

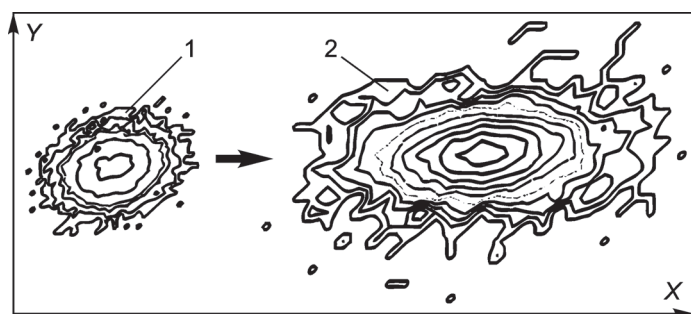


Рис. 2. Сравнение амплитуд вибраций острозаточенного (1) и изношенного (2) инструментов по осям XY с ростом износа фрезы, оснащённой керамическими пластинами:

X — ось шпинделя; Y — радиальное перемещение инструмента S_R

На рис. 2 приведён типовой круговой график (роза вибраций), построенный в плоскости XY по результатам анализа записей годографов виброускорения вершины керамической режущей пластины и данных, полученных с акселерометров. Эксперименты показали, что наибольшие изменения амплитуды вибраций происходят в направлении оси X . При переходе от острой режущей кромки керамической пластины к затупленной, амплитуда виброакустического сигнала возрастает в 2,6 раз по оси X . По оси Y рост сравнительно небольшой — порядка 35 %. Недопустимое увеличение износа вершины инструмента сопровождается снижением качества обработки поверхности детали. В этом случае характерные изменения виброакустического сигнала, поступающего от акселерометра, служат достоверным диагностическим признаком.

Вибрации из зоны резания в отличие от традиционно используемых для диагностики и мониторинга ТС силовых параметров позволяют проводить достоверный мониторинг хода резания. Однако изменение режимов резания отображается в параметрах вибрационного сигнала сложным образом, что затрудняет прогнозирование их значений без

предварительных экспериментов. Переменная жёсткость заготовки при обработке деталей с пространственно-сложными поверхностями оказывает дополнительное влияние на параметры вибрационного сигнала. Поэтому реализация и применение системы диагностики при обработке изделий в производственных условиях должны базироваться на теоретической и экспериментальной проработке и апробации новых технических решений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в сфере научной деятельности в рамках государственного задания № 11.1052.2014/К.

Литература

1. Grigoriev S., Volosova M., Vereshchaka A., Seleznev A. High-strength Ceramic Cutting Tools with Multipurpose Coatings for Highly Effective Processing of Tempered Steel // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 1064 (2015). P. 148—153.
2. Grigoriev S. N., Gurin V. D., Volosova M. A., Cherkasova N. Y. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool // *Material wissenschaft und Werkstofftechnik*. 2013. V. 44. N. 9. P. 790—796.
3. Volosova M. A., Gurin V. D. Influence of vacuum-plasma nitride coatings on contact processes and a mechanism of wear of working surfaces of high-speed steel cutting tool at interrupted cutting // *J. Friction Wear*. 2013. V. 34 (3). P. 183—189.
4. Kozochkin M. P. Vibration in cutting processes // *Russian Engineering Research*. 2009. V. 29. N. 4. P. 428—432.
5. Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Козочкин М. П., Кузовкин В. А. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011.
6. Инновации. Новый металлорежущий инструмент и оснастка. Каталог KENNAMETAL. 2015. [Электрон. версия] <http://lab2u.ru/kennametal-b73-katalog-kennametal-2015-novyi-instrument-str-b73-0087-lab2u.html> (дата обращения 12.02.2016).

Дата принятия: 13.05.2016.

681.2-52

Устройство автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов

Ю. Н. МОЖЕГОВА, И. Н. МАРИХОВ

Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярёва, Ковров, Россия, e-mail: kandy2701@mail.ru

Приведено обоснование способа и созданного на его основе устройства автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов. Описаны конструкция и принцип работы устройства контроля. Определена точность контроля параметров пористости материалов газодинамическим методом.

Ключевые слова: автоматизированный, неразрушающий контроль, пористость, газодинамический метод.

The article provides a rationale for the method and device used for conducting automated non-destructive material porosity tests. Design of the control device and principles of operation are described. The accuracy of the material porosity control for the gas-dynamic method is determined.

Key words: computerized, non-destructive test, porosity, gas-dynamic method.

В настоящее время в приборостроении предъявляют высокие требования к точности и качеству устройств контроля. Наиболее оптимальные характеристики имеют устройства

неразрушающего автоматизированного контроля, позволяющие дистанционно контролировать физико-механические свойства изделий.

Одним из основных параметров характеризующих физико-механические свойства пористых материалов (металлокерамики, керамики, бетона, древесины и др.) является пористость — совокупная мера размеров и количества пор в твёрдом теле.

При исследовании микроструктуры металлокерамических и керамических материалов основное внимание уделяют количеству, размеру и форме пор, так как раковины и макропоры нарушают однородность структуры материала и резко снижают механические свойства изделий.

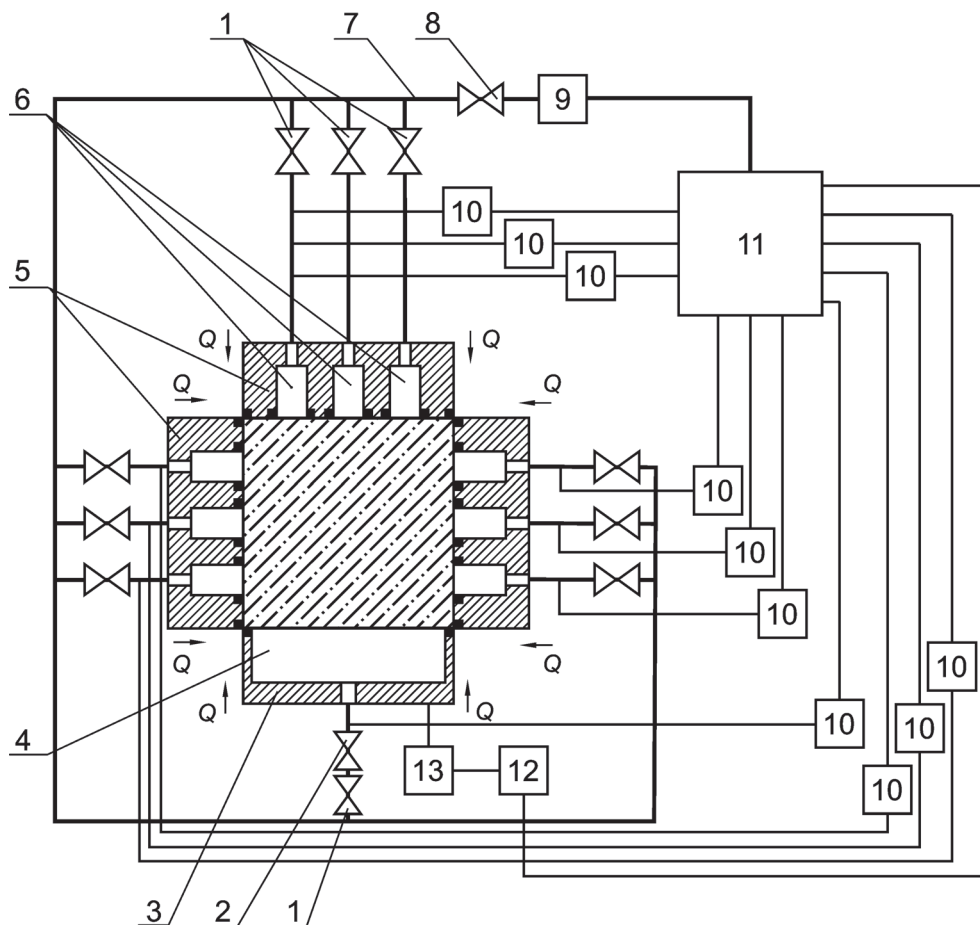
Физико-механические свойства данных материалов зависят от характера пор. Прочные механические свойства имеют материалы с мелкими замкнутыми порами округлой формы. Такие поры меньше влияют на прочность и вязкость изделий, чем сквозные, щелевидные поры, которые играют роль внутренних надразов. Для самосмазывающихся пористых подшипников, наоборот, желательны не замкнутые, а сообщающиеся поры. Для получения высоких магнитных характеристик необходимо, чтобы при определённой пористости материала количество пор было минимальным, следовательно, предпочтение отдают крупным, а не мелким порам.

На физико-механические свойства сложных керамических систем (КС) сильно влияют сквозные открытые поры (капилляры). Например, в случае замораживания, с увеличением (из-за давления растущих кристаллов льда) протяжённости и сокращения радиусов капилляров, возрастает сопротивление движению жидкости по ним в направлении резервных пор, гидростатическое давление в жидкости возрастает. Под действием напряжений, обусловленных гидростатическим давлением жидкости на стенки капилляров, возникают локальные нарушения сплошности материала, образуются микротрещины. Таким образом, автоматизированный контроль пористости материала изделий в процессе изготовления и эксплуатации имеет важное практическое значение.

Цель работы — разработка устройства неразрушающего контроля на основе теоретически обоснованного способа определения параметров пористости материала и оценка его точности.

К неразрушающим методам контроля качества изделий относят газодинамический метод, основанный на исследовании процесса течения газа через контролируемый пористый материал. Согласно способу определения параметров пористости из [1] на основе газодинамического метода, получены коэффициенты характеризующие структуру материала:

$$K_r = 2\mu V_n l t_c (p_n - p_c) / [F^2 v p_a^2 (t - t_c)];$$



Устройство для измерений параметров пористости:

1, 2, 8 — клапаны; 3, 5 — рабочая и измерительные камеры, соответственно; 4, 6 — герметичные полости; 7 — трубопровод; 9 — насос; 10 — датчики давления газа; 11 — система управления; 12 — ЭВМ; 13 — датчик температуры

$$K_\Phi = 2\mu V_n l (p_n - p_c) / [F^2 v p_a^2 (t - t_c)];$$

$$\Pi = 2V_n l t_c (p_n - p_c) / [F^2 p_a (t - t_c)];$$

$$K_o = 2\mu V_n l (p_n - p_c) / [F p_a^2 (t - t_c)];$$

$$K_d = V_n l (p_n - p_c) / [F p_a (t - t_c)],$$

где K_r — коэффициент растворимости газа; μ — коэффициент динамической вязкости; V_n — объём измерительной камеры; l — линейный размер в направлении фильтрации; $t_c = db/(2D)$ или $4db\Pi\mu/(11K_o p_a)$ — время, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа; p_n , p_c , p_a — давление газа соответственно текущее, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа и атмосферное; F — площадь материала; v — коэффициент кинематической вязкости; t — текущее время ($t > t_c$); d , b — толщина, ширина изделия, соответственно; Π — открытая пористость; K_o — коэффициент газопроницаемости; K_Φ — коэффициент фильтрации; K_d — коэффициент диффузии.

Таблица 1

Результаты измерений параметров, характеризующих поровую структуру материала

Коэффициент влияния	Открытая пористость, П	Коэффициент газопроницаемости, K_o	Коэффициент фильтрации, K_f	Коэффициент диффузии, K_d	Коэффициент растворимости, K_r
$\partial A/\partial V_{и}$	$9,442 \cdot 10^4$	$1,6140 \cdot 10^{-12}$	$1,146 \cdot 10^{-7}$	$4,492 \cdot 10^{-3}$	0,120
$\partial A/\partial p_{и}$	$5,060 \cdot 10^{-4}$	$8,6480 \cdot 10^{-20}$	$6,142 \cdot 10^{-15}$	$2,407 \cdot 10^{-10}$	$6,455 \cdot 10^{-9}$
$\partial A/\partial p_c$	$-5,060 \cdot 10^{-4}$	$-8,6480 \cdot 10^{-20}$	$-6,142 \cdot 10^{-15}$	$-2,407 \cdot 10^{-10}$	$-6,455 \cdot 10^{-9}$
$\partial A/\partial t_c$	$5,307 \cdot 10^{-4}$	$7,5350 \cdot 10^{-20}$	$5,351 \cdot 10^{-15}$	$2,098 \cdot 10^{-10}$	$6,770 \cdot 10^{-9}$
$\partial A/\partial p_a$	$-4,459 \cdot 10^{-7}$	$-1,5241 \cdot 10^{-22}$	$-1,082 \cdot 10^{-17}$	$-2,121 \cdot 10^{-13}$	$-1,138 \cdot 10^{-11}$
$\partial A/\partial F$	-188,842	$-1,6140 \cdot 10^{-14}$	$-1,146 \cdot 10^{-9}$	$-4,492 \cdot 10^{-5}$	$-2,409 \cdot 10^{-3}$
$\partial A/\partial l$	0,181	$3,0890 \cdot 10^{-17}$	$2,194 \cdot 10^{-12}$	$8,598 \cdot 10^{-8}$	$2,305 \cdot 10^{-6}$
$\partial A/\partial t$	$-4,409 \cdot 10^{-4}$	$-7,5350 \cdot 10^{-20}$	$-5,351 \cdot 10^{-15}$	$-2,098 \cdot 10^{-10}$	$-5,624 \cdot 10^{-9}$

Для определения параметров пористости материала с использованием указанных выше коэффициентов, разработано устройство неразрушающего контроля [2]. Схема устройства приведена на рисунке.

Устройство содержит измерительные и рабочую камеры 5, 3, соответственно, образующие с контролируемым изделием под усилием Q герметичные полости 4, 6. Камеры через систему трубопровода 7 соединены с вакуумным насосом 9. Для исключения перетечки газа между полостями 6, 4, каждую из них отключает от общей магистрали клапан 1. Полость 4 рабочей камеры 3 соединена клапаном 2 с атмосферой. Клапан 8 отключает от магистрали насос 9. Полости 4, 6 связаны с датчиками давления газа 10, информация с которых автоматически через систему управления 11 поступает на ЭВМ 12 со встроенным датчиком времени. Рабочая камера 3 снабжена датчиком температуры 13, подключенным к ЭВМ 12.

Последовательное смещение измерительных камер по длине образца обеспечивает детальный контроль участков изделия, что позволяет выявить явный и скрытый брак. Вид и размеры измерительных и рабочей камеры зависят от конфигурации или сечения деталей, для которых необходимо определить параметры пористости.

Для более детального исследования структуры и свойств детали целесообразно устанавливать рабочую и измерительные камеры на все грани контролируемого изделия, что позволяет анализировать течение газа как вдоль, так и поперёк контролируемого материала.

Тарировка устройства произведена на стандартных образцах из углеродистой качественной конструкционной стали Ст10 площадью 200×200 мм и толщиной 5 мм [3]. В ходе эксперимента по течению воздуха через изделие из сложной КС с водоцементным отношением В/Ц = 0,6 и расходом цемента Ц = 450 кг на 1 м^3 в формах 200×200 мм толщиной 25 мм получены следующие результаты: $p_{и} = 1810,31$ Па; $p_c = 1721,02$ Па; $p_a = 10132,2$ Па; $t = 605,34$ с; $t_c = 502,86$ с; $V_{и} = 4,785 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $F = 4,785 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\Delta F = 4,679 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, площадь контакта камеры и изделия и погрешность её измерения, соответственно.

Определим погрешность измерений открытой пористости, коэффициентов газопроницаемости, диффузии, фильтрации и растворимости газа в зависимости от структуры материала, параметров устройства и точности изготовления изделий. Для этого используем выражение

$$\delta A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial A}{\partial z} \Delta z\right)^2},$$

где δA — погрешности измерений параметров; $\frac{\partial A}{\partial x}, \dots, \frac{\partial A}{\partial z}$ — коэффициенты влияния; $\Delta x, \dots, \Delta z$ — погрешности измерений каждого из коэффициентов влияния.

Коэффициенты влияния и погрешность измерений рассчитаем с помощью программного обеспечения MathCAD15.

Так как коэффициенты влияния и погрешность измерений для открытой пористости материала $\partial P/\partial V_{и} = 9,442 \cdot 10^4$; $\partial P/\partial p_{и} = 5,06 \cdot 10^{-4}$; $\partial P/\partial p_c = -5,06 \cdot 10^{-4}$; $\partial P/\partial p_a = -4,459 \cdot 10^{-7}$; $\partial P/\partial F = -188,842$; $\partial P/\partial l = 0,181$; $\partial P/\partial t = -4,409 \cdot 10^{-4}$; $\partial P/\partial t_c = 5,307 \cdot 10^{-4}$; $\Delta P = 1,909 \cdot 10^{-3}$, то открытая пористость $P \pm \Delta P = 0,054 \pm 0,002$.

Аналогично определим коэффициенты влияния и погрешности измерений остальных параметров. Результаты измерений параметров характеризующих поровую структуру материала приведены в табл. 1.

Погрешности измерений $1,909 \cdot 10^{-3}$; $3,0890 \cdot 10^{-19}$; $2,320 \cdot 10^{-14}$; $9,075 \cdot 10^{-10}$; $2,44 \cdot 10^{-8}$ для коэффициентов П, K_o , K_f , K_d , K_r соответственно.

Вычислим коэффициенты влияния каждого из параметров на погрешность измерений открытой пористости материала и выразим их в относительных единицах:

$$\left|(\partial P/\partial V_{и}) \Delta V_{и}\right|/\Delta P=0,036; \left|(\partial P/\partial p_{и}) \Delta p_{и}\right|/\Delta P=0,7198;$$

$$\left|(\partial P/\partial p_c) \Delta p_c\right|/\Delta P=0,6843; \left|(\partial P/\partial p_a) \Delta p_a\right|/\Delta P=0,0355;$$

$$\left|(\partial P/\partial F) \Delta F\right|/\Delta P=0,0463; \left|(\partial P/\partial l) \Delta l\right|/\Delta P=0,0947;$$

$$\left|(\partial P/\partial t) \Delta t\right|/\Delta P=0,0023; \left|(\partial P/\partial t_c) \Delta t_c\right|/\Delta P=0,0028.$$

Коэффициенты влияния каждого из параметров на погрешность измерений открытой пористости и коэффициентов фильтрации, газопроницаемости, диффузии и растворимости в относительных единицах сведены в табл. 2.

Коэффициенты влияния параметров на погрешность измерения, отн. ед.

Параметр А (коэффициент)	Коэффициенты влияния							
	$\partial A / \partial V_{\text{и}}$	$\partial A / \partial p_{\text{и}}$	$\partial A / \partial p_{\text{с}}$	$\partial A / \partial t_{\text{с}}$	$\partial A / \partial p_{\text{а}}$	$\partial A / \partial F$	$\partial A / \partial l$	$\partial A / \partial t$
Открытая пористость	0,0360	0,1798	0,6843	0,0028	0,0355	0,0463	0,0947	0,0023
Коэффициент газопроницаемости	0,0360	0,1790	0,6835	0,0231	0,0709	0,0231	0,0946	0,0231
Коэффициент фильтрации	0,1788	0,7190	0,6835	0,0231	0,0709	0,0231	0,0946	0,0231
Коэффициент диффузии	0,0360	0,7204	0,6848	0,0231	0,0355	0,0232	0,0948	0,0231
Коэффициент растворимости	0,0359	0,7184	0,6830	0,0028	0,0709	0,0462	0,0945	0,0023

Из приведённых расчётов следует, что наибольшее влияние на погрешность измерений пористости материала оказывает погрешность измерений давления газа, определяемая погрешностью датчиков давления. Полученные результаты удовлетворяют требованиям производства.

Предлагаемое устройство рекомендуется к использованию на производстве для контроля пористости материала изделий, а также для контроля свойств материалов конструкций в процессе их эксплуатации.

Погрешность измерений открытой пористости, коэффициентов фильтрации, диффузии, растворимости газа и газопроницаемости материала находится в пределах 4—6% и зависит от инструментальных источников.

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2305820 РФ. Способ определения параметров пористости материалов / Ю. З. Житников, А. Н. Иванов, Ю. Н. Матросова, А. Е. Матросов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 25.

2. **Можегова Ю.Н.** Устройство автоматизированного неразрушающего контроля механических свойств изделий машиностроения // Сб. науч. трудов Междунар. научн.-техн. конф. «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении». Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 234—238.

3. **ГОСТ 1055—88.** Сталь углеродистая качественная конструкционная.

Дата принятия: 28.09.2015.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

551.508:681.586

Методика градуировки измерителей температуры цифровых аэрологических радиозондов

А. С. БОРОВКОВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия,
e-mail: alex101787@mail.ru

Представлена методика градуировки измерителей температуры цифровых аэрологических радиозондов. Установлено, что погрешность градуировки — главный источник погрешности измерителей температуры аэрологических радиозондов, выпускаемых в России. Показано, что погрешность градуировки цифрового измерителя температуры при использовании методики табличной градуировки значительно меньше, чем при градуировке аналитической функцией.

Ключевые слова: аэрологический радиозонд, цифровой измеритель температуры, градуировка.

The method of calibration applicable to digital temperature meters used in aerological radiosondes is considered. The calibration error is shown to be the main source of errors for temperature meters produced in Russia. The digital temperature meter error of calibration, carried out in accordance with table calibration procedure, is shown to be significantly smaller than the error of calibration, performed by means of analytical function.

Key words: aerological radiosonde, digital temperature meter, calibration.

Оценка погрешностей измерений вертикальных профилей температуры методом радиозондирования атмосферы важна для прогнозирования погоды. Большинство выпуска-

емых серийно и эксплуатируемых отечественных измерителей температуры (ИТ) аэрологических радиозондов (РЗ) реализованы на принципах и методах 1970—1985 гг. с исполь-