

ПРОСТОЙ ДАТЧИК МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2019 г. В. А. Завалишин

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Россия, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18*

e-mail: zavali@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 16.06.2018 г.

После доработки 18.09.2018 г.

Принята к публикации 03.12.2018 г.

Описаны конструкция и полученные характеристики датчика перемещения на основе преобразователя Холла, работающего без гистерезиса и без трения. Коэффициент преобразования составил 40 мВ/мм при токе питания 90 мА, диапазоны перемещения – до ± 1 мм и ± 0.4 мм при отклонении от линейности менее 1%, жесткость – 10 Г/мм, полученное разрешение – 1.25 нм.

DOI: 10.1134/S0032816219030285

Во многих физических измерениях требуется регистрация микроперемещений, например: при измерении теплового расширения, пьезоэлектрической или магнитоэлектрической деформации, тепловых и магнитных эффектов памяти формы [1–3]. При регистрации малых перемещений очень важны: 1) безгистерезисность датчика, 2) отсутствие в нем сил трения, 3) минимальное и контролируемое воздействие на измеряемый объект (иначе в измерения вносятся искажения), 4) отсутствие сбоя регистрации при скачкообразном изменении сигнала, например, при мартенситном фазовом переходе в измеряемом объекте. Подобные датчики правильнее называть датчиками положения. Из существующих типов датчиков положения [4] наиболее часто применяют LVDT-датчики (Linear Variable Differential Transformer – дифференциальный трансформатор для измерения линейных перемещений). Стоимость такого датчика, например DG/2.5 фирмы Solartron с диапазоном ± 2.5 мм (<http://www.pdfdoc.ru/process-control/sensors-and-transducers/differential-transformers/linear-variable-differential-transformers-lvdt-/dg2-5-guided-min-lvdt-2-5mm-stroke-922940-646-482>), составляет порядка 500 евро, в то же время для измерения на малых объектах он практически непригоден из-за значительного усилия возвратной пружины и присутствия силы трения.

В нашей лаборатории более 10 лет назад (продолжение работы [5] по проекту РФФИ, грант 03-03-32523) сконструирован и используется в изме-

рениях¹ [2, 3, 6] безгистерезисный датчик перемещения на основе преобразователя Холла (стоимость преобразователя Холла отечественного производства (например, ООО “Вега-Флекс”, С.-Петербург, <http://sensorspb.ru/uploads/files/newprice.pdf>) примерно 500 руб). Конструкция датчика в сборке с дилатометром, работающим на растяжение, и образцом показана на рис. 1.

Конструкция состоит из корпуса датчика 1 (двухсторонний фольгированный текстолит размером $1.55 \times 30 \times 55$ мм), в котором сделан фигурный вырез для подвижной планки 2 (двухсторонний фольгированный текстолит размером $0.85 \times 3 \times 25$ мм), подвешенной на четырех пружинах 6 (из латунной проволоки для электроискрорезного станка, диаметр проволоки 0.2 мм, 27 витков, длина 7 мм, внешний диаметр 1.2 мм). Преобразователь Холла 3 находится внутри прорези 12 подвижной планки (наклеен на медную фольгу, напаянную поверх прорези, с направлением токовой дорожки перпендикулярно направлению перемещения подвижной планки). Выводы преобразователя припаяны через небольшую петлю к контактным дорожкам разъема 7, выполненного непосредственно на корпусе датчика 1. Латунная соединительная муфта 4 (носик пишущего узла от шариковой ручки) навинчивается на шпильку с резьбой ($d = 1$ мм), припаянную к подвижной планке, и соединяет разборным соединением по-

¹ В работе [2] на таком дилатометре измерялась продольная магнитоэлектрическая ленточка шириной 1 или 2 мм и толщиной 20 мкм, а в [3] – термоизгиб псевдобиметаллических прямоугольных пластинок толщиной от 60 до 100 мкм размером 9×4 мм.

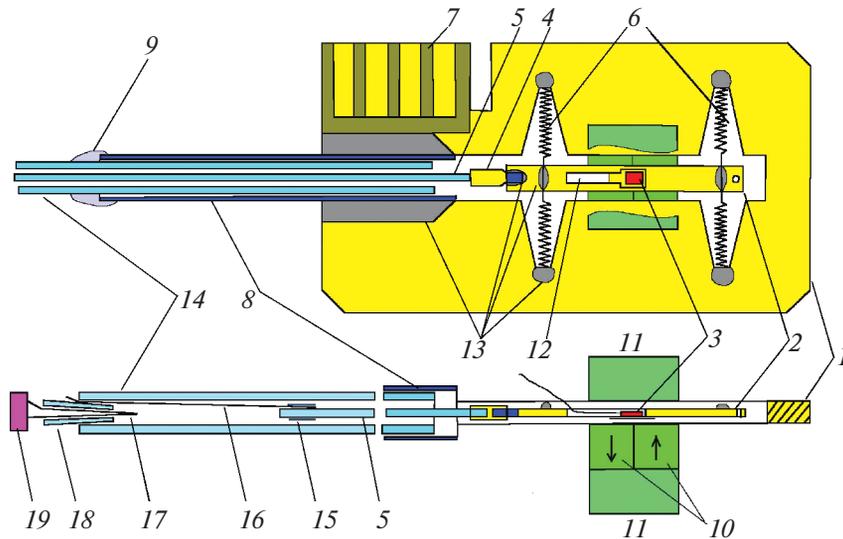


Рис. 1. Конструкция дилатометра и датчика перемещения. 1 – корпус датчика; 2 – подвижная планка; 3 – преобразователь Холла (наклеен на фольгу внутри прорези подвижной планки); 4 – латунная втулка с резьбой, навинчиваемая на шпильку, припаянную к подвижной планке; 5 – кварцевая нить (правым концом вклеена во втулку 4, а левым вместе с одетым поверх колечком 15 образует подвижный захват); 6 – латунные пружинки подвески подвижной планки; 7 – разъем с фольгированными дорожками на корпусе датчика; 8 – тонкостенная трубка из нержавеющей стали, впаянная в устье выреза в корпусе датчика и соединяющая корпус датчика с корпусом дилатометра; 9 – пицциновая (терморазмягчаемая) склейка; 10 – брусочки самарий-кобальтового магнита (стрелками показано направление намагниченности); 11 – брусочки армо-железа; 12 – вырез в подвижной планке и выходящие из него провода преобразователя Холла; 13 – места пайки (некоторые); 14 – кварцевая трубка-корпус дилатометра (вместе с кварцевой втулкой 18 образует неподвижный захват); 15 – колечко из тонкостенной трубки из нержавеющей стали (одетое поверх нити 5, близки ее утолщения, образует подвижный захват); 16 – образец в виде ленточки или проволоочки; 17 – кончик термопары; 18 – кварцевая втулка; 19 – чехол термопары.

движную планку 2 с кварцевой нитью (или стержнем) 5 ($d = 1.3$ мм для нити при усилии растяжения, а для сжатия кварцевой трубки $d = 2$ мм), которая наклеена на (вклеена в) соединительную муфту 4. Конусное утолщение на левом конце кварцевой нити вместе с надетым колечком 15 ($d = 2$ мм) из немагнитной тонкостенной нержавеющей трубки образуют подвижный захват для натяжения ленточных или проволоочных образцов. Тонкостенная трубка 8 ($d = 5$ мм) из немагнитной нержавеющей стали правым концом припаяна к корпусу датчика внутри устья выходящего на край фигурного выреза, а в ее левый конец вставляется (через терморазмягчаемую склейку 9) кварцевая трубка 14, являющаяся корпусом дилатометра. Кварцевая трубка 14 вместе с конусной кварцевой втулкой 18 образуют неподвижный захват для натяжения образцов. Магнитная система состоит из двух брусочков ($5 \times 5 \times 12$ мм) самарий-кобальтового магнита 10 (на рисунке стрелками показано направление намагниченности) и двух брусочков (10×12 мм) отожженного армо-железа 11. Система просто накладывается на корпус датчика поверх подвижной планки, как показано на рис. 1, хорошо держится благодаря взаимному притяжению частей и легко сдвигается при настройке начального положения.

Для плотной вставки кварцевой трубки 14 в тонкостенную трубку 8 (без зазоров) последнюю можно чуть обжать в ручьевых прокатных валках (начало перехода от круглого сечения к квадратному).

Для данного датчика получены следующие параметры:

- коэффициент преобразования перемещения в напряжение составил ~ 40 мВ/мм (с преобразователем Холла ПХЭ 605817А при $I_X = 90$ мА), что соответствует разрешению 1.25 нм при разрешении (шуме) измерительного прибора 0.1 мкВ и измерении с переключением полярности тока питания;

- диапазоны перемещения до ± 1 мм и ± 0.4 мм с отклонением от линейности менее 1%;

- жесткость ~ 10 Г/мм;

- масса ~ 20 г.

Отметим следующие особенности описываемого датчика.

1. Коэффициент преобразования пропорционален току I_X через датчик.

2. Приведенные характеристики сильно зависят от конкретной конструкции. Например, замена преобразователя Холла ПХЭ 605817А на ИМ102А1-1 увеличит коэффициент преобразования в 5 раз (и

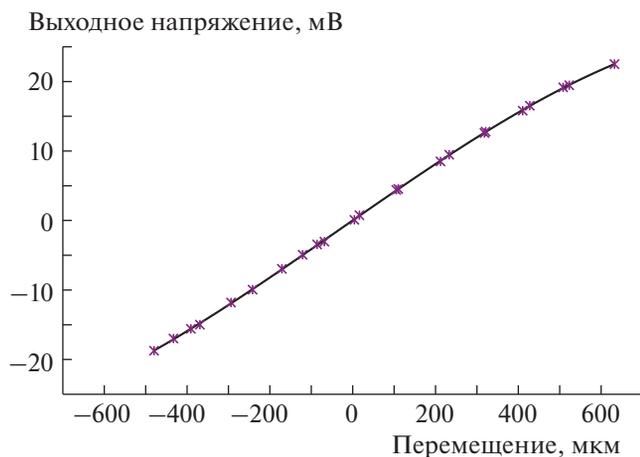


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения датчика от перемещения.

можно ожидать увеличения разрешения до 0.25 нм). Изменение длины или натяжения пружинок изменит жесткость, а изменение величины магнитного зазора — диапазон линейности.

3. Для улучшения точности измерение проводят при прямом ($I_X = +90$ мА) и обратном ($I_X = -90$ мА) направлениях тока, после чего вычисляют разность показаний. Полезный сигнал при этом удваивается, а сигнал от паразитной термо-э.д.с. и дрейф нуля измерительного прибора вычитаются².

4. При измерениях с меняющимся в процессе измерения внешним магнитным полем датчик необходимо экранировать (например, поместить в отрезок железной трубы) либо учитывать поправки, найденные по результатам измерения без образца в меняющемся поле. Например, при измерении магнитострикции никелевой проволоки (см. ниже) датчик находился в вертикальном положении на расстоянии 70 мм от одного из торцов раздвижных полюсов диаметром 60 мм (с отверстием $\varnothing 8$ мм для вставки термопары и кварцевой трубки 14 дилатометра) панцирного электромагнита. Электромагнит выполнен в виде овоида с внешним диаметром 320 мм, большой осью 380 мм и выступающими за нее на 25 мм торцами полюсов. Разность показаний дилатометра без образца в поле 9 кЭ и без поля составляла примерно 0.07 мкм. Использование надвигаемого на датчик (соосно

² Как показывают измерения, смещение нуля состоит из двух слагаемых, большее из которых “четно” (с четными степенями разложения в ряд Тейлора) зависит от тока через преобразователь (термо-э.д.с. из-за нагрева). Значительно меньшее слагаемое зависит “нечетно” от тока через преобразователь. При вычитании э.д.с. с $+I_X$ и $-I_X$ четная составляющая устраняется, а нечетная — удваивается. Однако перемещение определяется разностью показаний в начале и конце, и эта составляющая тоже устраняется. Совершенно аналогично устраняется и влияние постоянного в процессе измерения внешнего магнитного поля.

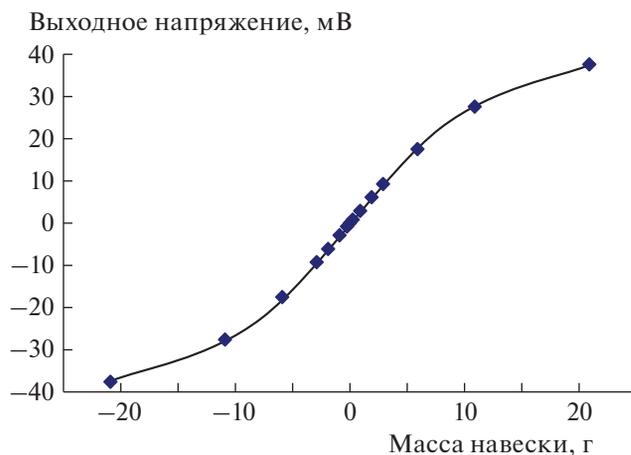


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения датчика от усилия.

трубке дилатометра) экрана (отрезок железной трубы с внутренним диаметром 50 мм, толщиной стенки 5 мм и длиной 140 мм) снижало разность показаний до ~ 0.02 мкм.

5. Влияние на коэффициент преобразования датчика поперечного изменения положения планки (перпендикулярно своей плоскости в магнитном зазоре) специально не исследовалось, но практически установлено, что переверот магнитной системы с одной стороны платы датчика на другую не оказывает влияния на этот коэффициент. По принципам магнитостатики магнитные полюса состыкованных магнитов 10 должны “отражаться” (с изменением знака полярности полюсов) в пластинке армко-железа 11. Таким образом, влияние поперечного перемещения должно быть нулевым в средней плоскости зазора и четным относительно смещения от нее.

На рис. 2 приведена измеренная зависимость выходного напряжения датчика от перемещения, задаваемого штоком микрометра (индикатор часового типа, имеющий разрешение 1 мкм), соединенным с кварцевым стержнем датчика и сдвигаемым при надавливании на него микровинта с противоположной стороны микрометра. Линейная аппроксимация графика в интервале ± 400 мкм согласуется с результатами измерений в пределах 1% от максимальной величины перемещения (± 4 мкм).

На рис. 3 приведено выходное напряжение датчика в зависимости от массы грузов. Грузы в чашечке подвешиваются с помощью нитки на подвижную планку либо со стороны шпильки с резьбой, либо со стороны отверстия в планке при вертикальном положении датчика.

Порядок работы с дилатометром следующий.

Для снятия образца сначала необходимо извлечь кончик термопары из конусной втулки 18,

после чего вынуть эту втулку из кварцевой трубки 14, освободив при этом неподвижный конец образца. Свинтив латунную втулку 4 со шпильки подвижной планки, вытащить из трубки 14 кварцевый стержень 5 с прикрепленным к нему образцом 16. Затем, сдвинув втулку 15, освободить образец.

Установка нового образца осуществляется следующим образом. Сдвинув втулку 15, образец 16 в виде ленточки или проволоочки (если толстовата, концы можно расплющить) накладывают на конец кварцевого стержня 5. Затем втулку 15 наводят на конец образца и закрепляют без перекоса небольшим усилием. Кварцевый стержень 5 с образцом вставляют в кварцевую трубку 14 и навинчивают латунную втулку 4 на шпильку подвижной планки до упора (контроль поворота до упора по метке краской). Нержавеющую трубку 8 нагревают паяльником до размягчения паяльника 9 и продвигают в нее кварцевую трубку 14 до совмещения торцов трубок на выходе (вблизи втулки 4). Далее, на корпус датчика следует установить магнитную систему: брусок армко-железа — со стороны выводов преобразователя Холла, а магнитами с другим бруском — на противоположной стороне (система держится только на взаимном магнитном притяжении и трении). Затем подсоединить разъем, включить ток через преобразователь Холла и измерить э.д.с. Холла. Слегка сдвигая магнитную систему, удостовериться, что при положительном токе Холла удлинение образца изменяет показания в положительную сторону. Если эффект обратный, то, не отводя сборку магнитов от плоскости датчика, следует развернуть ее на 180°. Сориентировав dilatometer в его рабочее положение при измерении (например, вертикальное) и сдвигая магнитную систему, следует подстроить э.д.с. Холла как можно ближе к нулю. Записать это начальное значение э.д.с. и с его учетом по рис. 3 найти значение э.д.с. Холла для заданного натяжения.

Далее кварцевая коническая втулка 18 вставляется в кварцевую трубку 14, и небольшим усилием без перекоса закрепляется неподвижный конец образца 16. Нержавеющая трубка 8 нагревается паяльником до размягчения паяльника 9, и слегка, без закручивания образца, при рабочем положении dilatometer из нее выдвигается кварцевая трубка 14. При этом натяжение образца необходимо контролировать по изменению э.д.с. Холла в приближении к расчетному значению. Не меняя ориентации dilatometer и слегка сдвигая магнитную систему, подстраивают начальные показания dilatometer к значению, при котором предполагаемые перемещения укладываются в наиболее чувствительный диапазон измерительного прибора (например, ± 1 мВ для цифрового прибора Ш300). Затем кончик термопары вставляется в отверстие втулки 18.

Для уменьшения трения образца о стенку вблизи неподвижного конца измерения лучше проводить в вертикальном положении dilatometer (образца). Можно также использовать звуковые колебания, приложенные к кварцевой трубке 14 от микродинамика (питаемого звуковым генератором). Микродинамика закреплен на латунном диске с отверстием, через которое пропущена трубка 14 с перекосом перпендикулярности (например, от веса динамика при опоре диска на резиновое колечко на трубке при вертикальном положении dilatometer) до заклинивания (для лучшего акустического контакта). Удобно работать на частоте резонанса латунного диска (легко подобрать на слух), при котором пучность колебаний находится вблизи отверстия диска.

Измерения дилатации на ферромагнитных ленточках или проволочках очень чувствительны к поперечным силам, действующим на образец в магнитном поле. Поэтому, например, нам не удалось измерить магнитострикцию в магнитном поле, перпендикулярном ферромагнитным ленточкам, полученным в [5]. При увеличении поля происходит перекося ленточек с касанием стенок кварцевой трубки 14. В продольной ориентации таких сил не возникает (нет их влияния на измерение), если концы образца в межполюсном зазоре находятся на достаточном удалении от полюсов — большем диаметра отверстия (предназначенного для вставки кварцевой трубки dilatometer продольно полю) внутри полюсов.

На рис. 4 приведен результат измерения гистерезиса магнитострикции никелевой проволоочки диаметром 0.15 мм, длиной 35 мм с натяжением 7 Г в продольном магнитном поле, меняющемся по циклу: 0/+9/0/-9/0 кЭ — с приложением звуковых колебаний частотой 30 Гц. Там же показан дрейф температуры, который важно учитывать в таких измерениях. Скачки температуры на графике обусловлены разрешением измерительного прибора 1 мкВ. Э.д.с. Холла измерялась с переключением полярности тока и с разрешением 1 мкВ, что соответствует разрешению по удлинению 0.0125 мкм. (Измерение проводилось с помощью SCADA-системы, состоящей из компьютера с модулями NL-8TI и модулем связи NL-232C фирмы НИЛ АП, г. Таганрог, <http://www.RLDA.ru>.)

Измеренный гистерезис магнитострикции для никеля соответствует литературным данным [7]. Последовательность изменения длины и температуры на графике показаны стрелками. В начальном, нулевом, магнитном поле удлинение равно нулю, температура +22.83°C. По мере увеличения поля до +9 кЭ происходит укорочение образца согласно верхней ветви гистерезиса (при +9 кЭ), затем, с уменьшением поля до нуля, размеры образца возвращаются почти к первоначальному значению, согласно нижней ветви.

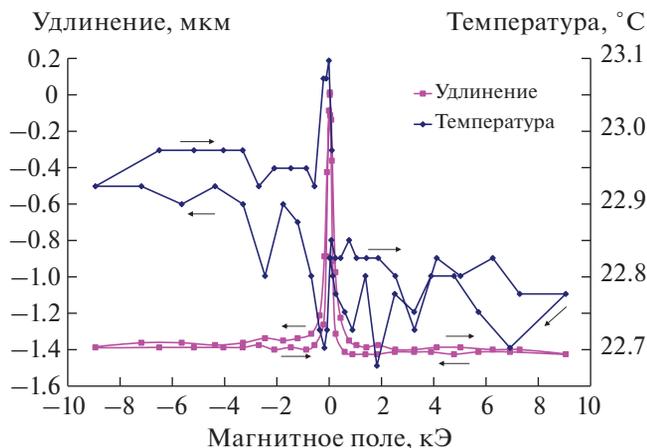


Рис. 4. Магнитострикция никелевой проволоочки в продольном магнитном поле. Проволочка диаметром 0.15 мм, длиной 35 мм с натяжением 7 Г, продольное магнитное поле, зазор 50 мм, звуковые колебания частотой 30 Гц.

Температура в этой части цикла заметно не меняется, находясь вблизи $+22.78^{\circ}\text{C}$. Далее, при уменьшении поля до -9 кЭ снова происходит укорочение образца, согласно верхней ветви. По мере возвращения поля к нулю размеры образца возвращаются в соответствии с нижней ветвью почти к первоначальному значению. Температура в этой части цикла в отрицательном поле -9 кЭ возрастает до $+22.92^{\circ}\text{C}$ и, далее, с возвращением поля к нулю — до $+23.10^{\circ}\text{C}$.

Оценим влияние температуры на удлинение. При различии температур, соответствующих левой и правой частям графика, $+0.15^{\circ}\text{C}$ получим температурное удлинение $+0.068$ мкм (коэффициент термического расширения никеля $1.3 \cdot 10^{-5}$ градус $^{-1}$, длина образца 35 мм). Влияние температуры на удлинение значительно меньше, чем влияние

магнитного поля. Причина, по которой после прохождения цикла по полю удлинение не вернулось к первоначальному значению плюс тепловое удлинение, состоит, видимо, в наличии трения и неопределенности начального (остаточного) намагничивания. В [3] показан температурный гистерезис термоизгиба псевдобиметаллических пластинок в течение нескольких циклов. Гистерезисная петля переходит в замкнутую только после повторения двух-трех циклов. Рассчитанная для никеля магнитострикция насыщения $\lambda_S = -1.4$ мкм/35 мм = $-40 \cdot 10^{-6}$ в продольном магнитном поле при изменении длины на 1.4 мкм. Это полностью согласуется с значением $\lambda_S = -40 \cdot 10^{-6}$, приведенным в [7] при отсутствии внешних напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагарадзе В.В., Завалишин В.А., Катаева Н.В., Кабанова И.Г., Клюкина М.Ф., Валиуллин А.И., Казанцев В.А. // ФММ. 2014. Т. 115. № 5. С. 517.
2. Валиуллин А.И. Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2017.
3. Shabashov V.A., Afanasiev S.V., Zavalishin V.A., Korshunov L.G., Litvinov A.V., Zamatovsky A.E., Borisov S.V., Semionkin V.A. // Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum. 2016. V. 371. P. 86. 10.4028/www.scientific.net/DDF.371.86
4. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е / Под ред. П.В. Новицкого. Л.: Энергия, 1975.
5. Валиуллин А.И., Косицин С.В., Катаева Н.В., Завалишин В.А., Косицына И.И. // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 7. С. 948.
6. Завалишин В.А. // Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции "Научное приборостроение". (Казань, 4–7 июня 2018) С. 122. http://www.kfti.knc.ru/pribor2018/Сборник_материалов_Конференции.pdf
7. Бозорт Р. Ферромагнетизм / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1956.