ЩІЛЬНОСТІ РІДИН, ГАЗІВ ТА ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

*Тараненко Ю.К., Дніпропетровський університет економіки і права,
м. Дніпропетровськ, Україна*

У роботі розглянуто диференційний метод виміру щільності рідин, газів та дисперсних систем, оснований на перетворення вимірювальної величини у різницю частот коливань механічних резонаторів, що контактують із вимірювальним середовищем

Аналіз рівня розробки віброчастотних методів автоматичного контролю щільності та постановка задачі дослідження

Граничною межею досягнення точності вимірів є точність відтворення еталонних величин. Тому, якщо порівняти точність відтворення еталонів аналогових величин сили струму $(4 \div 6) \cdot 10^{-4} \%$ та опору $1 \cdot 10^{-4} \%$ з точністю відтворення частоти коливань $5 \cdot 10^{-9} \%$ [1], можна зробити висновок, що гранично досяжна точність частотних вимірювальних систем значно вище за точність аналогових вимірювальних систем.

Частотна форма вихідного сигналу вимірювального перетворювача забезпечує передачу вимірювальної інформації до місця її централізованої обробки з мінімальними не зворотними втратами. Використання атестованої звукової карти персонального комп'ютера у якості аналого-цифрового перетворювача сигналів частотних датчиків відкриває додаткові можливості по обробці вимірювальної інформації від частотних датчиків. Основним елементом частотних датчиків, або первинних вимірювальних перетворювачів є частотнезалежний коливальний контур з параметрами, залежними від вимірювальної величини. Розрізняють частотні датчики з електричними та механічними коливальними контурами.

Основним параметром, якій визначає точність перетворення вимірювальної величини у частоту коливань є добротність коливального контуру, яка визначає втрати коливальної енергії за період. Добротність механічних коливальних систем значно вища за добротність електричних коливальних контурів [2], тому первинні вимірювальні перетворювачі на основі електромеханічних коливальних контурів є найбільш перспективними.

Основним чутливим елементом електромеханічного коливального контуру є резонатор. Серед резонаторів, які застосовуються у технологічних вимірюваннях особливе місце займають резонатори камертонного типу, добротність яких може досягати десятків тисяч.

Автором статті зроблено біля 80 винаходів у галузі віброчастотних вимірювань технологічних параметрів таких, як рівень рідких та сипучих середовищ у технологічних апаратах [3], тиск та зусилля [4], температура [5], в'язкість та щільність рідин, масова концентрація дисперсних систем [6].

Для вирішення задач енергозбереження точні виміри щільності газу, нафти та нафтопродуктів мають особливе значення, тому що, наприклад, масові витрати, нафтопродуктів визначають як результат перемноження щільності на їх об'ємні витрати. Відомо, що підвищення точності вимірювання кількості газу тільки на кордоні Росія - Україна всього лише на 0,1 % може заощадити Україні щорічно понад 10 млн. доларів США.

Світовим лідером щодо розробки та виробництва віброчастотних вимірювачів щільності рідин є фірма Solartron (Велика Британія) [7]. За досягненнями цієї фірми можна зробити обґрунтований висновок щодо світового рівня віброчастотних методів виміру щільності узагалі. Так віброчастотні вимірювачі щільності з трубчастими резонаторами моделей 7830 та 7840 мають додаткову похибку від зміни температури $1,2 \text{ кг/м}^3$ на 1°C , та від зміни тиску вимірювальної рідини, а відповідно і швидкості її течії через резонатор $5 \div 15 \text{ кг/м}^3$ на 1 МПа, що для задач обліку енергоносіїв є не бажаним. Хоча у вимірювачах щільності рідини і використовується датчики температури та тиску рідини і сучасний мікропроцесор, унаслідок запізнення сигналів компенсації додаткову похибку не вдається знизити нижче приведенного рівня.

Виходом із становища, що склалося, може бути використання винайденого автором диференційного віброчастотного методу виміру щільності рідини на основі двох резонаторів, якій дозволяє знизити не тільки додаткову похибку від впливу температури і тиску вимірювальної рідини, але й інші адитивні складові похибки виміру, та здійснити додаткову лінеаризацію функції перетворення безпосередньо у датчику при відніманні частот коливань резонаторів [8].

Науковою новизною роботи є те, що вперше у теорії віброчастотних вимірювань щільності рідин та газів використовується диференційний метод виміру з керованим відношення частот резонаторів у завданій точці діапазону виміру, з метою здійснення повної компенсації основних складових погрішності виміру та лінеаризації функції перетворення щільності у різницю частот коливань резонаторів.

Метою даної статті є ознайомлення широкого загалу фахівців приладобудівної галузі з новим диференційним віброчастотним методом виміру щільності рідин газів та дисперсних систем на прикладі керування відношенням частот трубчастих, пластинних та циліндричних резонаторів.

Загальні засади керування частотами коливань резонаторів диференційного датчика

Завдане відношення частот коливань резонаторів диференційного датчика у певній точці діапазону виміру щільності, згідно винайденому автором способу виміру [8], забезпечує умови компенсації складових похибок виміру щільності рідини. Для компенсації не інформативного параметра [9], або забезпечення додаткових умов зменшення нелінійності функції перетворення [10, 11], відношення частот коливань резонаторів повинно відповідати певним співвідношенням.

Для компенсації складових погрішності виміру таке відношення набуває вигляду:

$$\frac{f_1(\rho_K)}{f_2(\rho_K)} = \frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \quad (1)$$

де $\phi_A(\rho_K)$, $\phi_B(\rho_K)$ – коефіцієнти впливу не інформативного параметра на частоту коливань резонаторів;

ρ_K – величина щільності вимірювальної рідини або газу, при якій здійснюється повна компенсація впливу не інформативного параметру.

Коефіцієнти $\phi_A(\rho_K)$, $\phi_B(\rho_K)$ можна визначити теоретично або експериментально, або визначити теоретично і уточнити експериментально.

Забезпечення виконання умов (1) підбором конструктивних параметрів резонаторів диференційного датчика обмежує галузі застосування останнього, оскільки після виготовлення резонаторів датчик постає придатним тільки для визначених умов експлуатації та діапазону виміру щільності.

Автором розроблено спосіб керування величиною відношення частот резонаторів змінами зусиль N , що діють уздовж осі трубчастого резонатора, по периметру закріплення пластинного резонатора, у повздовжньому та коловому напрямку серединної поверхні циліндричного резонатора [12, 13].

Розроблений спосіб дозволяє на одній парі резонаторів забезпечити високу точність вимірів щільності рідин та газів диференційним датчиком, на різних діапазонах зміни щільності та у різних умовах експлуатації керуванням відношенням частот резонаторів.

Загальні засади керування частотами коливань резонаторів диференційного датчика полягають у наступному:

- вузол зміни частоти коливань резонатора керує його жорсткістю та знаходиться у центрі мас коливальної системи резонатора;
- підвищується частота резонатора з більшою чутливістю до вимірювальної щільності рідини, а зменшується частота резонатора з меншою чутливістю до щільності;
- бажано керувати частотою тільки одного резонатора;
- зусилля, що генеруються вузлом зміни частоти коливань повинні бути стабільними у часі та інваріантними до параметрів навколишнього середовища.

Керування величиною відношення частот коливань трубчастих резонаторів у завданій точці діапазону виміру щільності

Трубчасті резонатора проточного типу є найбільш розповсюдженими у віброчастотних вимірювачах щільності унаслідок нечутливості до в'язкості вимірювальної рідини.

Скористаємося відомими співвідношеннями для частот коливань трубчастих резонаторів проточного типу [14].

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}} - f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}}; f_2 = f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} - f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де f_D – вихідний частотний сигнал диференційного датчика;

N_{KA} – розтягуючі зусилля, що діють з боку вузла зміни жорсткості резонатора;

N_{KB} – стискаючі зусилля, що діють з боку вузла зміни жорсткості резонатора;

f_{01}, f_{02} – частоти коливань порожніх резонаторів;

c_1, c_2 – постійні величини які залежать від форми коливань та умов закріплення резонаторів, наприклад для жорсткого закріплення кінців та першої форми коливань $c_1 = c_2 = 2,458 \cdot 10^{-2}$;

J_A, J_B – статичні моменти інерції розчину трубки резонаторів відносно осі коливань;

E_A, E_B – модулі пружності матеріалів резонаторів;

L_1, L_2 – довжини резонаторів;

A, B – сталі для градування резонаторів, які розраховують теоретично при проектуванні та уточнюються експериментально після виготовлення резонаторів.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} , що забезпечують компенсацію впливу неінформативних параметрів, послідовно підставимо системи рівнянь (2) та (3) у співвідношення (1), отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2} \quad (4)$$

$$N_{KB} = \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} - \left[\frac{\phi_A(\rho_K)}{\phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (5)$$

Методика експериментального забезпечення завданого відношення частот резонаторів диференційного датчика

Із співвідношення (4) або (5) за експериментально уточненими параметрами резонаторів A, B, f_{01}, f_{02} розраховують необхідні зусилля, для того, щоб оцінити можливості їх забезпечення вузлом зміни жорсткості та не зруйнувати резонатори.

Слід зазначити, що вузол зміни жорсткості змінює частоти саме порожніх резонаторів f_{01}, f_{02} , які визначаються експериментально та можуть бути оцінені теоретично за співвідношеннями:

$$f_{01}'' = f_{01} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}}$$

$$f_{02}'' = f_{02} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}}$$

де f_{01}'', f_{02}'' – змінені вузлом зміни жорсткості частоти коливань порожніх резонаторів.

Змінюючи f_{01}'' або f_{02}'' шляхом використання п'єзоелектрика або пропорційного цифрового перетворювача сили, забезпечують виконання одного із наступних рівнянь:

$$\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} = \frac{f_{01}''}{f_{02}''} \cdot \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K}}$$

$$\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} = \frac{f_{01}'}{f_{02}'} \cdot \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K}}$$

Керування величиною відношення частот коливань пластинних резонаторів диференційного датчика у завданій точці діапазону виміру щільності

Використання пластинних резонаторів заглибного типу у віброчастотних вимірювачах щільності рідини робить останні мобільними тому, що не потребує спеціальних обвідних трубопроводів. Розташовані у спеціальному корпусі резонатори заглиблюються у технологічний апарат або трубопровід великого діаметру за допомогою штанг.

Скористаємося відомими співвідношеннями для частот коливань пластинних резонаторів [14].

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матимуть наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \end{aligned} \right\}; \quad (10)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\}; \quad (11)$$

де G_A, G_B – циліндричні жорсткості пластин резонаторів;

a_1, a_2 – радіуси круглих пластин резонаторів;

c_1, c_2 – параметри резонаторів, що залежать від умов закріплення та форми коливань, наприклад для першої форми при закріпленню по периметру пластини $c_1 = c_2 = 6,64 \cdot 10^{-2}$.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} послідовно підставимо системи рівнянь (10) та (11) у співвідношення (1), тоді отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{G_A}{c_1 \cdot a_1^2} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{G_A}{c_1 \cdot a_1^2} \quad (12)$$

$$N_{KB} = \frac{G_B}{c_2 \cdot a_2^2} - \left[\frac{\phi_A(\rho_K)}{\phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{G_B}{c_2 \cdot a_2^2} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (13)$$

Після розрахунку зусиль за співвідношеннями (12), (13) та їх оцінки встановлення необхідного відношення частот коливань резонаторів здійснюється експериментально за розглянутою вище методикою.

Теоретично оцінити частоти порожніх резонаторів можна з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} f_{01} &= f_{01} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}} \\ f_{02} &= f_{02} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned}$$

Керування величиною відношення частот коливань циліндричних резонаторів диференційного датчика щільності рідини у завданій точці

діапазону виміру щільності

Циліндричні резонатори застосовуються переважно у вимірювачах щільності газів. Від трубчастих та пластинних їх відрізняє висока чутливість до вимірювальної щільності та технологічність виготовлення.

Системи порушення автоколивань циліндричних резонаторів значно складніші. Незважаючи на це, віброчастотні вимірювачі щільності рідин на основі циліндричних резонаторів мають важливе значення при конструюванні аналітичних приладів.

Для циліндричних резонаторів диференційного датчика колові зусилля N_S^1, N_S^2 у двічі більше за повздовжні зусилля N_Z^1, N_Z^2 згідно співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} N_S^1 &= 2 \cdot N_Z^1 = 2 \cdot N_{KA}, \\ N_S^2 &= 2N_Z^2 = 2 \cdot N_{KB}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Скористаємося відомими співвідношеннями для перших основних частот коливань циліндричних резонаторів [14] з урахуванням системи (14)..

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A+\rho_K}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B+\rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A+\rho_K}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B+\rho_K}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A+\rho_K}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B+\rho_K}} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A+\rho_K}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B+\rho_K}} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де a_1, a_2 – радіуси серединної поверхні циліндрів;

h_1, h_2 – товщина стінок циліндрів;

λ_1, λ_2 – параметри, які залежать від умов закріплення циліндрів.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} послідовно підставимо системи рівнянь (15) та (16) у співвідношення (1), тоді отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\Phi_B(\rho_K)}{\Phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3}{2,73 \cdot L_1^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right)} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3}{2,73 \cdot L_1^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right)} \quad (17)$$

$$N_{KB} = \frac{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3}{2,73 \cdot L_2^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right)} - \left[\frac{\Phi_A(\rho_K)}{\Phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3}{2,73 \cdot L_2^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right)} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (18)$$

Після розрахунку зусиль по співвідношенням (17), (18) та їх оцінки експериментально за розглянутою вище методикою здійснюється встановлення необхідного відношення частот коливань резонаторів.

Теоретично оцінити частоти порожніх резонаторів можна за наступними співвідношеннями:

$$f_1 = f_{01} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}}$$

$$f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}}$$

Висновки

Розглянуто диференційний метод виміру щільності рідин газів та концентрації дисперсних систем, який дозволяє шляхом керування відношенням частот резонаторів забезпечити повну компенсацію не інформативних параметрів у завданій точці діапазону виміру щільності.

Приведена методика експериментального визначення умов компенсації не інформативних параметрів. Розглянуті умови забезпечення завданого відношення частот коливань для трубчастих проточного типу, пластинних заглибного типу і циліндричних резонаторів, тобто усіх типів резонаторів, котрі використовуються у віброчастотних вимірювачах щільності;

Отримані результати можуть бути у подальшому використані при проектуванні віброчастотних вимірювачів щільності рідин, газів та дисперсних систем з поліпшеними метрологічними характеристиками.

Література

1. Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
2. Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. - Л.: Энергия, 1970. – 423 с.
3. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационные уровнемеры // Измерение, контроль, автоматизация. ЦНИИТЭИприборостроения. – 1981. - Вып 6(40). - С.20-26.
4. Тараненко Ю.К. и др. Виброчастотный датчик с асимметричным возбуждением резонатора // Измерительная техника. - 1986. - № 8. - С.37-39.

5. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационные термометры // Измерение, контроль, автоматизация ЦНИИТЭИ приборостроения. – 1983. – Вып. 3(47). – С.25-31.
6. Тараненко Ю.К. Погрешности измерения вибрационных плотномеров жидкости // Метрология. - 1983. - № 1. - С.40-46.
7. Жуков Ю.П. Вибрационные плотномеры. — М.: Энергоатомиздат, 1991. - 144 с.
8. А.с. №1291867 СССР. Способ дифференциального измерения плотности / Тараненко Ю.К. Опубл. 1987. Бюл. № 7.
9. А.с. №1226159 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. Опубл. 1986. Бюл. № 15.
10. А.с. №1187014 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. Опубл. 1985. Бюл. № 39.
11. А.с. №1332189 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. и др. Опубл. 1987. Бюл. № 31.
12. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационно-частотный плотномер компенсационного типа. – Вопросы химии и химической технологии. Вып.73, 1983. - С.99-103
13. А.с. № 744277 СССР Частотный датчик плотности / Тараненко Ю.К. и др. Опубл. 1980. Бюл. №24.
14. Тараненко Ю.К. Дифференциальный вибрационный плотномер жидкости проточного типа: Диссерт. на соискание уч. степ. канд техн.наук. - М.: 1986.

Тараненко Ю.К. **Дифференциальный метод измерения плотности жидкости, газов и дисперсных систем**

В работе рассмотрен дифференциальный метод измерения плотности жидкости, газов и дисперсных систем, основанный на преобразовании измеряемой величины в разность частот колебаний механических резонаторов, которые контактируют с измеряемой средой

Taranenko J.K. **Differential method of measurement of the liquid, gases and dispersed systems density**

Differential method of measurement of liquid, gases and dispersed systems density is considered in the work. The method is based on transformation of measured parameter in a difference of mechanical resonators fluctuations, which contact with measured liquid

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*