

DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-18-22

УДК 537.811



О структуре устройства для измерения остаточных напряжений

Н. Ф. Врублевский¹, О. А. Короткий¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

Рассматривается актуальная задача – повышение точности измерения остаточных напряжений в элементах машин и конструкций с использованием накладных преобразователей.

Проведен анализ гибких токовихревых преобразователей, выполненных в виде однослойной катушки. Для решения задачи предложен метод вихревых токов, который можно использовать при установке градуировочного значения магнитного сопротивления воздушного зазора между преобразователем и объектом.

Показана реализация этого метода на основе схемы генератора с реактивным контуром. Обосновано выполнение блока измерения остаточных напряжений в виде автогенератора по схеме «емкостная трехточка». Предложена структура устройства для измерения напряжений. Главным узлом блока установки является автогенератор с реактивным частотозадающим колебательным контуром, индуктивностью которого является катушка возбуждения токовихревого преобразователя. Измерение магнитного сопротивления зазора осуществляется путем перемещения преобразователя до вертикали относительно поверхности объекта в зоне измерения. В схему предлагаемого устройства входят блок установки магнитного сопротивления зазора, токовихревой преобразователь, электронно-счетный частотомер, блок измерения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, магнитоупругий преобразователь, токовихревой преобразователь, магнитное сопротивление воздушного зазора, автогенератор, чувствительность измерений, нестабильность зазора, погрешность измерения, напряженное состояние

Для цитирования:

Врублевский Н. Ф., Короткий О. А. О структуре устройства для измерения остаточных напряжений // Радиопромышленность. 2018. Т. 28, № 3. С. 18–22. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-18-22

On the structure of the device for measuring residual stresses

N. F. Vrublevskiy¹, O. A. Korotkiy¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, Russia

The article deals with a relevant problem – improvement of the accuracy of measurement of residual stresses in the elements of machines and structures with the use of attachable transducers.

Analysis of flexible current-vortex transducers designed in the form of a single-layer coil has been performed. To solve the problem, the method of eddy currents is proposed, which can be used to set the calibration value of the magnetic resistance of the air gap between the transducer and the object.

This method implementation based on the scheme of the oscillator with a reactive circuit has been demonstrated. The design of the residual stress measurement unit in the form of «capacitive three-point» self-excited oscillator has been substantiated. The structure of the device for measuring stresses has been proposed. The core element of the calibration value setting unit is a self-excited oscillator with a reactive frequency oscillating circuit, the inductance thereof been the excitation coil of the current-vortex transducer.

Magnetic resistance of the gap is measured by moving the transducer vertically versus the surface of the object in the measurement area. The circuit of the proposed device consists of a block for setting the gap magnetic resistance, eddy-current transducer, electron-counting frequency meter, and residual stress measuring unit.

Keywords: residual stresses, magnetoelastic transducer, eddy current transducer, air gap magnetic resistance, self-exciting oscillator, measurement sensitivity, gap instability, measurement error, stress condition

For citation:

Vrublevskiy N. F., Korotkiy O. A. On the structure of the device for measuring residual stresses. Radiopromyshlennost, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 18–22. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-18-22

Введение

Существенное влияние на формирование напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций оказывают остаточные напряжения δ . Аналитический расчет остаточных напряжений сложен и не всегда возможен. В связи с этим приобретает актуальность потребность в их экспериментальном определении.

Магнитный метод является весьма перспективным для измерения остаточных напряжений среди применяемых в промышленности. Он основан на взаимосвязи между напряженным состоянием ферромагнетика и имеющейся в этом случае преимущественной ориентацией векторов намагниченности доменов в определенном направлении [1–3]. Однако точность существующих средств измерения напряжений на основе магнитного метода не всегда удовлетворяет требованиям практики. Важнейшей причиной появления погрешностей является наличие переменного воздушного зазора между преобразователем и объектом. Указанный недостаток можно устранить в следующих случаях:

- при использовании преобразователя, конструкция которого обеспечивает стабилизацию зазора;
- если при измерении метода контроля и установки применяется зазор определенной величины.

Описание исследования

Анализ магнитоупругих преобразователей показал [4], что ошибки измерения, связанные с нестабильностью зазора, сравнительно невелики у одноосного токовихревого преобразователя, который выполнен в виде гибкой однослойной катушки. Однако такие преобразователи характеризуются сравнительно низкой чувствительностью и зависимостью результатов измерений от свойств металла в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

При этом методы контроля величины зазора недостаточно разработаны, вследствие чего практически не используются.

На основании изложенного могут быть сформулированы следующие задачи:

- исследовать магнитоупругий катушечный преобразователь для измерения остаточных напряжений δ и разработать направления повышения точности и чувствительности проводимых с его использованием измерений;
- определить причины образования нестабильного зазора между преобразователем и объектом;
- исследовать и разработать метод повышения точности измерения остаточных напряжений, контроль зазора между преобразователем и объектом и практическую реализацию.

В соответствии с результатами исследования [4], значительное повышение точности измерений, проводимых с использованием гибких магнитоупругих катушечных преобразователей, позволяющих в определенной степени стабилизировать величину зазора, достигается в том случае, если значение основного конструктивного параметра преобразователя K , равного отношению его короткой стороны (оси) к длинной, отвечает условию $0,1 \leq K \leq 0,2$, а катушка возбуждения преобразователя снабжена эластичным магнитопроводом, связь с которым имеют только длинные стороны катушки.

При выборе метода измерения остаточных напряжений целесообразно соблюдение идентичности методов, используемых при установке градуировочного значения магнитного сопротивления зазора $R_{MЗгр}$ и измерении остаточных напряжений. Учитывая эти факторы, при нахождении δ рационально применить токовихревой метод [4].

Как перспективное и развиваемое направление рассматривается создание основанных на резонансных методах измерения средств технологического контроля, в том числе, очевидно, и средств измерения остаточных напряжений. Характеристикой качества измерительного прибора может служить его чувствительность. Проведенное в [5] исследование основных типов резонансных приборов (Z – метр, реагирующий на изменение модуля комплексного сопротивления; Q – метр, реагирующий на изменение активной составляющей; F – метр, реагирующий на изменение реактивной составляющей; автогенераторный измерительный прибор с индуктивным преобразователем, включенным в колебательный контур) показало, что чувствительность автогенераторного прибора к контролируемому параметру не менее чем на порядок превышает чувствительность Z -метра и значительно выше чувствительности Q -метра.

Кроме того, автогенераторные методы измерения, по сравнению с другими резонансными методами, позволяют упростить структуру, что повышает разрешающую способность измерительных приборов. На основании изложенного преобразователь следует использовать в качестве элемента частотно-зависимой цепи, работающей в режиме автоколебаний. Изменение параметров преобразователя в зависимости от электромагнитных свойств металла объекта, связанных с напряженным состоянием, оказывает непосредственное влияние на частоту собственных колебаний этой цепи. То есть схема измерения остаточных напряжений – «блок измерения» – представляет собой автогенератор, включающий в себя в качестве индуктивного элемента колебательного контура измерительный токовихревой преобразователь, параметры которого определяют частоту автоколебаний, регистрируемую частотомером. В большинстве случаев измерительные автогенераторы с использованием

в колебательном контуре токовихревого преобразователя строятся на основе трехточечных схем [5]. Колебательная система автогенератора содержит один или два колебательных контура. Целесообразно использовать более простую одноконтурную схему, в которой преобразователь включен в коллекторную цепь активного элемента. Такая схема (емкостная трехточка) находит наибольшее применение в одноконтурных измерительных автогенераторных схемах [6].

Проведение измерений на нескольких частотах позволяет получить представление о послыном характере изменения магнитных свойств металла и связанных с ними остаточных напряжений [7].

Измерение остаточных напряжений желательно проводить при такой напряженности магнитного поля в металле объекта, которая обеспечивает получение магнитной проницаемости, близкой к максимальному ее значению. При данном значении магнитной проницаемости μ и тех же значениях f и r глубина проникновения вихревых токов δ и, следовательно, контролируемый слой металла оказываются уменьшенными. Для сохранения прежнего его значения частоту f следует снизить в то же число раз, во сколько выросла магнитная проницаемость, а это сопровождается уменьшением абсолютного значения изменения частоты работы автогенератора при том же изменении напряженного состояния и, следовательно, снижением чувствительности измерений. Поэтому выбор режима проведения измерений остаточных напряжений должен решаться для каждого конкретного случая отдельно.

Таким образом, измерительный преобразователь, как это следует из сказанного, должен содержать две катушки возбуждения, принадлежащие блокам установки и измерения, и гарантировать одинаковые с точки зрения распределения магнитных потоков условия работы катушек в режимах установки и измерения. Очевидно, что конструктивные параметры катушки возбуждения преобразователя и его магнитопровод должны соответствовать изложенным в [4] выводам и рекомендациям.

Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

Устройство для измерения остаточных напряжений содержит:

- генераторный токовихревой преобразователь;
- блок установки градуировочного значения магнитного сопротивления зазора между преобразователем и объектом;
- блок измерения остаточных напряжений;
- электронно-счетный частотомер.

Исследование процесса измерения остаточных напряжений с целью разработки метода контроля зазора [4] показало, что:

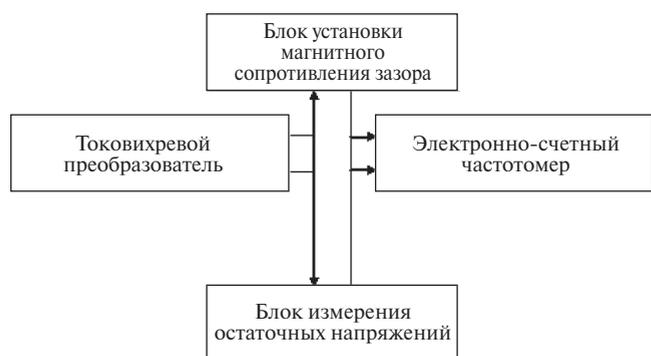


Рисунок 1. Структурная схема устройства для измерения остаточных напряжений

Figure 1. Block schematic diagram of the device for measurement of residual stresses

- чувствительность преобразователя в зависимости от режима питания возрастает в 16–17 раз;
- нестабильность зазора между преобразователем и объектом связана с наличием волнистости и шероховатости поверхности объекта, что исключает контроль зазора в единицах длины;
- контроль зазора следует осуществлять по величине его магнитного сопротивления $R_{МЗ}$, значение которого должно быть минимальным и одинаковым при градуировке устройства и измерениях и равным его градуировочному значению $R_{МЗгр}$.

Установку градуировочного значения магнитного сопротивления воздушного зазора необходимо проводить с отстройкой от влияния переменных магнитных свойств металла объекта, что может быть осуществлено с использованием метода вихревых токов [8].

Выявлено, что в этом случае целесообразно выключение преобразователя в частотоподающий колебательный контур автогенератора, частота работы которого определяется значением магнитного сопротивления зазора [4].

Разработана схема автогенератора с отрицательным сдвигом фазы в частотоподающем параллельном колебательном контуре (с реактивным контуром), что при $R_{МЗ} = R_{МЗгр}$ обеспечивает получение отстройки от влияния на частоту работы переменных магнитных свойств металла объекта при сравнительно невысокой частоте работы автогенератора [4, 9].

Схема автогенератора с реактивным контуром (рис. 2), устройство для измерения механических напряжений, работает на низких частотах и поэтому является предпочтительной в сравнении со схемой с резонансным контуром.

Выводы

По данным исследования и полученных результатов разработано устройство для измерения механических напряжений в объектах из ферромагнитных металлов [10], которое содержит П-образный магнитопровод с намагничивающей ω_1 и измерительной ω_2 обмотками, на торцах полюсов магнитопровода установлены ферритовые чашки. На кернах чашек находятся обмотки, выполненные с одинаковым направлением намотки и таким же числом витков, соединенные последовательно и включенные в качестве индуктивности L реактивного частотоподающего параллельного колебательного контура автогенератора блока установки градуировочного значения магнитного сопротивления зазора блока установки. Частотомером фиксируется частота работы автогенератора блока управления, при котором имеет место равенство $R_{МЗ} = R_{МЗгр}$.

Перемещением преобразователя относительно поверхности объекта устанавливается градуировочное значение суммарного магнитного сопротивления зазора $R_{МЗгр}$ между чашками и поверхностью объекта.

Погрешность установки магнитного сопротивления зазора $R_{МЗгр}$ в допустимом диапазоне измерения напряжения состояния образцов конструкционных сталей Ст35, Ст45 составляет менее чем 1%.

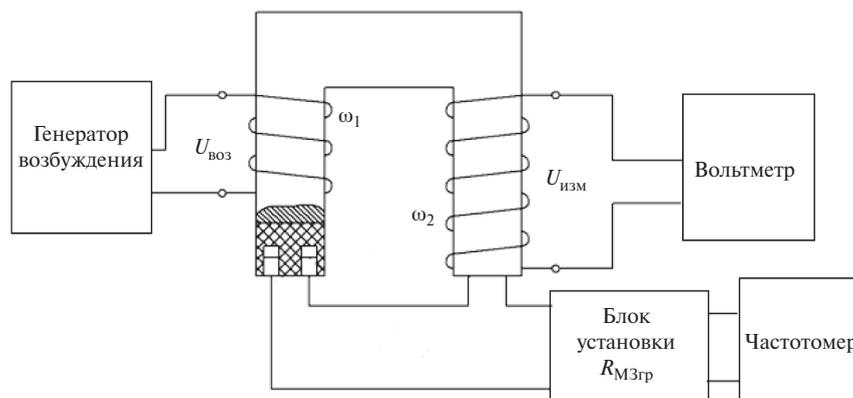


Рисунок 2. Схема автогенератора с реактивным контуром: ω_1 – намагничивающая обмотка; ω_2 – измерительная обмотка; $U_{воз}$ – напряжение возбуждения; $U_{изм}$ – измеряемое напряжение

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Орехов Г. Т., Состин А. Г. Измерение напряжений и деформаций магнитоупругим методом // Вести АН БССР. Серия физико-технических наук. 1974. № 3. С. 8–12.
2. Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. О. Н. Михайлова. Свердловск: НИИ Тяжмаш Уралмашзавода, 1971. 191 с.
3. Николаев А. С. Контроль напряжений в металлических конструкциях магнитоупругими тестерами. Л.: ЛДНТП, 1968. 14 с.
4. Врублевский Н. Ф. Повышение точности измерения остаточных напряжений в элементах машин и конструкций с применением магнитоупругих преобразователей: дис. канд. техн. наук. Москва: ИМАШ АН СССР, 1988. 174 с.
5. Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.
6. Дорощев А. А., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
7. Казаков В. А. Исследование распределения напряжений в поверхностных слоях материалов магнитоупругим методом // Научные труды ППИ. 1974. № 143. С. 8–12.
8. Шумиловсукий Н. Н. Метод вихревых токов. М.: Энергия, 1966. 174 с.
9. Авторское свидетельство СССР № 369471 / Айрапетов Э. Л., Глухов Н. А., Анархов В. И. Токвихревое устройство для измерения расстояния до металлической поверхности. Б. п.; № 9; 1973.
10. Авторское свидетельство СССР № 1307249 / Врублевский Н. Ф. Устройство для измерения механических напряжений в объектах из ферромагнитных металлов. Б. п.; № 16; 1987.

REFERENCES

1. Orekhov G. T., Sostin A.G. Measurement of stresses and deformations by magnetoelastic method. *Vesti AN BSSR. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 1974, no. 3, pp. 8–12. (In Russian).
2. Mikhailov O. N., ed. *Ostatochnye napryazheniya v zagotovkakh i detalyakh krupnykh mashin* [Residual stresses in workpieces and parts of large machines]. Sverdlovsk, NII TyazhmashUralmashzavoda Publ., 1971, 191 p. (In Russian).
3. Nikolaev A. S. *Kontrol napryazhenii v metallicheskiykh konstruksiyakh magnitoprugimi testerami* [Control of stresses in metal structures by magnetoelastic testers]. Leningrad, LDNTP Publ., 1968, 14 p. (In Russian).
4. Vrublevskii N. F. *Povyshenie tochnosti izmereniya ostatochnykh napryazhenii v elementakh mashin i konstruksii s primeneniem magnitoprugikh preobrazovatelei* [Improvement of accuracy of measuring residual stresses in machine elements and structures elements with the use of magnetoelastic transducers]. Thesis of the Candidate of Technical Sciences. Moscow, IMASH AN SSSR Publ., 1988, 174 p. (In Russian).
5. Arsh E. I. *Avtogeneratornye metody i sredstva izmerenii* [Self-exciting methods and measuring instruments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 256 p. (In Russian).
6. Doroshev A. A., Kazamanov Yu. G. *Elektromagnitnaya defektoskopiya* [Electromagnetic flaw detection]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 232 p. (In Russian).
7. Kazakov V. A. Investigation of stress distribution in surface layers of materials by magnetoelastic method. *Nauchnye trudy PPI*, 1974, no. 143, pp. 8–12. (In Russian).
8. Shumilovsukii N. N. *Metod vikhrevykh tokov* [Eddy current method]. Moscow, Energiya Publ., 1966, 174 p. (In Russian).
9. Airapetov E. L., Glukhov N. A., Anarkhov V. I. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR no. 369471. Tokovikhrevoe ustroystvo dlya izmereniya rassoyaniya do metallicheskoj poverkhnosti* [Eddy current device for measuring the distance to a metal surface]. B. p., № 9, 1973. (In Russian).
10. Vrublevskii N. F. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR no. 1307249. Ustroystvo dlya izmereniya mekhanicheskikh napryazhenii v obektakh iz ferromagnitnykh metallov* [A device for measuring mechanical stresses in objects made of ferromagnetic metals]. B. p., no. 16, 1987. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Врублевский Николай Федорович, к.т.н., доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел.: +7 (910) 521-31-00.

Короткий Олег Александрович, к.т.н., доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел.: +7 (4842) 718-402, e-mail: innovation@typhoon-jsc.ru.

AUTHORS

Nikolay F. Vrublevskiy, Ph.D. (Engineering), associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, 2, ulitsa Bazhenova, Kaluga, 248000, Russia, tel.: +7 (910) 521-31-00.

Oleg A. Korotkiy, Ph.D. (Engineering), associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, 2, ulitsa Bazhenova, Kaluga, 248000, Russia, tel.: +7 (4842) 718-402, e-mail: innovation@typhoon-jsc.ru.

Поступила 28.06.2018; принята к публикации 27.07.2018; опубликована онлайн 24.08.2018.

Submitted 28.06.2018; revised 27.07.2018; published online 24.08.2018.