



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01B 7/24 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020135355, 26.10.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
26.10.2020

Дата регистрации:  
20.04.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.10.2020

(45) Опубликовано: 20.04.2021 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

142432, Московская обл, г. Черноголовка, ул.  
Академика Осипьяна, 2, ИФТТ РАН

(72) Автор(ы):

Аксенов Олег Игоревич (RU),  
Аксенов Артем Андреевич (RU),  
Аронин Александр Семенович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
твердого тела Российской академии наук  
(ИФТТ РАН) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: WO 2007116218 A1, 18.10.2007. RU  
2653563 C1, 11.05.2018. BY 18916 C1, 28.02.2015.  
US 2013181705 A1, 18.07.2013.

(54) Датчик измерения механических напряжений на основе микропроводов с положительной магнитоотрицательностью

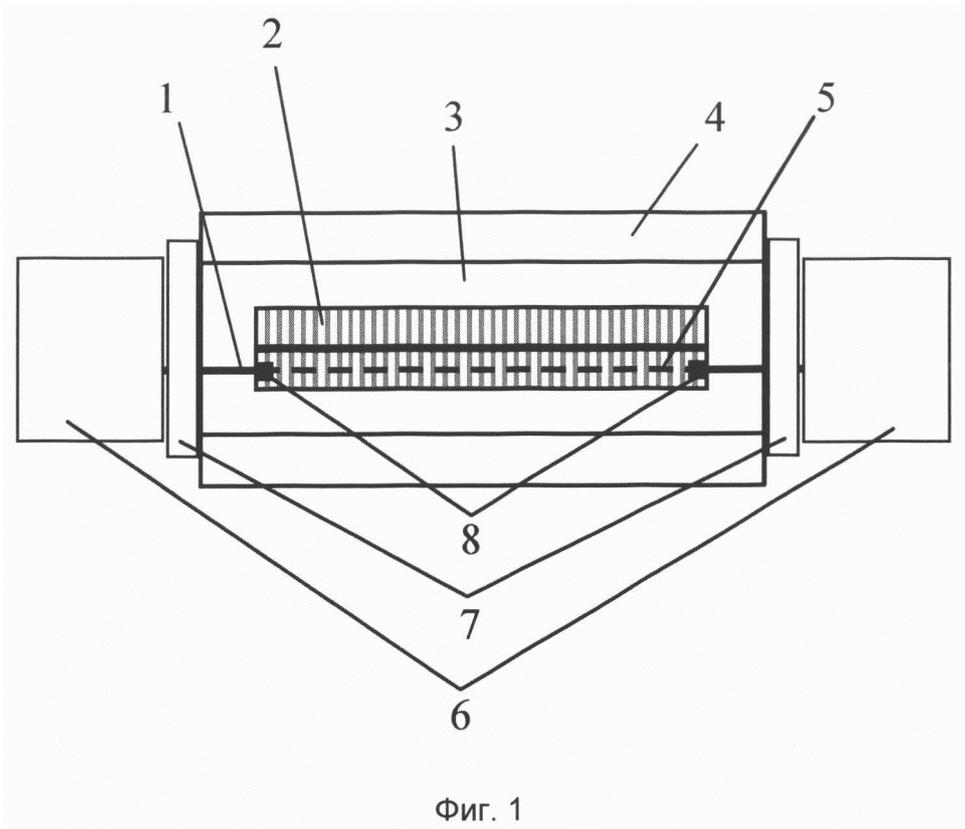
(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и выполняет функцию датчика механических напряжений. Датчик состоит из аморфного ферромагнитного микропровода с положительной магнитоотрицательностью, размещенного по оси дифференциальной измерительной катушки, и внешней катушки, задающей переменное магнитное поле вдоль оси микропровода. Измерительная дифференциальная катушка соединена с усилителем, выход которого подключается к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), выполненному в виде индивидуального устройства или как часть микроконтроллера. Вывод сигнала с АЦП реализуется на персональный компьютер. Конструкция датчика позволяет проводить

измерение механических напряжений по изменению коэрцитивной силы, переключающего поля и временной зависимости электродвижущей силы, вызванной перемещением микропровода. При этом существует возможность снятия корпуса датчика без полного его отделения от исследуемого объекта для замены аморфного ферромагнитного микропровода в процессе эксплуатации датчика. Технический результат – повышение чувствительности системы регистрации напряжений на основе аморфных микропроводов, снижении помех, обеспечение заменяемости чувствительного элемента (аморфного ферромагнитного микропровода). 3 ил.

RU 2 746 765 C1

RU 2 746 765 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01B 7/24 (2021.02)*

(21)(22) Application: **2020135355, 26.10.2020**

(24) Effective date for property rights:  
**26.10.2020**

Registration date:  
**20.04.2021**

Priority:

(22) Date of filing: **26.10.2020**

(45) Date of publication: **20.04.2021** Bull. № 11

Mail address:

**142432, Moskovskaya obl., g. Chernogolovka, ul.  
Akademika Osipyana, 2, IFTT RAN**

(72) Inventor(s):

**Aksenov Oleg Igorevich (RU),  
Aksenov Artem Andreevich (RU),  
Aronin Aleksandr Semenovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
uchrezhdenie nauki Institut fiziki tverdogo tela  
Rossijskoj akademii nauk (IFTT RAN) (RU)**

(54) **MECHANICAL STRESS MEASUREMENT SENSOR BASED ON MICRO-WIRES WITH POSITIVE MAGNETOSTRICTION**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to measuring equipment and performs the function of a mechanical stress sensor. The sensor consists of an amorphous ferromagnetic micro-wire with positive magnetostriction, located along the axis of the differential measuring coil, and an external coil that sets an alternating magnetic field along the axis of the micro-wire. The measuring differential coil is connected to an amplifier, the output of which is connected to an analog-to-digital converter (hereinafter – ADC), made as an individual device or as part of a microcontroller. The output of the signal from the ADC is implemented on a personal computer. The sensor design makes it

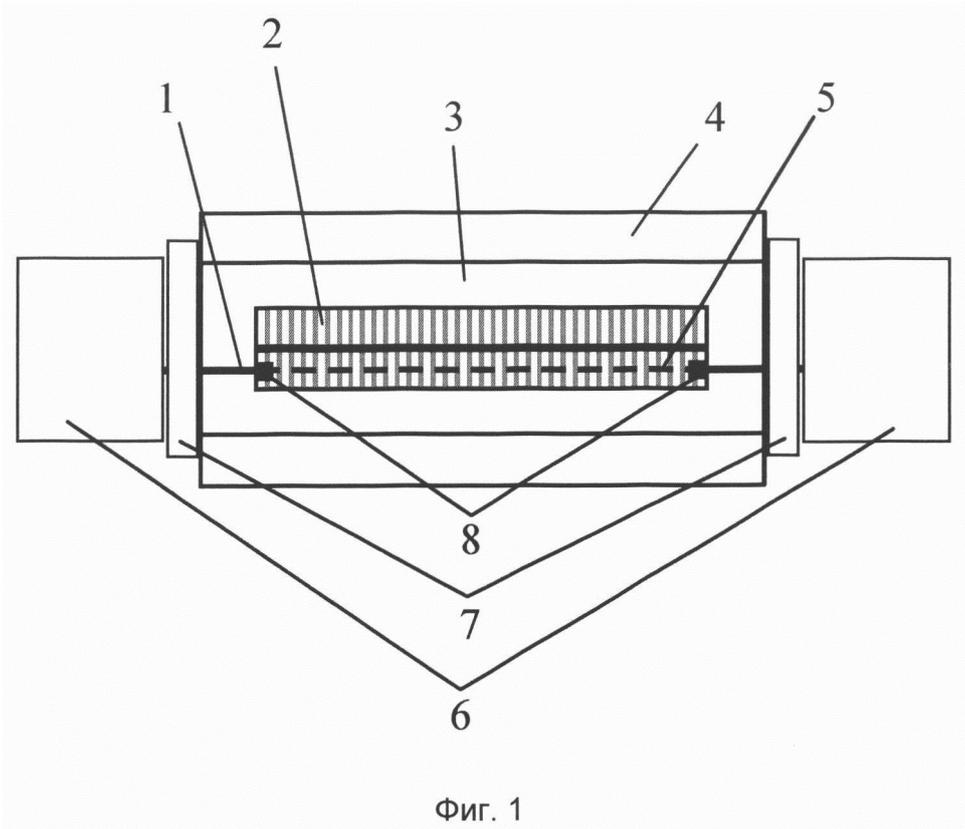
possible to measure mechanical stresses by changing the coercive force, the switching field, and the time dependence of the electromotive force caused by the magnetic reversal of the micro-wire. At the same time, it is possible to remove the sensor case without completely separating it from the object under study to replace the amorphous ferromagnetic micro-wire during the operation of the sensor.

EFFECT: increase in the sensitivity of the stress recording system based on amorphous micro-wires, reducing interference, and ensuring the interchangeability of the sensitive element (amorphous ferromagnetic micro-wire).

1 cl, 3 dwg

**RU 2 746 765 C1**

**RU 2 746 765 C1**



Изобретение относится к области неразрушающего контроля и технической диагностики материалов и может служить в качестве датчика механических напряжений.

Известен датчик измерения механических напряжений (RU 2552124, опубл. 10.06.2015), который включает в себя прямоугольную пластину из полимерного материала, на верхней поверхности которой сделано углубление, в котором помещается детектор, при этом внутри прямоугольной пластины вдоль продольной оси располагается предварительно напряженный аморфный ферромагнитный микропровод, изготовленный из обогащенных кобальтом сплавов, помещенный внутрь измерительной катушки в виде встречно соединенных соленоидов из медной проволоки. Данное устройство позволяет получать петли гистерезиса микропровода, проводить их анализ на персональном компьютере и по изменению формы кривых делать выводы о типе приложенных напряжений (растягивающие, скручивающие) и их величине.

Недостатком этого устройства является расположение микропровода в полимерной матрице, что потенциально может ухудшить магнитомеханические свойства микропроводов в стеклянной оболочке в силу влияния адгезии между стеклянной оболочкой и полимером. Кроме того, в данном устройстве используются микропровода с отрицательной магнитострикцией, которые не отличаются бистабильным характером перемагничивания как, например, микропровода с положительной магнитострикцией, а имеют наклонную петлю гистерезиса. Анализ кривых перемагничивания микропроводов с положительной магнитострикцией может обеспечить большую чувствительность к деформации и потенциально более удобно для регистрации сигнала перемагничивания.

Известен композитный датчик (WO 2010055282, опубл. 20.05.2010). Композитный датчик также основан на расположении микропровода в полимерной матрице. Через микропровод пропускается переменный электрический ток и регистрируется напряжение на микропроводе. Данный композитный датчик основан на применении эффекта гигантского магнитного импеданса и гигантского стресс-импедансного эффекта.

Недостаток этого устройства состоит в сложности измерения локальных механических нагрузок из-за необходимости использования микропроводов протяженной длины. При этом данное устройство обладает высокой чувствительностью к внешним магнитным полям, что может искажать результаты измерения механических напряжений.

Известен датчик измерения механических деформаций (RU 2654827, опубл. 22.05.2018). Датчик содержит прямоугольную пластину с поперечными разрезами, обеспечивающими возможность растяжения не только в продольном, но и поперечном направлении. В посадочном месте пластины располагается миниатюрный соленоид, внутри которого размещен магниточувствительный элемент. Миниатюрный соленоид подключен к источнику постоянного тока. Аморфный ферромагнитный микропровод (магниточувствительный элемент) подключен к источнику переменного тока. В датчике измерения напряжений используется эффект малоуглового вращения намагниченности относительно оси микропровода, при этом в измерительной катушке регистрируется сигнал удвоенной частоты относительно частоты тока, протекающего по микропроводу. Изменение ЭДС сигнала удвоенной частоты позволяет регистрировать изменение напряженного состояния микропровода.

Недостатком этого устройства является сложность регистрации сигнала предложенного типа, что потенциально понижает чувствительность устройства, несмотря на оригинальность предложенного подхода.

Известен способ измерения физических величин (WO 2007116218, опубл. 18.10.2007). В данном способе, наиболее близком к предлагаемому изобретению, используется

датчик на основе аморфных ферромагнитных микропроводов с ненулевой магнитострикцией. Способ основан на регистрации электродвижущей силы (ЭДС), возникающей в измерительном соленоиде при перемагничивании микропровода в переменном магнитном поле. Для регистрации изменения напряженного состояния производится измерение переключающего поля, полученного по сопоставлению кривых электродвижущей силы и внешнего переменного магнитного поля.

Недостатками этого подхода является лишь общее описание системы регистрации сигнала без конкретизации механизмов исполнения и достижения технического результата. Кроме того предложенный способ отличается чувствительностью к внешним магнитным полям и основан лишь на регистрации переключающего поля.

В изобретении достигается технический результат, заключающийся в измерении уровня механических напряжений, повышении чувствительности системы регистрации напряжений на основе аморфных микропроводов по сравнению с существующими аналогами за счет применения комбинированного подхода в регистрации различного типа механических нагрузок (растяжение, кручение), снижении помех и обеспечения заменяемости чувствительного элемента (аморфного ферромагнитного микропровода).

Указанный технический результат достигается следующим образом.

Предполагаемый датчик измерения механических напряжений состоит из аморфного микропровода с положительной магнитострикцией, представляющего собой чувствительный элемент измерительного устройства. Аморфный микропровод скреплен с промежуточными нитями или пластинами с помощью алюминиевых зажимных держателей. Промежуточные нити или пластины необходимы для размещения микропровода в центре измерительной схемы для исключения воздействия внешних магнитных помех. Такая связанная конструкция (микропровод и нити или пластины) располагается вдоль одной из осей дифференциальной измерительной катушки, представляющей собой два встречно включенных и симметрично расположенных соленоидов или катушку, намотанную восьмеркой. Дифференциальная измерительная катушка с аморфным микропроводом внутри размещены на оси внешнего соленоида, задающего переменное магнитное поле. Во внешний соленоид подается переменный электрический ток. Переменный электрический ток во внешнем соленоиде создает переменное магнитное поле в области размещения аморфного микропровода и вызывает его перемагничивание. В результате в дифференциальной измерительной катушке возникает сигнал ЭДС, вызванной перемагничиванием аморфного микропровода. При этом ЭДС, связанная с нахождением измерительной катушки во внешнем переменном поле, компенсируется за счет встречного включения соленоидов дифференциальной измерительной катушки или намотки дифференциальной измерительной катушки восьмеркой. Внешние концы промежуточных нитей или пластин фиксируются на краевых зажимных подвижных держателях, находящихся снаружи внешнего соленоида. Краевые зажимные подвижные держатели при измерении фиксируются на исследуемом объекте с помощью клеевого соединения или сварки. При этом аморфный микропровод и связанные с ним промежуточные нити или пластины оказываются натянуты между краевыми зажимными держателями. Между краевыми зажимными подвижными держателями и внешним соленоидом, размещенном в съемном корпусе устройства, находятся промежуточные пластины с круговым вырезом в центре, препятствующие проскальзыванию подвижных держателей внутрь внешнего соленоида в случае возникновения отрицательной деформации на исследуемом объекте. Корпус устройства имеет цилиндрическую форму и содержит внутри себя внешний и дифференциальный измерительный соленоиды и аморфный микропровод с промежуточными нитями или

пластинами. Диаметр корпуса меньше максимальных поперечных размеров краевых зажимных держателей. Конструкция корпуса предусматривает возможность его снятия путем отделения двух половин корпуса друг от друга за счет удаления скрепляющих обе половины корпуса винтов или иным способом, позволяющим осуществлять снятие

5 корпуса без отделения краевых зажимных держателей от исследуемого объекта.

Дифференциальная измерительная катушка подключена к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) микроконтроллера или изолированному АЦП с возможностью дальнейшего подключения к компьютеру. При необходимости возможна установка усилителя сигнала с дифференциальной катушки для подключения к АЦП. Внешний

10 соленоид подключен к генератору синусоидальных импульсов с возможностью генерации колебаний с частотой до 10 кГц. Такое максимальное значение частоты необходимо для исключения влияния динамических эффектов перемагничивания микропровода на результаты измерения. При необходимости измеренный сигнал ЭДС перемагничивания микропровода может быть интегрирован для получения петли

15 магнитного гистерезиса и значений коэрцитивной силы микропровода. При увеличении уровня напряжений в микропроводе, например, при растяжении, его коэрцитивная сила и переключающее поле увеличиваются. Данная зависимость коэрцитивной силы и переключающего поля от напряжений обратима вплоть до напряжений близких к половине предела прочности на растяжение материала (величина около 1,5 ГПа) для

20 аморфных микропроводов на основе Fe.

Аморфный ферромагнитных микропровод с положительной магнитострикцией может быть выполнен на основе сплавов с преимущественным содержанием железа, например:  $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ ,  $Fe_{73.8}Cu_1Nb_{2.1}B_{9.1}Si_{13}$  и других.

Аморфный ферромагнитный микропровод может иметь длину от 20 до 150 мм.

25 Может быть использован аморфный ферромагнитный микропровод в стеклянной оболочке и без оболочки.

Внешний соленоид выполнен в виде многослойной катушки, намотанной виток к витку. Плотность и количество витков зависят от диапазона магнитных полей, в которых необходима работа датчика, а также размера датчика. Основной сдвиг измеряемых датчиком зависимостей сигнала ЭДС происходит в интервале максимальных значений

30 поля от -100 до 100 эрстед. Соответственно, основным требованием является работа соленоида в данном диапазоне полей.

Дифференциальная измерительная катушка изготовлена из медного провода с диаметром не более 120 мкм. Диаметр провода намотки может быть подобран, исходя

35 из требуемых размеров датчика и возможности подключения усилителя к дифференциальной катушке.

Промежуточные нити или пластины могут быть выполнены из алюминия или другого материала, вносящего малые искажения в регистрируемый с дифференциальной измерительной катушки сигнал ЭДС.

40 Повышение чувствительности системы регистрации напряжений связано с возможностью одновременной регистрации:

- коэрцитивной силы, измеренной по магнитной петле гистерезиса, полученной при интегрировании зависимости электродвижущей силы для;

45 - переключающего поля, полученного при сопоставлении значений напряженности перемагничивающего поля и значений кривой ЭДС от времени;

- изменения уровня механических напряжений путем регистрации временного сдвига пиков перемагничивания на кривой электродвижущей силы от времени.

Кроме того повышение чувствительности системы обеспечивается:

- использованием аморфных микропроводов с положительной магнитострикцией, для которых характерен бистабильный характер перемагничивания и, как следствие, большая крутизна и амплитуда пиков, соответствующих перемагничиванию, на кривой ЭДС от времени;

5 - использованием дифференциальной измерительной катушки в виде двух встречно включенных соленоидов или катушки, намотанной восьмеркой, что исключает влияние на измеряемый сигнал ЭДС, не связанной с перемагничиванием аморфного микропровода.

10 Значительный диапазон длины микропровода (от 20 до 150 мм) позволяет осуществить изготовление датчика для измерения нагрузок с большей или меньшей степенью локальности.

Признаки, отличающие предлагаемый датчик напряжений от наиболее близкого к нему, известного по патенту WO 2007116218 (прототип), характеризуют механизм размещения микропровода вдоль оси внешнего и дифференциального соленоидов, 15 позволяющий исключить влияние помех внешних магнитных полей, фиксация микропровода через промежуточные нити или пластины краевыми подвижными держателями, наличие разъемного корпуса устройства, позволяющего производить замену внутренних элементов корпуса устройства (внешнего соленоида, дифференциальной измерительной катушки, аморфного микропровода, алюминиевых 20 зажимных держателей, промежуточных нитей или пластин), возможность одновременной регистрации коэрцитивной силы, переключающего поля и временного сдвига пиков перемагничивания на кривой ЭДС от времени, использование микропровода различной длины (от 20 до 150 мм) для достижения большей или меньшей локальности измеряемого уровня напряжений.

25 Изобретение поясняется чертежами. На фиг. 1 изображен вид датчика сверху, на фиг. 2 изображена электрическая схема датчика, на фиг. 3 изображено изменение сигнала ЭДС, возникающего при перемагничивании микропровода, при растяжении микропровода.

30 На фиг. 1, 2 показаны промежуточные нити или пластины 1, дифференциальная измерительная катушка 2, внешний соленоид 3, корпус датчика 4, аморфный ферромагнитный микропровод 5, краевые зажимные подвижные держатели 6, промежуточные пластины с круговым вырезом в центре 7, алюминиевые зажимные держатели 8, генератор синусоидальных импульсов 9, АЦП 10.

35 На фиг. 3 а на представленном графике по оси Y приведены значения ЭДС в мВ, возникающей в дифференциальной катушке при перемагничивании микропровода, по оси X отложены значения времени в мкс. На фиг. 3 б на представленном графике по оси Y приведены значения напряженности магнитного синусоидального поля в эрстедах. По оси X отложены значения времени в мкс. Как видно из фиг. 3 а, при приложении 40 внешней растягивающей нагрузки положение интенсивного пика ЭДС кривой перемагничивания смещается вправо по оси времени. Данный факт используется для оценки изменения уровня напряжений без сопоставления значений сигнала ЭДС и внешнего магнитного поля.

Датчик работает следующим образом. Датчик может быть инсталлирован на 45 поверхность объекта измерения с помощью клеевого соединения или сварки объекта с краевыми зажимными подвижными держателями 6. При приложении к объекту измерений механических нагрузок (растягивающих или скручивающих) микропровод 5 также испытывает данные нагрузки, что приводит к изменению величины коэрцитивной силы и переключающего поля. Это может быть полезно для анализа

типа механической нагрузки. При этом штатным режимом работы датчика является анализ сдвига пика сигнала ЭДС по шкале времени при изменении напряженного состояния микропровода. Штатная частота работы датчика составляет 2,5 кГц. Для повышения амплитуды измеряемого сигнала и чувствительности возможно увеличение

данной частоты вплоть до 10 кГц.

Сигнал ЭДС, возникающей при перемагничивании микропровода в отсутствие внешней нагрузки, считается опорным и соответствует нулевому значению напряжений.

Крепление микропровода 5 алюминиевыми зажимными держателями 8 позволяет проводить замену чувствительного элемента (микропровода 5) в случае его повреждения или необходимости изменения чувствительности датчика внешним механическим воздействиям. При этом возможно снятие корпуса датчика 4 для замены микропровода 5 без непосредственного демонтажа датчика с исследуемого объекта. Для этого корпус датчика 4 должен иметь меньшие максимальные поперечные размеры, чем краевые зажимные подвижные держатели 6.

Изменение диапазона механических напряжений, в которых может работать датчик, возможно путем применения микропроводов: 1) различного диаметра, что соответствует различному исходному уровню закалочных напряжений; 2) с различной толщиной стеклянной оболочки по отношению к диаметру провода (чем выше данный параметр, тем большим внутренним уровнем напряжений обладает микропровод). Исходно наиболее напряженные микропровода обладают более резким изменением коэрцитивной силы, переключающего поля, сдвига пика кривой ЭДС при приложении внешней механической нагрузки.

В предложенном датчике достигаются улучшенные в сравнении с аналогами магнитомеханические характеристики за счет: 1) возможности применения микропроводов с различным напряженным состоянием и длиной; 2) использования микропроводов с положительной магнитострикцией, характеризующиеся наиболее резкими и интенсивными зависимостями сигнала ЭДС от времени, возникающими в измерительной катушке при перемагничивании микропровода; 3) возможности применения трех способов регистрации изменения напряженного состояния (по изменению коэрцитивной силы, переключающего поля, путем непосредственной регистрации времени сдвига пика кривой ЭДС при растяжении). При этом в датчике реализована возможность замены чувствительного элемента в случае его повреждения или необходимости изменения параметров датчика.

#### (57) Формула изобретения

Датчик измерения механических напряжений на основе микропроводов с положительной магнитострикцией, состоящий из аморфного ферромагнитного микропровода, размещенного по оси дифференциальной измерительной катушки, представляющей собой два встречно включенных симметрично расположенных соленоида или катушку, намотанную восьмеркой, и внешней катушки, задающей переменное магнитное поле вдоль оси микропровода, в которой концы микропровода фиксированы зажимными держателями, соединяющими микропровод с промежуточными нитями или пластинами, другие концы которых закреплены краевыми зажимными подвижными держателями, ограниченными со стороны катушки упорами, препятствующими изгибу провода относительно оси катушки, при этом внешняя катушка соединена с генератором синусоидальных импульсов для генерации вдоль оси катушки однородного синусоидального магнитного поля, а дифференциальная катушка подключена к аналого-цифровому преобразователю напрямую или через усилитель

мощности, при этом аналого-цифровой преобразователь подключен к персональному компьютеру, отличающийся тем, что аморфный микропровод размещен вдоль оси внешнего и дифференциального соленоидов, позволяет исключить влияние помех внешних магнитных полей, при этом аморфный микропровод фиксирован между

5 краевыми подвижными держателями через промежуточные нити или пластины, при этом внешний соленоид, дифференциальная катушка и аморфный микропровод размещены в разъемном корпусе устройства, позволяющем производить замену внутренних элементов корпуса, а именно внешнего соленоида, дифференциальной измерительной катушки, аморфного микропровода, алюминиевых зажимных

10 держателей, промежуточных нитей или пластин, при этом существует возможность одновременной регистрации коэрцитивной силы, переключающего поля и временного сдвига пиков перемангничивания на кривой ЭДС от времени и использования микропровода различной длины от 20 до 150 мм для достижения большей или меньшей локальности измеряемого уровня напряжений.

15

20

25

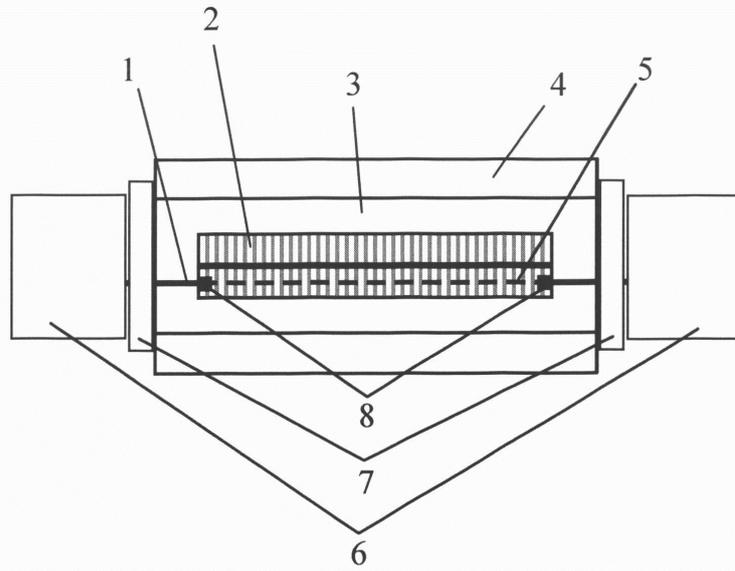
30

35

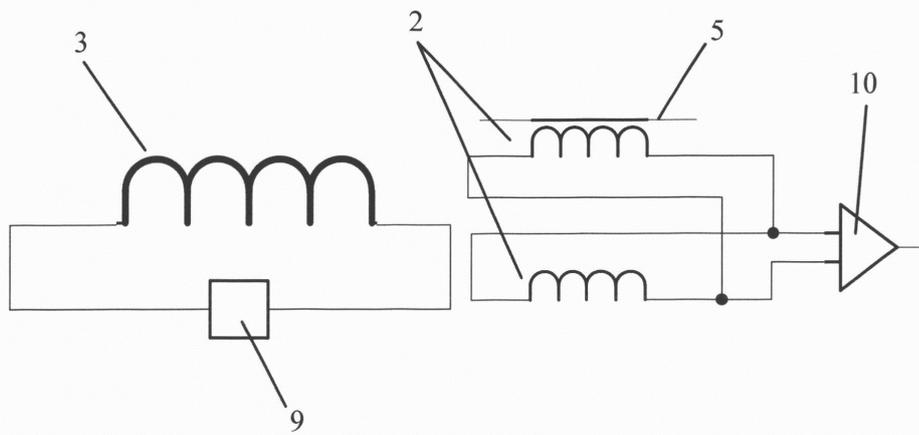
40

45

1

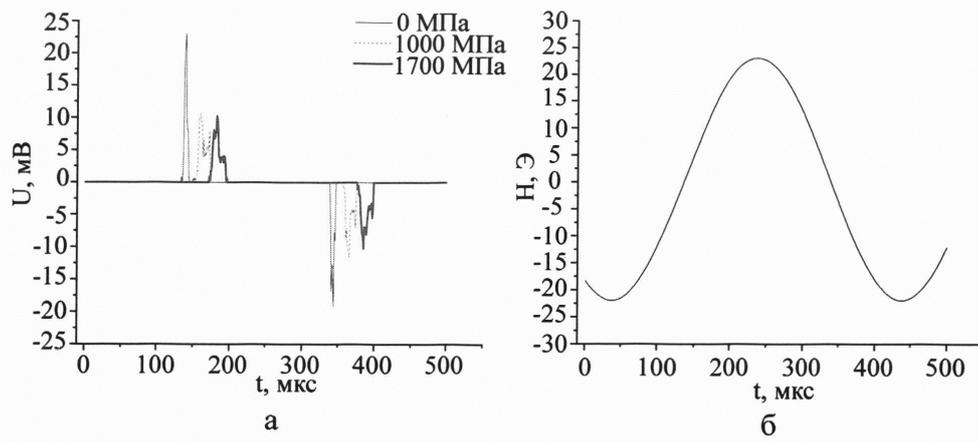


Фиг. 1



Фиг. 2

2



Фиг. 3