

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОЛИАМИДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Н.В. Анциферова

nika.n1k1@yandex.ru

SPIN-код: 5786-7760

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена диагностированию изделий из полимерных материалов, используемых в настоящее время на предприятиях по ремонту грузовых и пассажирских вагонов. Представлены основные проблемы, возникающие при проведении визуального неразрушающего контроля, и предполагаемые пути их решения в качестве цели работы. Рассмотрены процессы диагностирования полимерных изделий методом высокочастотного излучения, описаны основные параметры контроля и физический процесс воздействия на примере контроля сепаратора буксового узла. Показаны разработанные в рамках исследования устройства диагностирования, изложена методика конструирования технологической оснастки для осуществления процесса контроля.

Ключевые слова

Диагностирование, полимерные изделия, высокочастотный контроль, дефектоскопия, неразрушающий контроль, подшипник буксового узла, сепаратор, полимерные изделия

Поступила в редакцию 28.10.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Постановка задач. Изделия из полимерных композиционных материалов все чаще находят применение в современном машиностроении. В качестве примера таких изделий рассмотрим полиамидный сепаратор буксового узла, далее сепаратор. Буксовый узел служит одной из составляющих колесной пары вагона и содержит два подшипника (рис. 1). Каждый подшипник состоит из четырех частей: 1 — наружное кольцо; 2 — ролики; 3 — сепаратор — разделитель роликов (они не наезжают один на другой и не мешают друг другу перекатываться); 4 — внутреннее кольцо.

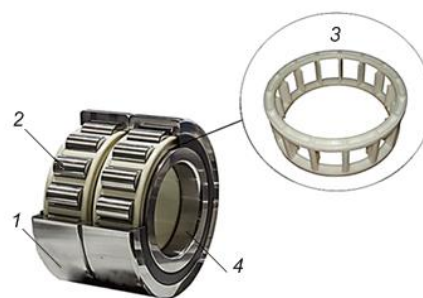


Рис. 1. Подшипник буксового узла

Для повышения надежности вагонных букс роликовые подшипники выпускают с сепаратором из полиамида, что обеспечивает снижение инерционных нагрузок. Этот вспомогательный элемент конструкции при нормальных усло-

виях эксплуатации и наличии достаточного количества смазки выполняет следующие задачи:

- обеспечение длительных равномерных работ;
- минимизация трения и тепловыделения;
- предотвращение проскальзывания и удержание элементов качения.

Согласно «Руководящему документу по ремонту и обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог», при плановых видах ремонта сепараторы подвергаются только визуальному контролю, этот метод является общедоступным [1]. Но по результатам анализа отказов буксовых узлов, полученных на предприятии вагоноремонтного профиля г. Иркутска, основными причинами неисправности полиамидных сепараторов служат трещины (67 %) и металлические включения (13 %). Данные виды дефектов не всегда удается выявить визуальным контролем, поскольку реально проверить можно только видимую часть контролируемого объекта, при этом выявить удастся только дефекты больших размеров. А между тем в 2019 г на станции Тайшет в результате излома полиамидного сепаратора оказался отцеплен вагон, а по причине образования трещины в сепараторе на станции Таловка был остановлен поезд.

Представленные данные позволяют говорить о том, что для безопасного и надежного функционирования изделия и узла в целом требуется разработать новый метод контроля, который можно применять на всех стадиях жизненного цикла.

На сегодняшний день существует много методов контроля полимерных изделий, но каждый имеет определенные недостатки. Например, при использовании виброакустического контроля иногда бывает необходимо механически воздействовать [2] на деталь, что не допускается руководящими документами ОАО «РЖД». Ультразвуковой способ отличается высокой трудоемкостью диагностирования пространственных изделий, метод испытания на растяжение (ранее используемый на предприятиях ОАО «РЖД») только усиливает развитие скрытых дефектов, кроме того, он не позволяет достоверно выявить характер дефекта (трещина, влага, инородные включения).

Литературно-патентный обзор позволил установить, что все известные методы, предназначенные для контроля полимерных изделий различной конфигурации, не позволяют решить проблему диагностирования в промышленных масштабах. Часть представленных методов можно автоматизировать для реализации контроля в массовом производстве, но это приведет к значительному увеличению стоимости устройств и к переподготовке специалистов в области неразрушающего контроля, а в некоторых случаях к увеличению продолжительности операций и ухудшению достоверности результатов. Достаточно перспективным для обеспечения достоверного контроля пространственных изделий является процесс диагностирования методом воздействия токов высокой частоты.

В связи с вышеизложенным целью данной работы является повышение качества изготовления и ремонта полиамидных сепараторов путем совершен-

ствования операции диагностирования. Поставлена задача разработать универсальную методику контроля, подходящую для деталей всех форм и размеров.

Устройство контроля. Алгоритм контроля. Экспериментальные исследования. Исследование метода проводили на базе электротермического устройства УЗП 2500 (рис. 2), позволяющего использовать частоту 27,12 МГц, при которой происходит максимальное и равномерное воздействие токов высокой частоты по всей глубине диэлектрического материала. В Российской Федерации применение данной частоты электромагнитных колебаний разрешено. В ходе исследования на базе установки разработано экспериментальное устройство диагностики полиамидных изделий методом высокочастотного излучения (см. рис. 2). При воздействии токов высокой частоты показателями наличия инородных включений (воздух, металл) в изделиях являются микрозаряды, возникающие на поверхностях трещин, пор, пустот, а также динамика разогрева при наличии металлических включений [3, 4]. При приближении температуры к номинальной (температура не должна превышать 90 % значения температуры плавления) мощность нагрева падает. Показатели режима работы оборудования зависят от физической величины, характеризующей состояние обрабатываемого материала, — тангенса угла диэлектрических потерь. Падение напряжения в момент разряда и при увеличении температуры вызовет изменение тангенса угла диэлектрических потерь и соответственно перераспределение электрофизических показателей работы оборудования.



Рис. 2. Электротермическая установка для реализации процесса диагностирования:

1 — защитный экран; 2, 3 — верхний и нижний электроды; 4 — привод для перемещения верхнего электрода и регулирования рабочего пространства; 5 — генератор высокочастотного излучения; 6 — рукоятка для регулировки мощности; 7 — амперметр; 8 — блок автоматизации и персональный компьютер

Наиболее информативным параметром работы высокочастотного (ВЧ) оборудования является анодный ток, поэтому при выявлении инородных включений следует делать выводы о состоянии объекта контроля исходя из его амплитуды [3–11]. Анализируя амплитуду и интенсивность микрозарядов, можно

характеризовать размер дефекта в полимере. В разработанном экспериментальном устройстве динамическое изменение анодного тока фиксируется линейным токовым датчиком и передается на микроконтроллер.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено по 15 образцов из полиамида 610 с дефектами «металлическое включение» и «нарушение сплошности», а также изготовлено 15 эталонных образцов. Толщина образцов без дефектов составляла 8 мм с точностью обработки $\pm 0,1$ мм, диаметр 30 мм. Для механической обработки образцов был выбран режим без температурного воздействия на структуру полиамида. Точность составила 0,01 мм, погрешность $\pm 0,5\%$ (предварительно образцы были проверены на отсутствие дефектов визуальным и ультразвуковым контролем). При выполнении эксперимента 15 эталонных образцов подвергали воздействию ВЧ-излучения и нагреву до температуры $T = 90\% \cdot T_{пл}$ диагностика проведена при постоянном напряжении с частотой 27,12 МГц. В результате воздействия динамика разогрева оставалась стабильной, без возникновения частичных разрядов, время нагрева варьировалось в интервале $111,4 \pm 7,88$ с (рис. 3, а). На рисунке представлены результаты для трех случайно выбранных образцов.

Для контроля изделий с нарушением сплошности было изготовлено 30 образцов из полиамида 610, толщина образцов для исследования составляла 4 мм; диаметр 30 мм. Один образец накладывался на другой, и в результате было получено 15 образцов с дефектом типа «воздушное включение» толщиной 0,3 мм. Для моделирования дефекта «металлическое включение» между двумя пластинами по 4 мм располагали медную деталь толщиной 0,5 мм и площадью 4 мм².

Результаты экспериментальных исследований при наличии металлического включения и в состоянии нарушения сплошности представлены на рис. 3, б, в. При наличии воздушного включения наблюдаются сильные скачки анодного тока, возникающие из-за появления микрозарядов в воздушном включении. Статистически обработанные экспериментальные данные показывают, что при контроле образца с нарушением сплошности количество микрозарядов составляет 37 ± 5 единиц, а при выявлении металлического включения установлено, что скорость нагрева варьируется в пределах $20,93 \pm 4,31$ °C/с. Таким образом, скорость нагрева образца с металлическим включением значительно выше, чем нормативная скорость нагрева образца без дефектов (см. рис. 3). После проведенных испытаний была определена нормативная скорость нагрева: для образца без дефекта скорость составляет 1,69...1,95 °C/с, а для изделия с дефектом «металлическое включение» — 8,00...12,15 °C/с.

По полученным значениям скорости нагрева можно определять не только наличие, но и размер металлического включения. Чем выше скорость разогрева, тем больших размеров металлическое включение. Как показали экспериментальные результаты и исследования ВЧ-воздействия, объем выявленного металлического включения в образцах может достигать 0,4 мм³.

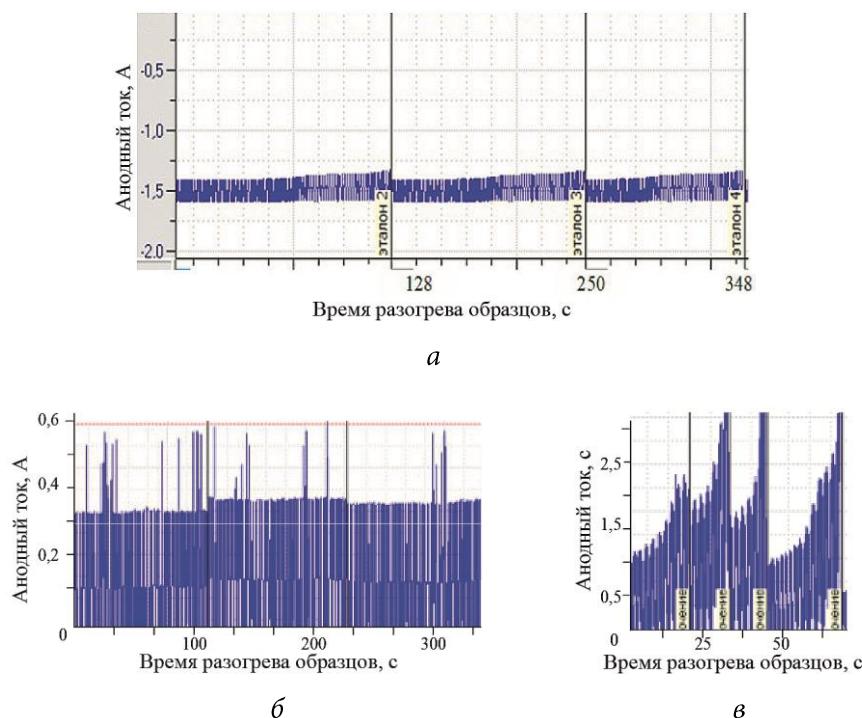


Рис. 3. Результаты процесса контроля (изменения анодного тока диагностируемых образцов):

a — бездефектный объект контроля; *б* — объект контроля с нарушением сплошности; *в* — объект контроля с металлическим включением

Однако при контроле деталей сложной конструкционной формы возникли проблемы, связанные с неравномерным воздействием высокочастотного поля на элементы изделия и расплавлением на участках неравномерной геометрической формы (рис. 4). При диагностировании сепараторы неоднократно подвергали воздействию ВЧ-излучения и нагреву до температуры $T = 90 \% \cdot T_{\text{пл}}$ диагностику проводили при постоянном напряжении с частотой 27,12 МГц.



Рис. 4. Результаты ВЧ-диагностирования полиамидного сепаратора без применения электродов

Проблему неравномерного воздействия ВЧ-поля на изделие переменного сечения на примерах полиамидного сепаратора можно решить путем конструирования оснастки с разбиением изделия на участки, представляющие собой в совокупности с электродами последовательность элементарных конденсаторов с воздушным зазором [3]. Для сепаратора был проведен расчет общей емкости системы плоскопараллельных конденсаторов, представляющих собой верхнюю

(нижнюю) поверхность перегородок (рис. 5). Затем была определена емкость конденсаторов, образуемых из перемычек сепаратора и электродов (рис. 5). Перемычки имеют сложную геометрическую форму с различными сечениями, поэтому электрод был условно разделен на две части (первая часть приложена к стенкам перемычек, а вторая имеет рассчитанный воздушный зазор). Первая часть представлена в виде множества равных по ширине дифференциально малых конденсаторов. Если углы направляющих перемычки α и β равны, емкость данного участка

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon \epsilon_0 S_i}{d + i \operatorname{tg} \alpha + i \operatorname{tg} \beta},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; d — расстояние между электродами; i — ширина i -го конденсатора, мм; S_i — площадь пластины i -го конденсатора; α, β — углы направляющих перемычек.

Емкость конденсатора на втором участке с воздушным зазором рассчитывали, как

$$C_{\text{в}} = \frac{\epsilon_{\text{воз}} \epsilon_0 S_i}{2l_i \operatorname{tg} \beta + 2l_i \operatorname{tg}(\alpha - \beta)},$$

где: l_i — высота i -го конденсатора, мм; S_i — площадь пластины i -го конденсатора, мм².

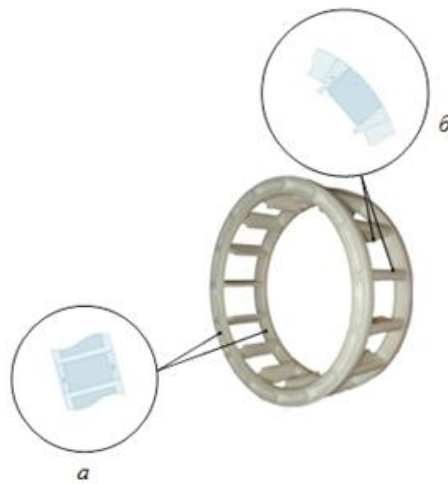


Рис. 5. Расположение конденсаторов:

a — верхняя и нижняя перегородка; *б* — перемычка

На втором участке без воздушного зазора емкость определяли по формуле

$$C_{\text{н}} = \frac{\epsilon_{\text{пол}} \epsilon_0 S}{2 \operatorname{tg} \beta (l - l_i)}$$

а общую емкость — как

$$C_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{vi} \cdot C_{ni}}{C_{vi} + C_{ni}}$$

Полученные расчеты показали, что элементарные конденсаторы, на которые был разбит сепаратор, с учетом разработанных воздушных зазоров имеют одинаковые емкости. Таким образом, при использовании оснастки излучение будет воздействовать равномерно и позволит выявить дефекты без разрушения детали.

В качестве объектов для дальнейших исследований были выбраны износоустойчивые накладки тележки 18-194-1 и тележки 18-194 (рис. 6). Такие детали имеют гарантированный межремонтный интервал до 500 тыс. км, но несмотря на гарантии выходят из строя раньше (50...70 тыс. км), из-за наличия дефектов, которые не поддаются визуальному контролю.

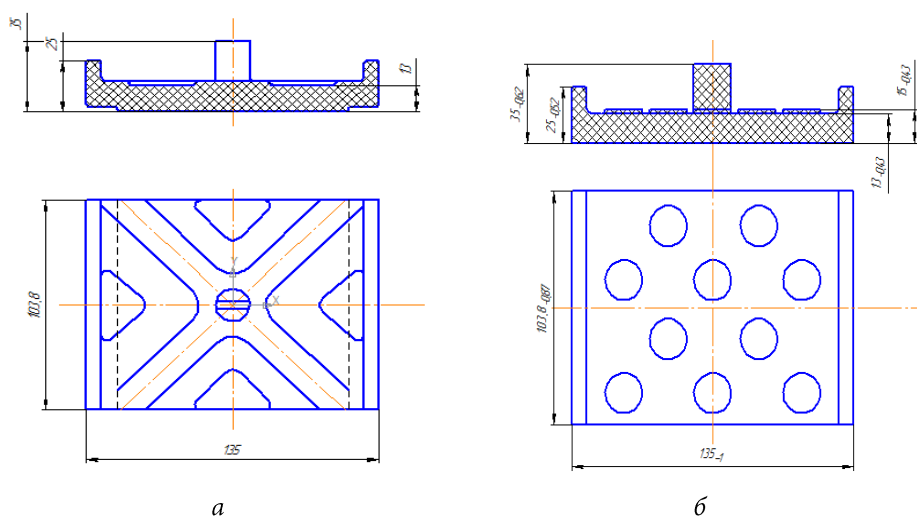


Рис. 6. Износоустойчивые накладки:

a — тележка 18-194-1; *б* — тележка 18-194

Для достижения равномерного воздействия на накладки по всему объему необходимо обеспечить равные значения емкости в каждом искусственно созданном конденсаторе, состоящем из электрода, регулируемого воздушного зазора и участка детали. Схема разбиения накладки на участки представлена на рис. 7.

Расчет плоских участков основывался на выражении определения емкости плоского конденсатора. Емкости конденсаторов, состоящих из емкости накладки и воздушного зазора, определялись из выражения

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_{\text{воз}}}$$

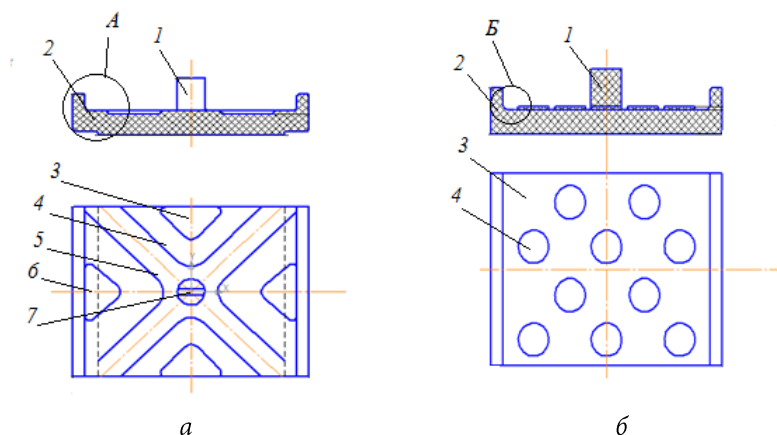


Рис. 7. Схема разбиения износостойкой накладки

a — тележка 18-194-1; *б* — тележка 18-194; 1 — цилиндрический участок;
2 — боковая стенка; 3-6 — углубления, выступы

Емкость воздушного зазора

$$C_{\text{воз}} = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}$$

Для обеспечения равных значений емкости необходимо учитывать размер воздушного включения

$$d_{\text{воз}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{C_{\text{воз}}}$$

Расчеты позволили определить, что все рабочие конденсаторы, составляют пространственную систему одинаковых по емкости конденсаторов. Такая конструкция позволяет осуществлять ВЧ-воздействие одновременно на все соединенные с электродами конструкционные элементы накладки за один цикл. В рамках работы были изготовлены электроды по представленным расчетам и выполнены испытания. Общий вид расположения электродов и объектов контроля при диагностировании токами высокой частоты показан на рис. 8.

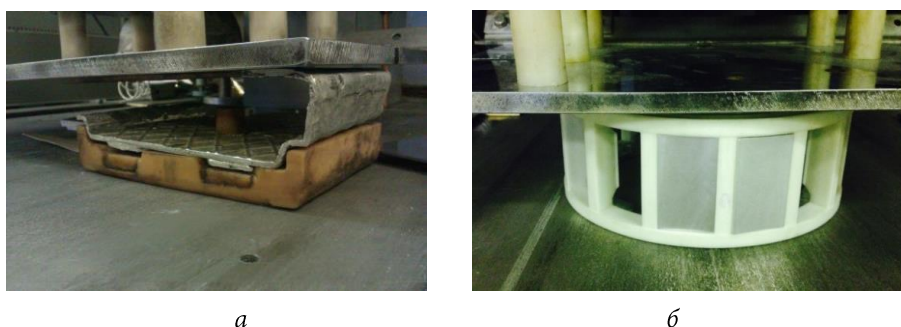


Рис. 8. Общий вид расположения электродов и объектов контроля при диагностировании различных объектов:

a — накладка; *б* — сепаратор

Заключение. В работе представлен разработанный способ высокочастотного контроля полиамидных изделий, показано устройство диагностирования, дано описание экспериментальных исследований. Важная роль отведена изучению процесса диагностирования сложных геометрических изделий. Представлена методика конструирования технологической оснастки для осуществления процесса контроля.

Литература

- [1] Руководящий документ по ремонту и обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. М., Совет по железнодорожному транспорту государств - участников Содружества, 2017.
- [2] Кузнецов А.О., Козельская С.О., Шипцов В.С. и др. Разработка технологии вихревого метода и аппаратуры обнаружения и определения глубины залегания малоразмерных металлических включений в полимерном композитном материале. *Контроль. Диагностика*, 2017, № 12, с. 42–47.
- [3] Сухогозов А.П., Косяков А.А. Исследование частичных разрядов в изоляции электрических машин. *Вестник УГТУ-УПИ*, 2003, № 5(25)-1, с. 363–371.
- [4] Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2019, т. 23, № 3, с. 463–471. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>
- [5] Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Устройство диагностики полиамидных сепараторов методом высокочастотного излучения. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2014, № 4(44), с. 162–168.
- [6] Сви П.М. Контроль высоковольтной изоляции методом частичных разрядов. М., Госэнергоиздат, 1962.
- [7] Ларченко А.Г. Автоматизированное устройство диагностирования полимерных изделий сложной конфигурации методом высокочастотного излучения. *Контроль. Диагностика*, 2016, № 2, с. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.14489/td.2016.02.pp.061-065>
- [8] Ларченко А.Г. Автоматизированное выявление дефектов в изделиях из полиамидных материалов методом высокочастотного излучения. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2014, № 1(41), с. 160–165.
- [9] Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., ред. Сварка полимерных материалов. М., Машиностроение, 1988.
- [10] Ларченко А.Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием изделий из полимерных материалов. *Автоматизация. Современные технологии*, 2015, № 8, с. 3–8.
- [11] Ларченко А.Г., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Инновационный метод диагностики изделий из полимерных материалов. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*, 2013, т. 2, с. 437–440.

Анциферова Никита Вадимовна — студентка кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация.

Научный руководитель — Ларченко Анастасия Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Анциферова Н.В. Методы контроля и высокочастотное диагностирование полиамидных изделий. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 11(52). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-11-654>

CONTROL METHODS AND HIGH-FREQUENCY DIAGNOSTICS OF POLYAMIDE PRODUCTS

N.V. Antsiferova

nika.n1k1@yandex.ru

SPIN-code: 5786-7760

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to diagnostics of products made of polymeric materials currently used at enterprises for the repair of freight and passenger cars. The authors presented the main problems arising during visual non-destructive testing, and the proposed ways of solving them as the goal of the work. The processes of diagnosing polymer products by the high-frequency radiation method are considered, the main control parameters and the physical process of exposure are described using the example of control of the axle box separator. The diagnostic devices developed within the framework of the research are shown, the method of designing the technological equipment for the control process is described.

Keywords

Diagnostics, polymer products, high-frequency testing, flaw detection, non-destructive testing, axle box bearing, separator, polymer products

Received 28.10.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Rukovodyashchiy dokument po remontu i obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovmymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm [Directive document on repair and maintenance of wheelset with box unit for wagons of 1520 (1524) mm main railway line]. Moscow, Sovet po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv - uchastnikov Sodruzhestva Publ., 2017 (in Russ.).
- [2] Kuznetsov A.O., Kozel'skaya S.O., Shchiptsov V.S., et al. Development of eddy current technology and instrumentation for detecting and determining occurrence depth of small-sized metal inclusions in polymer composite material. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing, Diagnostics], 2017, no. 12, pp. 42–47 (in Russ.).
- [3] Sukhoguzov A.P., Kosyakov A.A. Study on partial discharge in electric machines insulation. *Vestnik UGTU–UPI*, 2003, no. 5(25)-1, pp. 363–371 (in Russ.).
- [4] Larchenko A.G. Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 463–471. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471> (in Russ.).
- [5] Larchenko A.G., Filippenko N.G., Livshits A.V. Diagnostic device for polyamide separators with microwave inspection. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2014, no. 4(44), pp. 162–168 (in Russ.).
- [6] Svi P.M. Kontrol' vysokovol'tnoy izolyatsii metodom chastichnykh razryadov [Control on high-voltage insulation by means of electric discharges]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962 (in Russ.).

- [7] Larchenko A.G. Automated device diagnostics polymer products of complex configuration by high-frequency radiation. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2016, no. 2, pp. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.14489/td.2016.02.pp.061-065> (in Russ.).
- [8] Larchenko A.G. Automatic detection of defects in the product of a polyamide materials by a method of high radiation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2014, no. 1(41), pp. 160–165 (in Russ.).
- [9] Zaytsev K.I., Matsyuk L.N., eds. *Svarka polimernykh materialov* [Welding of polymers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988 (in Russ.).
- [10] Larchenko A.G. Automatic control system for high-frequency diagnosis of products from polymeric materials. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2015, no. 8, pp. 3–8 (in Russ.).
- [11] Larchenko A.G., Livshits A.V., Filippenko N.G. Innovation diagnostics technique for polymer parts. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*, 2013, vol. 2, pp. 437–440 (in Russ.).

Antsiferova N.V. — Student, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.

Scientific advisor —Larchenko A.G., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Antsiferova N.V. Control methods and high-frequency diagnostics of polyamide products. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 11(52). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-11-654.html> (in Russ.).