

УДК 534-16:534.08:537.624.21

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМАХ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВИЛЛАРИ

Степаненко Д.А., Богданчук К.А., Минченя В.Т.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены вопросы проектирования, изготовления и применения датчиков для измерения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах, основанных на эффекте Виллари и обеспечивающих при измерениях пространственное разрешение. Приводятся результаты экспериментальных исследований пространственного распределения параметров колебаний в волноводных системах для ультразвукового тромболизиса. Описаны методика калибровки и потенциальные возможности применения датчиков. (E-mail: stepd@tut.by)

Ключевые слова: ультразвук, волновод, магнитострикция, напряжение.

Введение

Измерение параметров ультразвуковых колебаний, в частности, амплитуды механических напряжений, является актуальной практической проблемой в связи с широким применением ультразвука в технике и медицине. В настоящее время существует ряд бесконтактных датчиков для измерения параметров колебаний ультразвуковых волноводных систем: волоконно-оптические датчики [1], лазерные доплеровские виброметры, индуктивные и индукционные датчики [2], емкостные датчики [3]. Прямое измерение амплитуды ультразвуковых колебаний может осуществляться с помощью микроскопа [4] и применяется для калибровки указанных датчиков. Недостатками волоконно-оптических датчиков и лазерных доплеровских виброметров являются высокая стоимость и сложность конструкции и обработки сигналов. Наиболее простыми по своей конструкции являются индуктивные и индукционные датчики. В качестве разновидности последних могут рассматриваться датчики на основе эффекта Виллари. Этот эффект, также называемый обратным магнитострикционным эффектом, состоит в изменении намагниченности ферромагнитных материалов при воздействии механических напряжений. В случае воздействия на материал переменных напряжений в материале возникает переменное магнитное поле, которое

может быть зарегистрировано с помощью индукционной катушки. Данный способ регистрации ультразвуковых напряжений одним из первых описал Б. Лангенекер [5]. Изменение намагниченности в результате эффекта Виллари зависит от наличия предварительных механических напряжений, что позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние различных конструкций, в частности, остаточные напряжения [6]. В работе [7] описан способ контроля электромагнитных свойств материалов путем стимуляции электромагнитного излучения с помощью импульсного фокусированного ультразвука. Измерение амплитуды стимулированного электромагнитного излучения позволяет контролировать изменение намагниченности стержней из аустенитной стали в процессе растяжения, а также магнитное состояние предварительно деформированных пластин из аустенитной стали. Основным недостатком измерения параметров ультразвуковых колебаний с помощью датчиков на основе эффекта Виллари является отсутствие пространственного разрешения, связанное с тем, что ЭДС, наводимая переменным магнитным полем в протяженной индукционной катушке с винтовой намоткой проводника, зависит от механических напряжений, возникающих во всех сечениях волноводной системы, охватываемых витками катушки – это делает невозможным определение величины напряже-

ний в конкретно взятом сечении. Целью работы являлась разработка датчиков на основе эффекта Виллари, обеспечивающих пространственное разрешение при измерениях механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах, и методики измерения пространственного распределения механических напряжений с помощью этих датчиков.

Конструкция и технология изготовления датчиков

Обеспечение пространственного разрешения при измерениях механических напряжений с помощью датчиков на основе эффекта Виллари может быть достигнуто за счет использования плоских индукционных катушек со спиральной намоткой проводника. Величина пространственного разрешения в этом случае определяется диаметром проводника индукционной катушки датчика. Для проведения экспериментальных исследований разработаны и изготовлены три конструктивных варианта датчиков с плоскими индукционными катушками, в двух из которых катушка формируется путем спиральной намотки проволочного проводника, а в третьем – путем электрохимического травления тонкого слоя проводящего материала. Для изготовления датчика типа I (рисунок 1) использовалась медная проволока 1 диаметром 0,7 мм, покрытая электроизоляционным лаком.

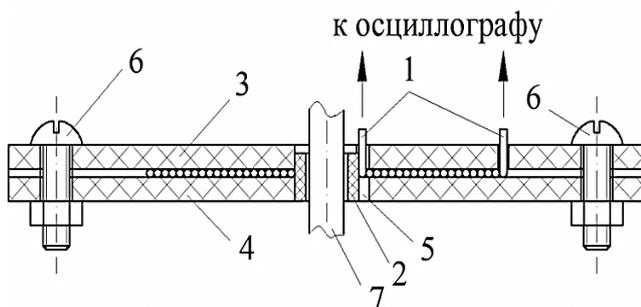


Рисунок 1 – Схема конструкции датчика на основе эффекта Виллари: 1 – проволочный проводник; 2 – каркас; 3, 4 – пластины; 5 – паз; 6 – крепежные винты; 7 – волновод

Проволока наматывалась на каркас в виде полистироловой трубки 2. Для обеспечения монослойной укладки проволоки намотка катушки производилась между двумя пластинами 3 и 4 из органического стекла, между которыми

устанавливался фиксированный зазор, равный диаметру проволоки. Каркас вставлялся по плотной посадке в выполненные в центре пластин отверстия. Установка зазора между пластинами осуществлялась путем укладки между ними одного витка проволоки с последующей стяжкой пластин винтом, проходящим через отверстие каркаса, и гайкой. Для вывода центрального витка проволоки из корпуса датчика в отверстии пластины 4 вдоль образующей выполнялся паз 5, а под гайку стяжного винта устанавливалась шайба с радиальной прорезью. После намотки необходимого числа витков катушки стяжной винт извлекался из отверстия каркаса, а для поддержания пластин в сжатом состоянии в отверстия, выполненные по их периметру, устанавливались винты 6. Волновод 7 располагался соосно с внутренним отверстием датчика.

Для изготовления датчика типа II использовался фольгированный текстолит с тонкослойным медным покрытием. Покрытие подвергалось механической полировке, после чего на него наносилась спиральная маска, форма которой соответствовала расположению витков катушки. Маска использовалась для последующего травления катушки с помощью водного раствора хлорида трехвалентного железа.

В датчике типа III для намотки катушки использовалась медная проволока диаметром 0,06 мм, что позволило миниатюризировать конструкцию датчика (размеры вместе с электроникой $\varnothing 24 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$). Особенностью датчика является наличие встроенного усилителя сигнала с малой мощностью питания. Питание усилителя производится от дополнительной катушки, которая преобразует переменное магнитное поле, возникающее при колебаниях волновода, в напряжение питания, т.е. реализуется принцип магнитострикционного сбора энергии колебаний [8].

Датчики типов I и II использовались для оценки возможности и целесообразности измерения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью эффекта Виллари, а также для исследования возможных технологий их изготовления. Эксперименты показали, что эти датчики обладают малым коэффициентом чувствительности, в связи с чем в дальнейших исследованиях был применен усовершенствованный датчик типа III с встроенным усилителем. Общий принцип построения датчика типа III не изменяется по

сравнению с рисунком 1, а основными отличиями являются миниатюризация, введение встроенного усилителя и катушки сбора энергии для питания усилителя.

Исследование характеристик датчиков

Напряжение, индуцируемое в катушке датчика, может быть определено по закону Фарадея:

$$\begin{aligned}
 U &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B(H, \sigma) dS = \\
 &= -\frac{d}{dt} \int_S (\mu_0 H + \mu_0 (M(H) + \Delta M(\sigma))) dS = \\
 &= -\frac{d}{dt} \int_S (\mu_0 H + \mu_0 \Delta M(\sigma)) dS = \\
 &= -q \mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \sigma dS = -q \mu_0 \frac{dF}{dt}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

где Φ – магнитный поток, проходящий через катушку, Вб; S – поперечное сечение волновода, м²; $B(H, \sigma)$ – индукция магнитного поля (Тл) в материале волновода при воздействии механических напряжений σ (Па) и внешнего подмагничивающего поля с напряженностью H (А/м); $M(H)$ – намагниченность материала волновода при отсутствии механических напряжений ($\sigma = 0$) и подмагничивающем поле H , А/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость материала волновода; q – коэффициент, описывающий эффект Виллари ($\Delta M = q\sigma$), А/(м·Па); $\Delta M(\sigma)$ – изменение намагниченности материала волновода при воздействии механических напряжений σ , А/м; F – внутренняя сила в волноводе (интеграл от механических напряжений по площади поперечного сечения), Н.

В уравнении (1) учтено, что член $\mu_0 H$ является стационарным. В связи с этим его производная по времени будет равна нулю, а конечный результат не будет зависеть от магнитной проницаемости материала волновода.

При изменении силы F по гармоническому закону $F(t) = F_0 \sin(2\pi f t)$, где f – частота колебаний, получим

$$U(t) = -2\pi f q \mu_0 F_0 \cos(2\pi f t). \tag{2}$$

Из уравнения (2) следует, что амплитуда напряжения, индуцируемого в катушке датчика, пропорциональна частоте колебаний, что при больших частотах колебаний (20–30 кГц) позволяет получать значительный по ампли-

туде сигнал даже при малых амплитудах внутренней силы (изменения намагниченности).

Потенциальным недостатком разработанных датчиков может являться нелинейность их функции преобразования, так как изменение намагниченности ΔM зависит от механических напряжений σ по нелинейному закону [9], т.е. коэффициент q в уравнении (1) в действительности является функцией напряжений ($q = q(\sigma)$), а допущение о линейной зависимости между ΔM и σ справедливо лишь при малом диапазоне изменения напряжений. Зависимость $\Delta M(\sigma)$ характеризуется наличием максимума при определенных значениях σ_{cm} сжимающих и σ_{tm} растягивающих напряжений [9]. При этом нелинейность зависимости становится существенной при уровнях амплитуды механических напряжений, сравнимых с σ_{cm} и σ_{tm} . Для оценки степени нелинейности датчика выполним сравнение амплитуды напряжений, соответствующих условиям эксперимента, со значениями σ_{cm} и σ_{tm} для легированных сталей [9]: эти значения составляют, соответственно, 122,5 МПа и 120,5 МПа. Максимальное значение амплитуды напряжений, наблюдаемое в эксперименте, можно рассчитать по формуле $\sigma_{0 \max} = E U_0(x_{\max}) / k_1 S(x_{\max})$, где $x_{\max} = 40$ мм – координата сечения волновода, в котором наблюдается максимальная амплитуда U_0 сигнала (рисунок 2); $E = 197,4$ ГПа – модуль упругости материала волновода (см. расчет ниже); $k_1 = 1,080 \cdot 10^8$ В/м² – параметр, связанный с чувствительностью датчика (см. расчет ниже). В результате расчета получаем $\sigma_{0 \max} = 38$ МПа, что примерно в 3 раза меньше приведенных выше значений σ_{cm} и σ_{tm} , т.е. влияние нелинейности на функцию преобразования датчика может считаться несущественным.

Экспериментальные исследования разработанных датчиков проводились на проволочных волноводах для ультразвукового тремблизиса из стали 08X18H10T со следующими физическими свойствами: плотность $\rho = 7900$ кг/м³; модуль упругости $E = 196$ ГПа; магнитная проницаемость зависит от способа обработки материала – для отожженного материала $\mu = 1,003$ (немагнитный материал), после холодной пластической деформации с обжатием 41,5 % $\mu = 1,4$ (слабомагнитный материал).

Частота колебаний волноводов подбиралась таким образом, чтобы обеспечить резонанс продольных колебаний. Волновод перемещался относительно датчика с шагом 2 мм и

для каждого из положений регистрировалась осциллограмма сигнала с датчика. За начало отсчета величины перемещения принята головка волновода. Выходной сигнал датчика имел негармонический характер, в связи с чем

проводился его спектральный анализ. На рисунке 2 приведены результаты измерения распределения амплитуд преобладающих в спектре сигнала первой и третьей гармоник по длине волновода.

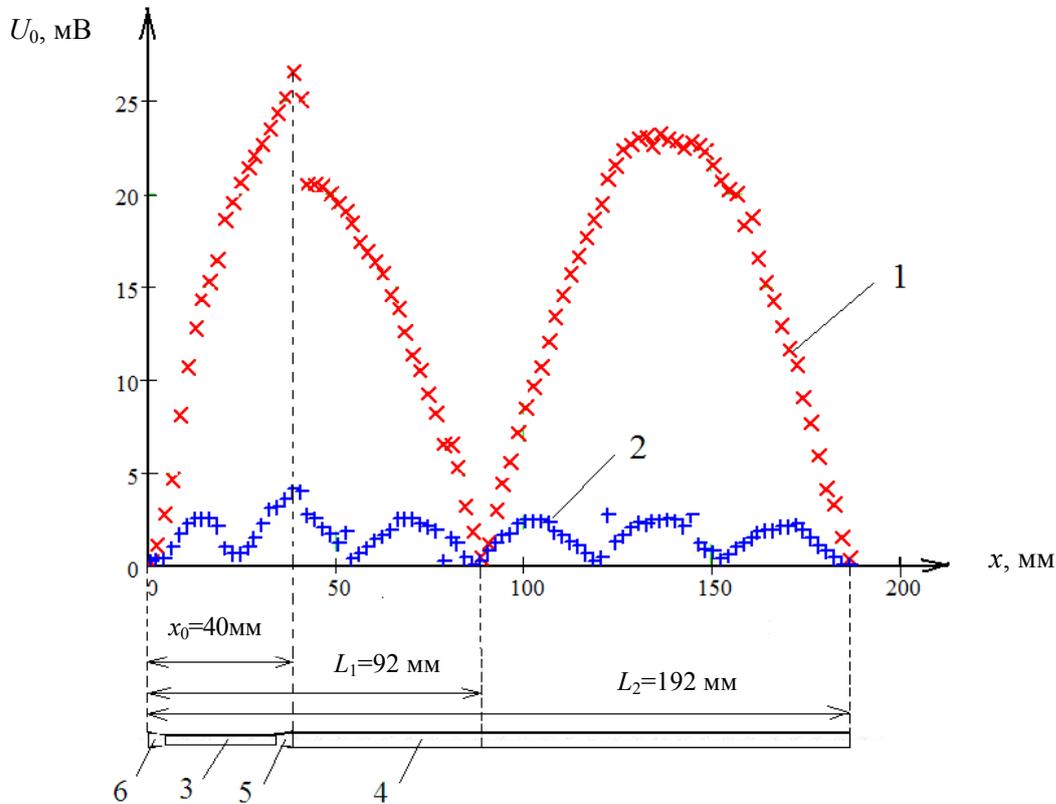


Рисунок 2 – Распределение амплитуды сигнала по длине волновода. 1 – амплитуда первой гармоники; 2 – амплитуда третьей гармоники; 3, 4 – ступени волновода; 5 – переходный участок волновода; 6 – головка волновода

Для измерений использовался датчик типа Ш. Объектом измерений служил ступенчатый волновод длиной 235 мм с резонансной частотой продольных колебаний 25155 Гц, имеющий плавный переходный участок 5 между ступенями 3 и 4 (на рисунке 2 изображено распределение амплитуды сигнала не на всей длине волновода, а на его участке между первой и третьей пучностями колебательных смещений). Подробное описание конструкции волновода дается в работе [2]. Выходная мощность ультразвукового генератора составляла 45 Вт. Максимальная амплитуда сигнала от датчика составила около 25,4 мВ. Как видно из рисунка, третья гармоника имеет пространственную длину волны, равную одной третьей длины волны первой гармоники, т.е. обе гармоники обусловлены продольными колебаниями, ча-

стоты которых относятся как 1:3. Одновременное существование продольных колебаний с кратными частотами может быть объяснено нелинейностью функции преобразования (электромеханической нелинейностью) пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя, используемого для возбуждения колебаний в волноводе: при возбуждении пьезоэлектрических преобразователей типа Ланжевена гармоническим электрическим напряжением большой амплитуды создаваемые ими колебательные смещения принимают негармонический характер [10]. Альтернативной причиной появления гармонических составляющих в спектре сигнала может быть нелинейность функции преобразования самого датчика. Однако в этом случае ненулевой амплитуде основной гармоники всегда будет соответствовать ненулевая

амплитуда третьей гармоники. В то же время, на рисунке 2 имеются значения продольной координаты, для которых амплитуда основной гармоники отлична от нуля, но при этом наблюдается узловая точка для третьей гармоники. Это исключает возможность нелинейности датчика. Скачкообразное изменение сигнала в окрестности точки $x_0 = 40$ мм на рисунке 2 соответствует положению переходного участка между ступенями волновода и характерно для ступенчатых волноводов.

Как видно из уравнения (2), амплитуда сигнала от датчика пропорциональна амплитуде внутренней силы в волноводе. Задача калибровки датчика состоит в определении коэффициента чувствительности

$$k_F = U_0(x)/F_0(x),$$

где $F_0(x)$ – амплитуда внутренней силы; $U_0(x)$ – амплитуда напряжения, индуцируемого в катушке датчика.

В данной работе используется калибровка датчиков по результатам измерений амплитуды колебательных смещений прямым оптическим методом (с помощью микроскопа, см. [4]) с учетом теоретических зависимостей между колебательными смещениями и напряжениями. При неизвестном модуле упругости E материала волновода может быть более удобным использование параметра k_1 , связанного с коэффициентом чувствительности зависимостью $k_1 = k_F E$. Параметр k_1 может быть определен по результатам измерения амплитуды ξ_0 колебательных смещений в двух сечениях $x = 0$ и $x = L$:

$$k_1 = \frac{\int_0^L \frac{U_0(x)}{S(x)} dx}{|\xi_0(L)| + |\xi_0(0)|}, \quad (3)$$

где $S(x)$ – площадь поперечного сечения волновода.

Интеграл в формуле (3) может быть определен путем численного интегрирования экспериментальной зависимости $U_0(x)$.

При известном значении параметра k_1 можно рассчитать распределение $\xi_0(x)$ амплитуды колебательных смещений по длине волноводной системы, пользуясь формулой:

$$\xi_0(x) = \xi_0(0) + \frac{1}{k_1} \int_0^x \frac{U_0(x)}{S(x)} dx.$$

Модуль упругости E , необходимый для расчета коэффициента чувствительности k_F , можно определить по результатам измерения длины волны λ :

$$E = \rho c^2 = \rho \lambda^2 f^2,$$

где ρ – плотность материала волновода; c – скорость продольных ультразвуковых волн в материале волновода; f – частота колебаний.

Длина волны λ может быть определена по результатам измерений $U_0(x)$ на участке волновода с постоянной площадью поперечного сечения с длиной не менее $\lambda/2$. Для этого достаточно определить расстояние между соседними узловыми точками распределения $U_0(x)$ – это расстояние будет равно $\lambda/2$.

Расчет коэффициента чувствительности датчика типа III производился по экспериментальным данным, приведенным на рисунке 2. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента чувствительности датчика

Исходные данные	Расчетные параметры
$\xi_0(L_1) = \xi_0(L_2) = 2,1$ мкм; $L_1 = 92$ мм; $L_2 = 192$ мм; $\rho = 7900$ кг/м ³ ; $f = 25155$ Гц	$k_1 = 1,080 \cdot 10^8$ В/м ² ; $\lambda = 200$ мм; $E = 197,4$ ГПа; $k_F = 0,557 \cdot \text{мВ/Н}$;

Координаты L_1 и L_2 соответствуют положению второй и третьей пучностей колебательных смещений (первая пучность соответствует головке 6 волновода; рисунок 2). По справочным данным (см. текст выше) модуль упругости стали 08X18H10T составляет 196 ГПа, т.е. расчетное значение модуля упругости с высокой точностью (0,7 %) согласуется со справочными данными.

Для верификации результатов расчета по известным значениям параметра k_1 и амплитуды колебательных смещений $\xi_0(L_1)$ определялось расчетное значение амплитуды колебательных смещений головки волновода $\xi_{\text{расч}}(0)$ (таблица 2).

Таблица 2

Верификация результатов расчета

Исходные данные	Расчетные параметры
$k_1 = 1,080 \cdot 10^8 \text{ В/м}^2$; $\xi_0(L_1) = 2,1 \text{ мкм}$;	$\xi_{\text{расч}}(0) = 4,849 \text{ мкм}$

Это значение составило 4,849 мкм, а экспериментально измеренное значение амплитуды составило 4,5 мкм. Абсолютная погрешность определения амплитуды составляет 0,349 мкм, что сопоставимо с ценой деления (0,3 мкм) окулярного микрометра, использовавшегося для измерений.

Перспективы использования разработанных датчиков

Помимо контроля механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах разработанные датчики могут найти ряд других практически полезных применений, например, могут использоваться для измерения скорости звука (и связанного с ней модуля упругости). При этом могут использоваться как схема, основанная на возбуждении в образце стоячих ультразвуковых волн (см. описанную выше методику определения длины волны), так и возбуждение в образце импульсных (ударных) волн с измерением времени их распространения на известное расстояние. Возбуждение волн может осуществляться как бесконтактными методами (например, на основе прямого магнитострикционного эффекта с помощью катушки), так и контактными методами (с помощью пьезоэлектрических преобразователей или механического ударного воздействия). В случае использования пьезоэлектрических возбуждателей становится возможным измерение скорости звука в элементах ультразвуковой колебательной системы *in situ* в процессе ее эксплуатации. Схема измерений, основанная на возбуждении в волноводе импульсных волн, также используется в магнитострикционных датчиках положения [11]. Основным отличием является то, что в датчиках положения скорость звука является известной величиной, а подлежит определению расстояние, на которое распространяется волна, в то время как при измерении скорости звука решается обратная задача. В магнитострикционных датчиках положения также возможно использование стоячих

волн [12]. В этом случае положение приемной катушки определяется по амплитуде индуцируемого в ней сигнала, которая связана с координатой, измеряемой вдоль оси волновода, определенной зависимостью.

Заключение

1. Разработаны и изготовлены датчики на основе эффекта Виллари для измерения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах, отличающиеся применением плоских индукционных катушек со спиральной намоткой проводника и обеспечивающие пространственное разрешение при измерениях.

2. Разработана и апробирована методика измерения пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари, основанная на калибровке датчиков по результатам измерений амплитуды колебательных смещений прямым оптическим методом и позволяющая производить прямое измерение амплитуды механических напряжений в любом сечении волноводной системы.

Авторы выражают благодарность Асимо-ву Р.М. и сотрудникам ООО «Сенсотроника», резидента Парка высоких технологий, за содействие в разработке датчика с встроенным усилителем.

Список использованных источников

1. *García, Y.R.* Vibration detection using optical fiber sensors *García Y.R. [et al.] // Journal of Sensors. – Vol. 2010. – 2010. – Article 936487.*
2. *Stepanenko, D.* Computer modelling and experimental studies of wire ultrasonic waveguides for minimally-invasive surgery / *D. Stepanenko [et al.] // Lékař a Technika. – Vol. 40, No. 2. – 2010. – P. 1–5.*
3. *Ланин, В.Л.* Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах / *В.Л. Ланин, Н.В. Дежкунов, В.С. Томаль // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – № 2. – 2008. – С. 51–55.*
4. *Киселев, М.Г.* Ультразвук в технологии машино- и приборостроения / *М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Г.А. Есьман. – Минск, 2003. – 424 с.*
5. *Langenecker, B.* Inverse magnetostrictive effect of ultrasonic stress waves in steel / *B. Langenecker // Journal of Acoustical Society of America. – Vol. 38. – 1965. – P. 234–238.*

6. *Hatafuku, H.* Estimation of residual stresses in magnetic metals by using ultrasonic method / H. Hatafuku [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – Vol. 38. – 2002. – P. 3309–3311.
7. *Takashima, K.* Nondestructive inspection of austenitic stainless steels by detection of acoustically stimulated electromagnetic response / K. Takashima [et al.] // Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics. – Vol. 32. – 2011. – P. 349–350.
8. *Wang, L.* Vibration energy harvesting by magnetostrictive material / L. Wang, F.G. Yuan // Smart Materials and Structures. – Vol. 17. – 2008. – Article 045009.
9. *Craik, D.J.* Stress-induced magnetization / D.J. Craik, R.J. Fairholme // Journal de Physique. Colloque C1. – Supplément au n° 2-3, Tome 32. – 1971. – Page C1-681-C1-683.
10. *Guyomar, D.* Piezoelectric ceramics nonlinear behavior. Application to Langevin transducer / D. Guyomar [et al.] // Journal de Physique III France. – Vol. 7. – 1997. – P. 1197–1208.
11. *Hristoforou, E.* Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications / E. Hristoforou // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – Vol. 249. – 2002. – P. 387–392.
12. *Chiriac, H.* New position sensor based on ultrasonic standing waves in FeSiB amorphous wires / H. Chiriac, C.S. Marinescu // Sensors and Actuators A. – Vol. 81. – 2000. – P. 174–175.

Stepanenko D.A., Bogdanchuk K.A., Minchenya V.T.

Measurement of spatial distribution of mechanical stresses in ultrasonic waveguide systems by means of sensors based on Villari effect

Problems of design, fabrication and application of sensors for measurement of mechanical stresses in ultrasonic waveguide systems based on Villari effect and providing spatial resolution of measurements are considered. Results of experimental studies of spatial distribution of vibration parameters in waveguide systems for ultrasonic thrombolysis are presented. Technique of calibration and potential applications of the sensors are described. (E-mail: stepd@tut.by)

Key words: ultrasound, waveguide, magnetostriction, stress.

Поступила в редакцию 22.11.2012.