

чески неуравновешенную площадь аксиально-подвижного кольца; T – сила трения кольца, подвижного в осевом направлении, о корпус уплотнения (в расчете не учитывается); $P_{y\delta}$ – удельное нагружение контакта, выбираемое для пар трения экспериментально $P_{y\delta} = 0,4 \div 0,6$ МПа.

Составим уравнение моментов внешних сил относительно центра тяжести сечения, с учетом условия (2):

$$P_{\text{ПР}} \cdot l_{P_{\text{ПР}}} + R \cdot l_R + Q_2 \cdot l_{Q_2} - G \cdot l_G - Q_1 \cdot l_{Q_1} = 0, \quad (4)$$

где $Q_1 = \pi d_2 b_1$ – усилие от давления уплотняемой среды, действующее на участке b_1 ;

$Q_2 = \pi d b_2$ – усилие от давления уплотняемой среды, действующее на участке b_2 ;

$l_{P_{\text{ПР}}}, l_R, l_{Q_2}, l_G, l_{Q_1}$ – расстояние от центра тяжести до точки приложения соответствующих сил (см. рис. 1)

$$l_{P_{\text{ПР}}} = R_C - \frac{d_0 + d}{4}; \quad l_R = \frac{d_1 + 2d_2}{6} - R_C;$$

$$l_{Q_1} = \frac{b_1 + b_2}{2} - x_C; \quad l_G = \frac{d + d_2}{4} - R_C; \quad l_{Q_2} = x_C.$$

Координаты центра тяжести сечения:

$$R_C = \frac{S_x}{F} = \frac{b_1 \left(\frac{d_2^2 - d_0^2}{8} \right) + b_2 \left(\frac{d^2 - d_0^2}{8} \right)}{b_1 \left(\frac{d_2 - d_0}{2} \right) + b_2 \left(\frac{d - d_0}{2} \right)};$$

$$x_C = \frac{S_y}{F} = \frac{b_1 \left(\frac{d_2 - d_0}{2} \right) \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right)}{b_1 \left(\frac{d_2 - d_0}{2} \right) + b_2 \left(\frac{d - d_0}{2} \right)}. \quad (5)$$

Из рисунка 2: $b_1 + b_2 + \Delta b = L$.

Обозначив $\frac{b_1}{L} = B_1$; $\frac{b_2}{L} = B_2$ и пренебрегая ввиду малости

$\frac{\Delta b}{L} = 0$, где L – длина кольца, имеем:

$$B_1 + B_2 = 1. \quad (6)$$

Решая совместно (4) и (6), определяем соотношение размеров кольца b_1 и b_2 , удовлетворяющее условию (2).

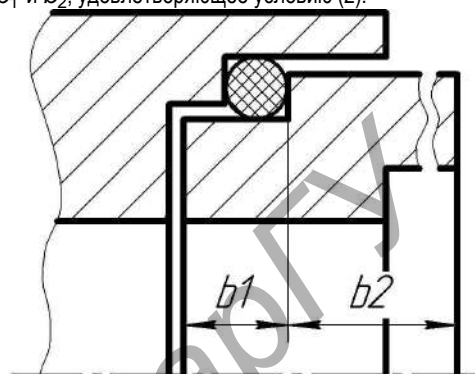


Рис. 2. Оптимальная форма сечения кольца

Заключение. Так, для конструкции торцевого уплотнения, имеющей при диаметре вала 120 мм размеры $d_2=150$ мм, $d_1=136$ мм, $d_0=130$ мм, $K=0,575$ и $d=142$ мм при давлении среды 1 МПа (10 кгс/см²), отношение размеров $b_2/b_1=2,61$. Для той же конструкции, но при давлении среды 5 МПа (50 кгс/см²), это соотношение $b_2/b_1=0,95$. То есть с повышением давления среды необходимо изменять форму сечения кольца, уменьшая размер b_2 . Этому условию отвечает форма сечения кольца, показанная на рисунке 2.

Материал поступил в редакцию 30.11.12

GOLUB V.M., GOLUB M.V., DOBRIYANIK Yu.A. KARDASH N.N. Optimization of geometry of contact rings of face consolidations

The article describes how to optimize the geometry of the contact rings of end seals. Found that high pressure sealed medium causes deformation of contact rings. The strain is dependent on the shape of the ring in the radial direction and position the sealing the rubber element on it. Calculated the main dimensions of end seals.

УДК 621.179

Дубень И.В., Гридюшко М.И., Ционенко Д.А.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ АБРАЗИВНЫХ ЧАШ

Введение. Современное производство развивается в условиях жесткой конкуренции, когда задачи контроля качества продукции выходят на первый план. При этом необходимо осуществлять контроль качества на каждом этапе технологической цепочки. К тому же дополнительные условия на процессы контроля накладывают требования ресурсосбережения. В связи с этим развитие методов неразрушающего контроля является актуальным направлением исследований.

Целью данной работы является разработка метода определения целостности и прочности изделий сложной формы, изготовленных из композиционных абразивных материалов. Для внедрения в произ-

водство необходимо выполнение следующих требований:

- 1) метод должен обеспечивать неразрушающий контроль изделий;
- 2) время, затрачиваемое на осуществление контроля, должно быть минимальным (экспресс-анализ);
- 3) необходимая точность измерений и расчетов должна обеспечиваться с доверительной вероятностью результатов не менее 95%;
- 4) метод должен обладать высокой помехоустойчивостью при выполнении измерений, расчетов и хранения результатов;
- 5) должна быть достигнута высокая степень автоматизации и визуализации процесса получения и обработки данных, а также

Дубень Игорь Викторович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки Барановичского государственного университета.

Гридюшко Милентий Иванович, заведующий лабораторией кафедры физико-математических дисциплин, инженерного факультета Барановичского государственного университета.

Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская обл-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

Ционенко Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Учреждения образования «Белорусский государственный аграрно-технический университет».

Беларусь, БГАТУ, 220023, г. Минск, пр. Независимости, 99.

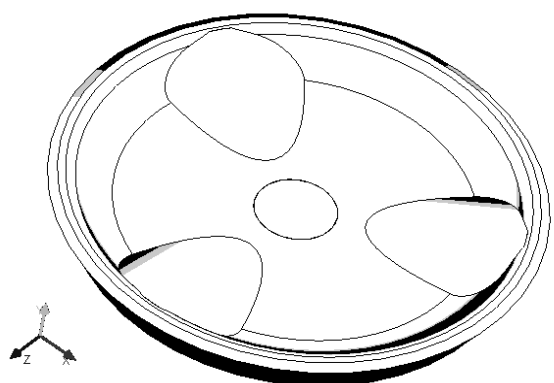
надежности записи и хранения информации.

Объект и метод исследований. Объектом исследований являются физические, физико-механические и технологические свойства изделия «Чаша абразивная МОК 150.18.004», которое является основным рабочим органом машины для мойки и очистки картофеля (ОАО «Торгмаш», г. Барановичи).

Метод исследования заключается в проведении серии экспериментов по определению существенных параметров, на основе которых можно сделать достоверное заключение о качестве изготовления изделия и его пригодности к эксплуатации.

Характеристика физических свойств чаши абразивной и обоснование выбора метода неразрушающего контроля. Чаша изготавливается из карбида кремния черного 53С160Н на бакелитовой связке. Форма чаши и внутренняя структура образца представлены на рисунке 1.

а)



б)

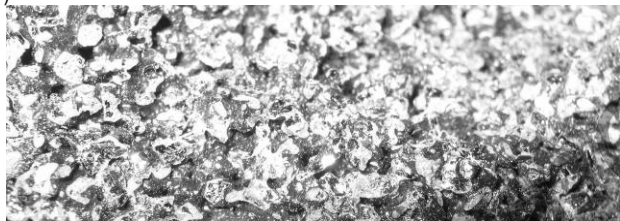


Рис. 1. Модель абразивной чаши, выполненная в программе T-FLEX (а) и ее внутренняя структура (б)

Для исследования физических свойств абразивных чаш была осуществлена случайная выборка 9 экземпляров из различных партий бакелита и карбида кремния, при этом хранение материалов и изготовление чаш производилось в различных условиях. Средняя масса образцов, отобранных для контроля, составила $m = 2,996 \pm 0,412$ кг. Средняя плотность образцов незначительно изменяется от одного образца к другому и составляет $\rho = (2,09 \pm 0,17) \cdot 10^3$ кг/м³. Коэффициент пористости $p = V_n / V$, где V_n – объем внутренних областей между зёрнами карбида кремния, не заполненных бакелитом, колеблется в диапазоне $p = 0,28 \dots 0,37$. Смещение положения центра масс относительно оси вращения составило $\Delta R = (2,5 \dots 14,8) \cdot 10^{-3}$ м. Предел прочности для чаш удовлетворительного качества – в интервале $\sigma_n = (327 \dots 465) \pm 50$ МПа, для чаш неудовлетворительного качества – $\sigma_n = 122 \pm 50$ МПа.

При измерении электрического сопротивления получен большой разброс значений в пределах одной чаши в зависимости от взаимного расположения зондов, что связано с неоднородностью материала чаши. При максимальном удалении зондов друг от друга значение сопротивления стремится к постоянной для всех образцов величине $R_{max} = (2,5 \pm 0,6) \cdot 10^8$ Ом.

С учетом измеренных физико-механических свойств чаш установлено, что вышеприведенным требованиям удовлетворяет неразрушающий метод контроля на основе спектрального анализа звука, излучаемого чашей на резонансных частотах. Поэтому одной из задач работы является обоснование целесообразности применения

интегрального акустического метода для оценки целостности и прочности абразивных чаш.

Метод свободных колебаний (МСК) определен в ГОСТ 23829-85 как «метод акустического неразрушающего контроля, основанный на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте или его части и анализе параметров этих колебаний». Интегральный метод свободных колебаний (ИМСК) уже достаточно давно используется при проверке стеклянной посуды, бандажей железнодорожных колес, ударных музыкальных инструментов и других объектов по «чистоте звона», вызываемого механическим ударом [1]. Появление в спектре колебаний дополнительных частот, например дребезжания — признак наличия дефектов. В последние десятилетия этот метод получил приборное оснащение для контроля абразивного инструмента, твердосплавных резцов, деталей подшипников и других технических объектов [2]. Колебания объекта контроля 2 возбуждают ударом молотка 1, регистрируют микрофоном 3, усиливают блоком 4 и подают на систему обработки информации 5, задача которой — измерение основной частоты f_0 свободных колебаний (рис. 2).

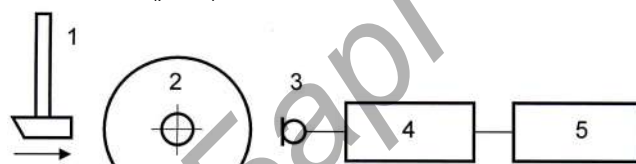


Рис. 2. Схема прибора для контроля абразивных кругов на основе ИМСК [1]

Основные преимущества ИМСК – высокая точность измерения и малая зависимость результатов измерения от расстояния и взаимной ориентации объекта контроля и измерительных преобразователей звука. Недостатками метода являются низкая помехоустойчивость, а также невозможность контроля материалов с большим коэффициентом затухания звуковых волн.

В качестве регистрируемого и оценочного показателя могут выступать период или частота свободных колебаний [1]. Признаком наличия дефектов может служить изменение (обычно снижение) частоты собственных колебаний. При этом, как правило, используют основные собственные частоты, не превышающие 15 кГц [2].

Прибор «Звук-203М» (ООО «ЗВУК», Россия) предназначен для измерения частот собственных колебаний и определения скорости звука с целью контроля физико-механических свойств абразивных, керамических изделий различной формы размерами от 50 мм, а в ряде случаев и для обнаружения дефектов. Среди определяемых параметров — частота собственных колебаний изделий, скорость звука, модуль упругости, звуковой индекс и степень твердости (для шлифовальных изделий). Определение параметров помощью приборов серии «Звук» производится на основе ГОСТ Р 52710-2007 [3], но только для изделий стандартизированной формы.

Приборы серии ИЧСК (НПП «Интерприбор», Россия) используются для измерения частот собственных колебаний в диапазоне от 22 Гц до 17,4 кГц, модуля упругости, плотности, пористости материалов. При этом определение трех последних параметров производится только для абразивных изделий стандартной (по ГОСТ Р 52710-2007) формы на основе пересчета измеренных значений частоты свободных колебаний в значения приведенной скорости распространения акустических волн и значения звукового индекса (ЗИ) [5].

Для контроля качества композиционных материалов предназначен низкочастотный акустический дефектоскоп АД-701М, в котором совмещены два метода контроля – импедансный и метод свободных колебаний. Спектральный анализ сигналов при этом играет лишь вспомогательную роль для повышения достоверности контроля и отстройки от мешающих факторов [4].

Различные варианты ультразвуковых дефектоскопов предназначены для контроля целостности и выявления дефектов только в сплошных, главным образом металлических и полимерных изделиях. Вторым недостатком вышеперечисленных приборов и методик состоит в том, что производится только измерение основной моды частоты свободных колебаний объекта контроля.

Применительно к абразивным чашам, которые являются предметом наших исследований, вышеперечисленные методики не могут быть применены из-за сложной формы и крупнозернистой структуры изделий. Кроме того, в данном случае нет необходимости в определении координат локального дефекта в объеме конкретной чаши; ставится лишь задача экспресс-оценки целостности и прочности при достаточно большом возможном отклонении по геометрическим размерам и массе. При этом параметры конкретного образца достаточно сравнить с пороговыми параметрами определенного «эталонного» образца с учетом допустимых отклонений [1, 6].

Интерес вызывает также резонансный метод вынужденных колебаний (РМВК), который применяют для измерения толщины и дефектоскопии тонкостенных труб и оболочек, основанный на возбуждении в стенке изделия ультразвуковых колебаний и определении резонансных частот. Однако измерения резонансным методом затруднены, если отклонение толщины изделия в зоне контакта с преобразователем превышает 8% среднего значения толщины, а также в случае изделий с неровными или непараллельными поверхностями [1].

Теоретические и экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик изделия. Частота свободных колебаний зависит от геометрии объекта контроля и свойств его материала. Для объектов простой формы типа стержней, пластин основная частота поддается теоретическому расчету. В более сложных по форме объектах контроля свободные колебания возникают на нескольких резонансных диапазонах частот, сравнительный анализ которых уже становится затруднительными. В рамках программы T-FLEX было осуществлено математическое моделирование собственных колебаний чаши. Анализ проводился по методу конечных разностей с тетраэдральной сеткой и количеством конечных элементов 10^6 .

В результате компьютерного моделирования при рассмотрении чаши как однородного тела установлено существование дискретного набора собственных частот колебаний, при этом максимальные амплитуды соответствуют шестой и одиннадцатой собственным частотам изгибных колебаний (рис. 3).

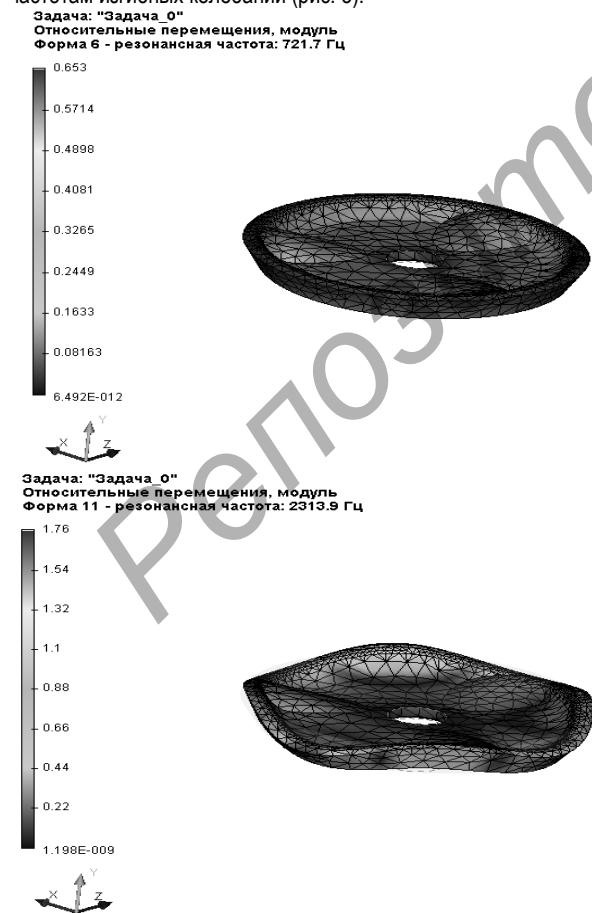


Рис. 3. Амплитуды изгиба чаш на шестой и одиннадцатой резонансных частотах в окне программы T-FLEX

Однако резонансные частоты, рассчитанные теоретически, существенно отличались от частот регистрируемых экспериментально. Различие составляет 20% для мод порядка $m \leq 4$. С ростом номера моды теоретические значения отличаются от полученных экспериментально на большую величину, так как в первом приближении неточно учтены особенности геометрии объекта контроля.

Вторая причина заключается в том, что в рамках компьютерной модели для чаш был принят однородный материал. В действительности тело можно считать однородным только при наличии жесткой связи между зёрнами абразива, только в этом случае энергия колебаний передавались бы от одного зёрна к другому. Однако реально происходит рассеяние волн на неоднородностях среды.

В любом случае, по наличию собственных частот можно делать вывод о целостности объекта контроля. Другими словами, если при экспериментальном исследовании в низкочастотном диапазоне будут обнаружены резонансные (собственные) частоты колебаний, характеризующиеся максимальными амплитудами, то это позволяет сделать вывод о целостности объекта контроля. По характеру максимумов на спектральной характеристике (значению частоты и амплитуды), а также по ширине пика можно судить о прочности связей между зёрнами абразива, которые обеспечены бакелитовой связкой.

Для регистрации и спектрального анализа звука, возникающего в результате удара по поверхности абразивной чаши, служили ноутбук с микрофоном и программа Audacity v1.3, предназначенная для записи фонограмм и обработки звука, соответствующего собственным колебаниям абразивных чаш. Возбуждение колебаний осуществлялось путем нанесения легких ударов небольшим молоточком в различных местах нижней либо боковой поверхности чаш в шести повторностях. Спектральный анализ звуковых треков осуществлялся с помощью встроенной в программу Audacity функции FFT-анализа (быстрое преобразование Фурье). Использовались различные методы оконного сглаживания (прямоугольное окно, окно Бартлетта, окно Хемминга), при разрешении по частоте от 256 до 2048 отсчетов на диапазон частот 20...22000 Гц, что соответствует шагу частоты между отсчетами $\Delta f = (86,1 \pm 5,4)$ Гц.

В результате были получены амплитудно-частотные характеристики звукового сигнала (действительные составляющие ряда Фурье, соответствующие отсчетам по частоте). Обработка и анализ экспортированных численных данных проводились с помощью пакета MS Excel 2010.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик чаш показал следующее.

1. Диапазон, в котором лежат резонансные частоты всех девяти чаш, находится в пределах от 1 кГц до 6 кГц (рис. 4).

2. Резонансные частоты собственных колебаний наблюдаются в пяти основных частотных интервалах (1,5...2,2 кГц, 2,5...3,0 кГц, 3,1...3,6 кГц, 4,1...4,5 кГц, 4,8...5,3 кГц), при этом пиковые значения сигнала у разных чаш соответствует разным интервалам частот и характеризуются значительным разбросом, который обусловлен как изменением силы удара молоточка, так и свойствам конкретного образца.

3. Шум, обусловленный цепью регистрации и преобразования сигнала в измерительной системе, на частотах 100 Гц и более не превышает -50 дБ и при диапазоне анализируемых частот 1...6 кГц в результаты измерений существенной погрешности не вносит.

4. Увеличение шага между отсчетами по частоте Δf с 5,4 до 86,1 Гц (т.е. ухудшение разрешения спектральной характеристики в 2^4 раз – с 4096 до 256 отсчетов на весь звуковой спектр) приводит к увеличению пиковых значений на АЧХ в среднем на 6 дБ. Оптимальным можно считать шаг $\Delta f = 40$ Гц, при этом необходимо 512 отсчетов на всю ширину звукового спектра 0...22 кГц. Минимальная продолжительность анализируемого аудиотрека при частоте дискретизации 44,1 кГц должна составлять не менее 0,023 с.

5. Сравнение сглаживающих оконных функций – прямоугольное окно без сглаживания, окна Бартлетта и Хемминга – показало, что минимальная разница (до 1 дБ) по пиковым значениям на АЧХ наблюдается при шаге частоты $\Delta f = (40...50)$ Гц. При больших и меньших значениях шага частоты изменение сглаживающей оконной функции обуславливает изменение пиковых значений амплитуд до 2 дБ.

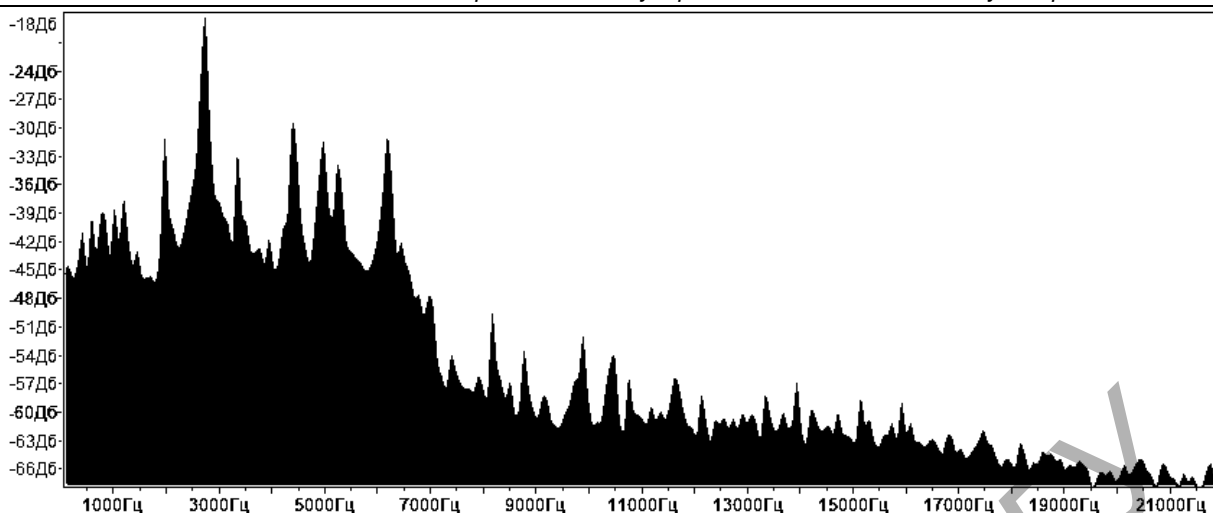


Рис. 4. Общий вид амплитудно-частотной характеристики звука, издаваемого абразивной чашей №6 в окне программы Audacity при шаге частоты 86,1 Гц и прямоугольном окне (без сглаживания)

Заключение

1. Интегральный акустический метод пригоден для анализа целостности и прочности изделий сложной формы, выполненных из композиционных материалов.
2. Результаты испытаний серии образцов следует сравнивать с показателями заведомо доброкачественного образца, оценочные параметры которого принимаются в качестве пороговых.
3. Несмотря на то, что метод является достаточно помохоустойчивым для определенных диапазонов частот, амплитудно-частотная характеристика звукового сигнала существенно зависит от силы и направления начального удара, что приводит к трудностям при реализации метода на практике.
4. Поскольку сигнал анализируется по всему временному промежутку, то в рамках анализа не выявляются параметры, характеризующие его затухание.
5. Таким образом, в случае контроля изделий сложной геометрической формы при использовании ИМСК или РМВК, возникает необходимость в введении интегрального показателя, усредняющего множественность резонансных частот. Этот параметр также должен быть инвариантным относительно разброса геометрических размеров объектов контроля и инвариантным относительно изменения силы начального удара.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк, 1991 — 283 с: ил.
2. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. – Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов [и др.]; под общ. ред. В.В. Клюева. – 464 с.
3. ГОСТ Р 52710-2007 Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн. Введен 13.04.2007 – М.: Стандартиформ, 2007 – 21 с.
4. НПП «Интерприбор». Приборы неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.interpribor.ru>. – Дата доступа: 16.08.2012.
5. ООО «Контроль. Измерение. Диагностика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.defectoscop.ru>. – Дата доступа: 16.08.2012.
6. Ционенко, Д.А. Определение характеристик качества абразивных чаш для контроля в процессе их изготовления / Д.А. Ционенко, И.В. Дубень / Материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24-25 ноября 2011 г., Барановичи, Респ. Беларусь / Редкол.: А.В. Никишова (гл. ред.) [и др.] – Барановичи: РИО БарГУ, 2011.

Материал поступил в редакцию 04.12.12

DUBEN I.V., GRIDYUSHKO M.I., TSIONENKO D.A. Integral method of free oscillations to control the integrity and strength of abrasive cups

The authors propose a method for determining the integrity and strength goods of complex shape, made of composite materials. The method is based on the analysis of the spectrum of natural oscillations of the object of control. The basic parameters that let to reliably establish the difference in characteristics of the object of control are determined.

УДК 539.3

Хвусевич В.М., Веремейчик А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ, МЕХАНИЧЕСКОМ И РАДИАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ

Введение. Основу любого ядерного реактора составляет тепло-выделяющий элемент (ТВЭЛ) цилиндрической формы. Он работает в условиях радиационного распухания, а также подвержен температурной нагрузке. От надежной работы ТВЭЛОВ зависит работоспособ-

Хвусевич Виталий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Веремейчик Андрей Иванович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.