

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ-СВИДЕТЕЛИ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

© 2019 г. В.Ф. Новиков<sup>1,\*</sup>, Н.А. Дроздов<sup>1,\*\*</sup>, С.М. Кулак<sup>1,\*\*\*</sup>, К.Р. Муратов<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
Д.Ф. Нерадовский<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: \*vitaly.nowikov2017@yandex.ru; \*\*kolyadroz dov1@yandex.ru; \*\*\*ksm-rabochi@rambler.ru;  
\*\*\*muratovkr@tyuiu.ru; \*\*\*\*\*denner81@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2018; после доработки 01.06.2019  
принята к публикации 14.06.2019

Для получения информации об усталостном состоянии и прогнозирования остаточного ресурса и надежности технических устройств необходимы соответствующие датчики и измерительные системы. Рассмотрена возможность использования для создания беспроводных первичных преобразователей усталостной наработки элемента конструкции наклеиваемых фольг, изготовленных из ферромагнитных материалов. Показано, что фольги толщиной 20—40 мкм, изготовленные из никеля, сплавов 50НП и 79НМ, существенно изменяют свои электромагнитные параметры при усталостном нагружении и в перспективе могут быть использованы для разработки датчиков усталости.

*Ключевые слова:* предупреждение усталости, напряженное состояние, ферромагнитная фольга, усталостное разрушение, датчик усталости.

**DOI:** 10.1134/S0130308219080050

### ВВЕДЕНИЕ

Определение эксплуатационного ресурса детали, конструкции машины, самолета и т.п. является важной научно-практической задачей [1—3]. Недооценка этого фактора приводит к уменьшению эксплуатационного ресурса изделий, а переоценка может привести к авариям и гибели людей. Поэтому необходимо иметь возможность предсказывать предразрушение конструкций прямо на объекте с помощью контроля изменения физических свойств его материала [4—6] или датчиков (приклеиваемых, накладных), расширять их арсенал и функциональные возможности [7, 8].

Известны методы контроля ресурса с помощью наклеиваемых немагнитных фольг. Так, в [7, 8] предложен метод определения усталостного ресурса с помощью датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ). Они представляют собой хорошо отполированную немагнитную фольгу (алюминий, медь, олово, индий), наклеенную на испытуемый образец. В процессе наработки в ней накапливаются дефекты и она начинает темнеть. Информация с датчиков считывается оптическим методом с помощью микроскопа и косвенно оценивается степень наработки элемента конструкции.

Цель предлагаемого исследования — поиск других материалов для разработки фольгового беспроводного преобразователя (датчика) усталости. Для этого предложено использовать ферромагнитные фольги в качестве элемента датчика (преобразователя) и электромагнитный способ считывания информации с помощью вихретокового дефектоскопа «Вектор» и разработанного прибора. При этом может быть реализован более простой способ считывания получаемой информации.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал фольги интегрального датчика усталости должен быть с высокой структурной магнитной чувствительностью, коррозионной стойкостью, необходимой прочностью и пластичностью.

В качестве материала для преобразователя выбраны коррозионно-стойкие, легко изготавливаемые в виде фольги толщиной 6—40 мкм никель и сплавы никеля 50НП и 79НМ. Физические свойства материалов фольги и подложки приведены в табл. 1 [9—11].

Никель уже при нагрузках выше  $\sigma_T \sim 80$  МПа подвергается пластической деформации и вследствие этого способен быстро накапливать дислокации и сбрасывать напряжения относительно подложки, поэтому, несмотря на его сравнительно высокую магнитострикцию, на изготовленной из никеля фольге в меньшей мере будут сказываться напряжения, обусловленные сопряжением фольги, клеявого соединения и подложки.

Пермаллой 79НМ имеет магнитострикцию, близкую к нулю, и поэтому на его электромагнитных свойствах практически не скажутся напряжения, обусловленные клеевым слоем и термиче-

Физические свойства фольг и подложки (испытываемого материала)

Материал	Модуль упругости $E, \times 10^5$ МПа	Предел текучести $\sigma_p$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Коэффициент термического расширения $\alpha \times 10^{-6}$	Магнитострикция $\lambda_s \times 10^{-6}$	Удельное электро-сопротивление $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Магнитная проницаемость $\mu$
Ni	2,0	80	460	23	-34	0,072	$10^2$
50НП	1,6	146	440	8,9	27	0,45	$10^3$
79НМ	2,1	144	490	10,6	0	0,50	$10^4$
Углепластик	1,6	–	1940	0,4	0	1420	1
Клей БФ-2	–	–	19,6	–	–	–	–
12Х18Н9Т	1,94	216	530	16,6	0	0,7	1

ской деформацией. Термические деформации вследствие большой разницы коэффициентов термического расширения будут больше всего при работе со стекло- и углепластиками. Они составят при перепаде температуре в 100 градусов заметную величину, но это будет уже термопластическая деформация. И если она циклически повторяется, то формируется термоциклическая усталость (например, у космических аппаратов).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований были изготовлены прокаткой образцы фольги из химически чистого никеля, а также ферромагнитных сплавов на его основе (79НМ-пермаллой, 50НП). Часть из них была подвергнута высокотемпературному отжигу в вакууме (900 °С).

Образцы размером  $\sim 30 \times 10 \times 0,02$  мм крепились клеем БФ-2 на прямоугольные пластины размером  $148 \times 11,5 \times 0,86$  мм из немагнитной стали 12Х18Н9Т (рис. 1). Термообработка клеевого соединения проводилась в течение 1 ч при температуре 140 °С.

Пластина с наклеенной на нее фольгой консольно крепилась в зажиме электромагнитного вибратора, питаемого низкочастотным генератором ГЗ-117 с усилителем, и совершала резонансные колебания с частотой порядка 60 Гц. Величина измеренной тензометрическим методом относительной деформации растяжения пластины в месте ее крепления и расположения фольги при заданной амплитуде вибрации  $A \sim 15$  мм составила  $\varepsilon = 0,00183$ , модуль упругости стали —  $\sim 190\,000$  МПа (см. табл. 1), максимальные напряжения изгиба пластины — на уровне  $\sim 350$  МПа [12]. Количество циклов  $N$  нагружения каждой пластины определялось по времени его осуществления.



Рис. 1. Расположение девяти контрольных точек измерения параметров вихретокового сигнала на датчике усталости (фольге) испытываемого пластинчатого образца.

Поскольку механические свойства материалов фольг и их геометрические размеры уступают стали 12Х18Н9Т, то следует ожидать их практически одновременного разрушения.

На каждой фольге были отмечены по девять точек измерения, расположенных на трех равноудаленных друг от друга и краев фольги осях изгибной деформации. Точки с порядковыми номерами 1, 2, 3 были ближе к месту консольного крепления испытываемого образца, следовательно, в них фольга испытывала наибольшие деформации. Минимальные осевые деформации растяжения/сжатия фольги изгибом создавались в точках 7, 8, 9, а среднего уровня напряжения фольга испытывала в точках 4, 5, 6. С каждой точки фольги снимались показания  $\vec{Z} = X + i \cdot Y$  вихретокового прибора «Вектор» с интервалом 5 мин [13].

Перед испытанием производилась калибровка вихретокового преобразователя на эталонном образце: отдельно определялся сигнал от стали, фольги, стали с наклеенной фольгой. Так как магнитная проницаемость фольг на 2-4 порядка выше (см. табл. 1), их полное сопротивление на 1-2 порядка выше, чем от стальной поверхности. Вследствие чего, вихретоковый прибор «Вектор» заглублялся так, чтобы сигнал от приклеенной фольги составлял несколько десятков единиц, а сигнал от стали — единицы, то есть практически не влиял на результаты измерений.

В предлагаемой работе усталостные испытания образцов продолжались до разрушения несущей пластины из стали 12Х18Н9Т вблизи ее зажима в испытательной вибрационной машине, которое проявляется в падении частоты электромагнитного преобразователя, расположенного на фольге. После этого опыт прекращался, снималось число  $N$  полных циклов нагружения, испытанных пластиной. При испытаниях разрушается и фольга (появляются трещины, показанные на рис. 5, 6). При этом количество циклов  $N$ , испытанных пластинами с фольгами из не отожженных Ni и сплава 50НП до появления явной трещины, составило ~139 000 и 135 000 соответственно, а пластинами с фольгой из сплава 79НМ — до 250 килоциклов (достижения максимума резонансной частоты прибора) (рис. 9). После отжига фольга из 50НП испытала большее число циклов нагружения до разрушения пластины (~153 000 циклов).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам измерения параметров вихретокового сигнала [12] были построены графики зависимостей вещественной  $X$  и мнимой  $Y$  компонент от количества колебательных циклов  $N$ . На рис. 2—4, 7, 8 приведены результаты измерения мнимой компоненты  $Y$  параметра  $Z$  для разных марок железоникелевой фольги в точках 2, 5, 8, расположенных вдоль ее средней линии на разном расстоянии от места консольного крепления в зависимости от числа циклов нагружения. В остальных шести точках велико влияние на уровень сигнала краевых эффектов и в анализе эти результаты не учитывались.

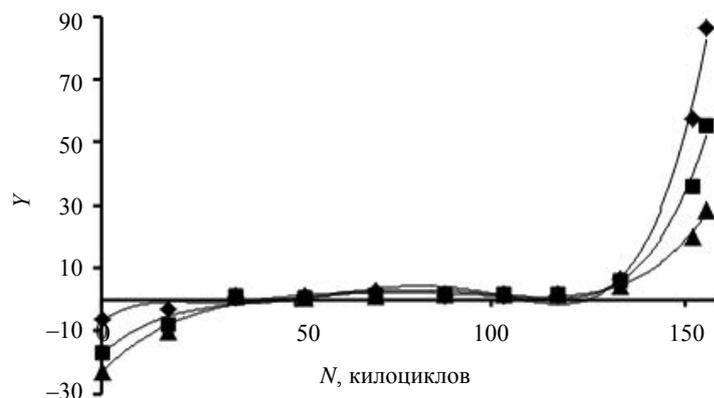


Рис. 2. Зависимость мнимой компоненты  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  в разных точках средней линии не отожженной (наклепанной) никелевой фольги толщиной 20 мкм от числа циклов  $N$  ее нагружения до разрушения:

■ — точка 5 в центре фольги; ◆ — точка 2; ▲ — точка 8.

Из рис. 2 следует, что с увеличением числа циклов нагружения выходной сигнал монотонно растет до 40 000 циклов, практически не изменяется в диапазоне 40—120 тысяч, затем начинается его резкое увеличение вплоть до разрушения пластины. Монотонный рост сигнала от фольги пермаллоя (см. рис. 3) переходит в его резкое увеличение после 250 тысяч циклов нагружения. Аналогичное увеличение уровня сигнала перед разрушением наблюдается у фольги из сплава 50НП после 100 тысяч циклов деформации (см. рис. 4). При упругом циклическом деформировании стальной пластины изгибом в ее микрообъемах (в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов) происходит локальное знакопеременное пластическое (микропластическое) деформирование. Ее многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приведет к ослаблению сечения пластины и затем ее внезапному долому. Поскольку фольга имеет небольшую толщину, то она испытывает при жестком клеевом соединении почти такую же деформацию, как и основа (пластина). Поэтому подобные изменения происходят и в наклеенной фольге. Возникновение в основе магистральной трещины (рис. 6) приводит в ряде случаев и к разрыву фольги (рис. 5). В ней зарождаются новые дефекты, дислокации и

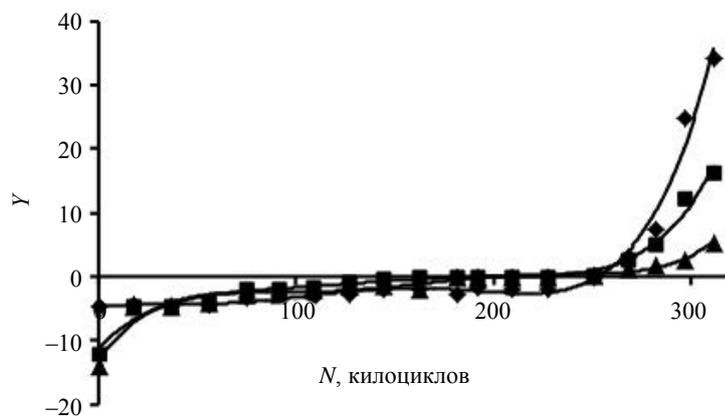


Рис. 3. Зависимость мнимой компоненты  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  в разных точках средней линии не отожженной (наклепанной) пермаллоевой фольги толщиной 20 мкм от числа циклов  $N$  ее нагружения до разрушения:  
 ■ — точка 5 в центре фольги; ◆ — точка 2; ▲ — точка 8.

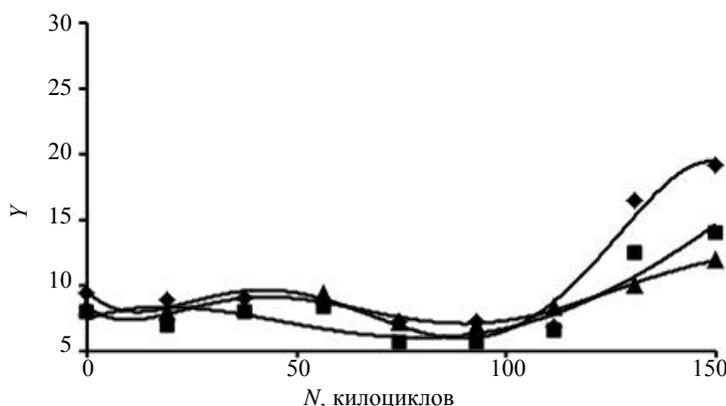


Рис. 4. Зависимость мнимой компоненты  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  в разных точках средней линии не отожженной (наклепанной) фольги из сплава 50NiP толщиной 40 мкм от числа циклов  $N$  нагружения до появления магистральной трещины:  
 ■ — точка 5 в центре фольги; ◆ — точка 2; ▲ — точка 8.

формируются концентрация (возможно и релаксация у фольги из 50NiP) внутренних механических напряжений, зарождение и развитие микротрещин (см. рис. 5) [1—3]. Все эти структурные изменения фольги будут увеличивать ее омическое сопротивление, уменьшать магнитную проницаемость и, как следствие, приводить к росту частоты электромагнитного резонанса, возбуждаемого в ней с помощью накладного электромагнитного преобразователя, питаемого от автогенератора (рис. 9).

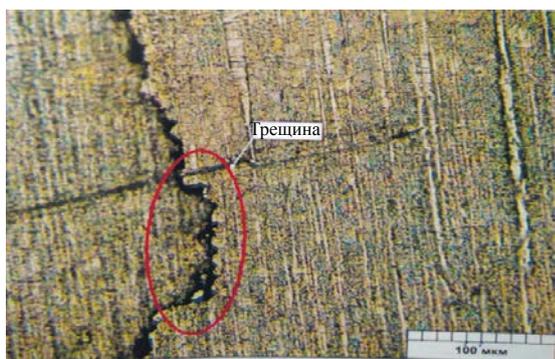


Рис. 5. Микрофотография пермаллоевой фольги с трещиной после усталостных испытаний.



Рис. 6. Фотография стальной пластины (масштаб 1:5) с образовавшейся в ней в ходе усталостных испытаний на изгиб магистральной трещиной вблизи зажима в месте расположения пермаллоевой фольги.

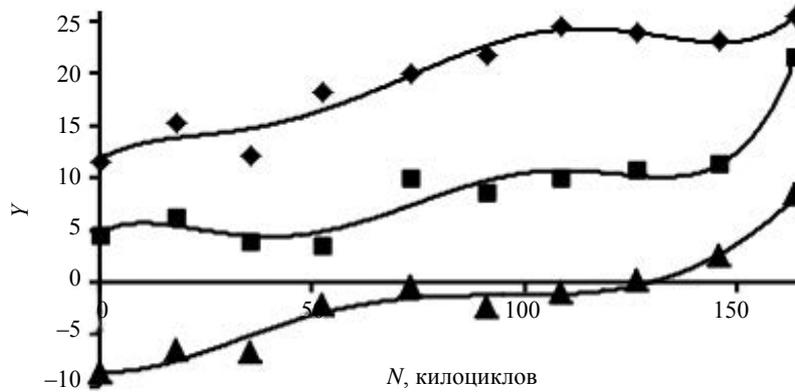


Рис. 7. Зависимость мнимой компоненты  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  в разных точках средней линии отожженной фольги из 50НП толщиной 40 мкм от числа циклов  $N$  ее нагружения:

■ — точка 5 в центре фольги; ◆ — точка 2; ▲ — точка 8.

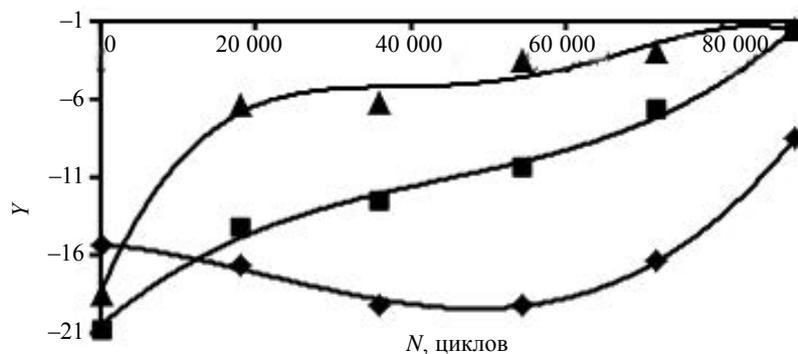


Рис. 8. Зависимость мнимой компоненты  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  в разных точках средней линии отожженной пермаллоевой фольги толщиной 20 мкм от числа циклов  $N$  ее нагружения:

■ — точка 5 в центре фольги; ▲ — точка 2; ◆ — точка 8.

Резкое увеличение сигнала вихретокового датчика, снимаемого с испытываемой фольги из никеля и сплавов железа с никелем незадолго до появления магистральных трещин в пластине разрушения, представляет интерес для диагностики предельного ресурса испытываемого материала как параметр для предупреждения критической ситуации элемента конструкции.

После отжига в вакууме при 900 °С происходит рекристаллизация материала фольги, плотность дефектов уменьшается, материал приобретает большую пластичность, магнитная проницаемость увеличивается, а электросопротивление падает. В этом случае увеличивается чувствительность фольги к усталостным нагружениям.

На рис. 7 показано, что мнимая компонента  $Y$  безразмерного параметра  $Z$  отожженной фольги из сплава 50НП монотонно растет с увеличением числа  $N$  циклов нагружения. Более крутой рост перед разрушением уже не так ярко выражен как у не отожженных фольг. Отжиг увеличивает наклон кривой и сдвигает точку резкого увеличения сигнала в сторону большего числа циклов. У пермаллоя (см. рис. 8) диапазон изменений значительно больше. Это позволяет, на наш взгляд, вариацией термообработки адаптировать чувствительность фольги к усталостным нагружениям.

Показания вихретокового прибора относительно, требуют настройки перед измерениями, поэтому была поставлена и решена задача создания прибора, который позволял бы отслеживать усталостные изменения фольги.

Опираясь на полученные результаты вихретокового контроля, изготовили П-образный индуктивный преобразователь, который вместе с исследуемой фольгой представляет датчик-свидетель контроля усталостных изменений нагружаемой пластины (см. рис. 9) [14, 15].

Из рис. 10 видно, что частота LRC-генератора, совмещенного с фольгой, растет с увеличением числа циклов вначале медленно, а затем резко, отражая убыль магнитной проницаемости и рост электросопротивления фольги в процессе усталостных испытаний.

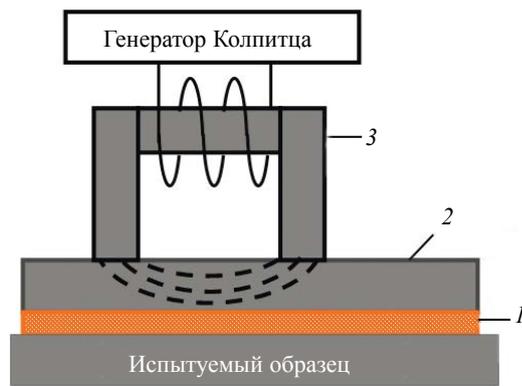


Рис. 9. Схема преобразователя электромагнитных параметров фольги:  
1 — слой клея; 2 — электромагнитный преобразователь (фольга); 3 — П-образный электромагнит.

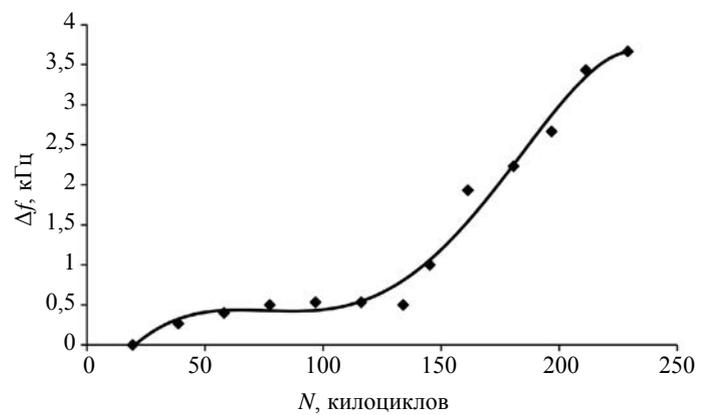


Рис. 10. Зависимость приращения частоты сигнала электромагнитного преобразователя, установленного на фольге НП-50, от числа колебательных циклов  $N$  ее нагружения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено использовать для разработки беспроводных датчиков усталости фольги, изготовленные из никеля и его сплавов, а информацию об усталостных изменениях получать или с помощью накладного вихревого датчика прибора «Вектор», или генератора LRC с накладным преобразователем.

2. Показано, что электромагнитные свойства ферромагнитных фольг толщиной 20—40 мкм чувствительны к усталостному воздействию и могут быть использованы для создания беспроводных датчиков-индикаторов усталостного разрушения элементов конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
2. Терентьев В.Ф., Корблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 479 с.
3. Нестеренко Б.Г. Развитие нормативных требований к усталости и живучести гражданских транспортных самолетов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 6. С. 51—55.
4. Новиков В.Ф., Семенов В.В., Бахарев М.С., Исаков В.В. О возможности неразрушающего определения предела выносливости стали 20Н2М // Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 65—71.
5. Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Соломаха Р.Н. Контроль усталости металла коэрцитиметрическим методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций / В мире неразрушающего контроля. СПб.: Изд-во ООО «Свен», 2009. № 2(44). С. 28—32.
6. Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Казаков Р.Х. Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 1. С. 19—25.
7. Панин С.В., Бурков М.В., Любутин П.С., Алтухов Ю.А., Хижняк С.А. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной поврежденности углеродных композитов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 47—59.
8. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформации интегрального типа. Новосибирск: Наука, 2004. 206 с.
9. Прецизионные сплавы / Справочник. Под ред. Б.В. Молотилова. М.: Metallurgia, 1974. 448 с.
10. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности материалов: учебное пособие. Долгopудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. 376 с.
11. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. 1981. OZON.ru. 335 с.
12. Дроздов Н.А. Электромагнитные преобразователи — свидетели предразрушения конструкции / В сб.: Новые технологии нефтегазовому району. Матер. Всерос. с междунар. участием научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2015. С. 154—157.
13. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. М.: Изд-во Спектр, 2011. 223 с.
14. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: ИНФРА-М, 2010. 432 с.
15. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Додэка-XXI, 2011. 528 с.