

В справочнике приведен материал, собранный Обществом по неразрушающим методам контроля (США) и охватывающий практически все известные методы. Кратко излагается теория методов испытаний, описываются методика и аппаратура, а также методы расшифровки результатов контроля. Справочник позволяет сопоставить возможности различных методов и выбрать из них один или несколько для решения задачи обеспечения высокой надежности изделий. Во второй книге справочника помещен материал по методу наэлектризованных частиц, электромагнитным, ультразвуковым методам, а также методом измерения напряжений и вибраций.

Книга рассчитана на конструкторов, металлургов, металловедов и дефектоскопистов всех отраслей народного хозяйства.

*Nondestructive Testing Handbook,*  
ed R. McMaster,  
New York, 1959.

**Неразрушающие испытания**

(справочник) под ред. Р. Мак-Мастера

Перевод с англ. под ред. Т. К. Зиловой, И. И. Кифера, К. И. Корнишина,

Г. Ю. Сила-Новицкого, М. Э. Хургина, книга вторая.

М.—Л., издательство „Энергия“, 1965 г. 492 стр. с черт.

Тематический план 1965 г., № 190.

Редактор Л. М. Турчинович

Техн. редактор Н. А. Бульдяев

Сдано в набор 30/VIII 1965 г.

Подписано к печати 2/XII 1965 г.

Бумага 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Печ. л. 43,05

Уч.-изд. л. 59,68

Тираж 6 000 экз.

Цена 4 р. 38 к.

Заказ 605

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.  
Шлюзовая наб., 10.

чивает такую информацию, как степень изъязвления (или коррозии) и наличие окалин на противоположной, обычно невидимой поверхности контролируемого материала.

4. Оценка коррозии ультразвуковыми методами должна осуществляться только компетентным и хорошо подготовленным персоналом, который имеет полное представление о различных факторах, относящихся к данной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hubbard J. C., The acoustic resonator interferometer, 1. The acoustic system and its equivalent electric network, *Phys. Rev.*, 2, 38, 1931, 1011.

2. Erwin W. S. (to General Motors Corp.), Supersonic measuring means, U. S. Patent № 2431233, Nov. 18, 1947.

3. Rassweiler G. M. and Erwin W. S. (to General Motors Corp.), Automatic sonic measuring means, U. S. Patent № 2431234, Nov. 18, 1947.

4. Erwin W. S. and Rassweiler G. M., The automatic sonigage, *Iron Age*, 160, № 4, 1947, 48.

5. Branson N. G., Portable ultrasonic thickness gage, *Electronics*, 21, № 1, 1948, 88.

6. Cook E. G. and Van Valkenburg H. E., Thickness measurement by ultrasonic resonance, *J. Acoust. Soc. Am.*, 27, 1955, 564.

7. Evans D. J., Corrosion evaluation of ship bulkhead and hull plating by audigage thickness measurements, *Corrosion*, 11, 1955, 109t.

8. Baumeister G. B., Production testing of bonded materials with ultrasonics, *ASTM Bull.*, 204, 1955, 50.

9. Bloch P. K., Testing of railroad rails by the ultrasonic resonance method, *Nondestructive Testing*, 10, № 3 (Winter, 1951—1952), 16.

10. Hastings, Carlton H. and Carter S. W., Inspection, processing and manufacturing control of metals by ultrasonic methods, *Am. Soc. Testing Materials, Spec. Tech. Publ.*, № 101, 1951.

#### РАЗДЕЛ 50

### МЕТОД СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

#### 50-1. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЗОНАНСА

*Принцип метода.* Резонансный метод ультразвукового контроля, рассмотренный в предыдущем разделе, использует пучок высокочастотных механических колебаний, излучаемый в контролируемый объект (см. раздел о резонансном методе ультразвукового контроля). Кроме того, существует метод, при котором контролируемое изделие колеблется, как одно целое, одним из видов колебаний на собственной частоте<sup>1</sup>. Ряд физических характеристик тела может быть определен по параметрам возбуждаемого колебания. В большинстве случаев на практике частоты собственных колебаний тел лежат в звуковом диапазоне и лишь только некоторые частоты близки к 20 000 гц. Поэтому контроль с помощью собственных колебаний часто называют звуковым методом контроля. Нет никакого теоретического обоснования, почему эти

принципы не могут быть распространены на высокочастотный диапазон.

*Резонанс.* Если тело подвергается действию внешней периодической возмущающей силы, то амплитуда его колебаний определяется величиной этой силы, упругими свойствами тела, а также соотношением частот внешней силы и частоты собственных колебаний тела. По мере того как частота возмущающей силы приближается к собственной частоте колебаний тела, амплитуда колебаний тела увеличивается, и когда эти частоты становятся одинаковыми, колебания достигают неограниченно большой амплитуды, если не учитывать потерь в системе. Это явление известно как резонанс.

*Параметры, влияющие на частоту собственных колебаний.* Частота собственных колебаний тела зависит от ряда параметров, которые можно обобщить в выражение

$$\text{Частота} = \text{фактор формы} \times \text{коэффициент физических постоянных.} \quad (50-1)$$

Фактор формы определяется формой тела и размерами: длиной, шириной и толщиной. Коэффициент физических постоянных зависит от модулей упругости, плотности и коэффициента Пуассона контролируемого материала. Очевидно, что два совершенно одинаковых те-

<sup>1</sup> Объяснение неправильное. Тело — не материальная точка. Тело не может колебаться, как одно целое, колеблются отдельные части тела относительно друг друга. Основное отличие данного метода от ультразвукового резонансного — использование наиболее низких частот собственных колебаний тела и их первых гармоник и одновременное участие в колебательном процессе всего тела. (Прим. ред.).

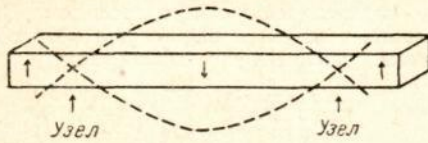


Рис. 50-1. Основной вид изгибных колебаний стержня прямоугольного сечения.

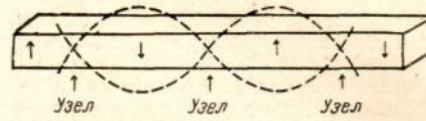


Рис. 50-4. Изгибные колебания стержня прямоугольного сечения с тремя узлами.

ла будут иметь одинаковые собственные частоты. Уравнение (50-1) показывает, что если коэффициент формы у ряда тел совершенно одинаков, то собственная частота колебаний каждого из тел определяется коэффициентом физических постоянных. С другой стороны, если может быть определено влияние фактора формы на частоту, то можно компенсировать это влияние для различных форм или размеров деталей. Влияние фактора формы изучается многими исследователями, хотя пока только для относительно простых геометрических форм тел.

**Виды колебаний.** Каждое тело имеет много частот собственных колебаний.

**Изгибные колебания.** В свободном, незакрепленном стержне могут возбуждаться изгибные колебания. Этот вид колебаний показан на рис. 50-1. При таких колебаниях образуются два узла по существу с нулевой амплитудой колебаний; они размещаются на концах стержня на расстоянии примерно 0,22 его длины.

Пучности, т. е. места, где амплитуда колебаний максимальна, находятся в центре и на концах стержня.

**Продольные колебания.** В стержне могут возбуждаться также продольные колебания. Этот вид колебаний схематически показан на рис. 50-2. Единственный узел находится в геометрическом центре стержня.

**Крутильные колебания.** В стержне могут возбуждаться крутильные колебания с узлом в центре стержня (рис. 50-3).

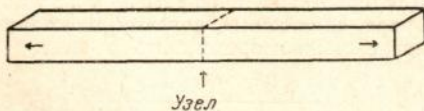


Рис. 50-2. Основной вид продольных колебаний стержня прямоугольного сечения.

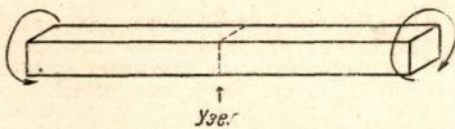


Рис. 50-3. Основной вид крутильных колебаний стержня прямоугольного сечения.

**Гармоники.** Выше были рассмотрены только основные изгибные, продольные и крутильные виды колебаний. Кроме того, каждый из этих простых видов колебаний имеет гармоники по отношению к основной частоте. Например, первая гармоника изгибных колебаний для незакрепленного стержня показана на рис. 50-4 и может быть описана как изгибные колебания с тремя узлами. Частота этих колебаний приблизительно в 2,7 раза больше основной частоты колебаний, показанных на рис. 50-1. Все три описанных вида колебаний имеют большое число гармоник. Тело может поддерживаться или зажиматься в узлах колебаний, причем частота собственных колебаний и затухание при этом не изменятся.

**Изгибные колебания пластин.** Тонкая незакрепленная круглая пластинка может колебаться изгибно с двумя узловыми линиями, пересекающимися под прямым углом. Это показано на рис. 50-5.

**Радиальные колебания.** Та же самая пластинка может колебаться в радиальном направлении, как показано на рис. 50-6.

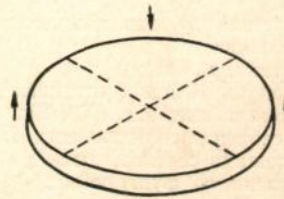


Рис. 50-5. Основной вид изгибных колебаний тонкого круглого диска с двумя узловыми линиями.

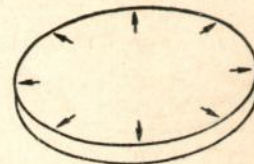


Рис. 50-6. Основной вид радиальных колебаний тонкого круглого диска.

с единственным узлом в центре. При этом фаза колебаний точек, лежащих на окружности с центром в центре пластины, одинакова.

**Изгибные колебания с круговой узловой линией.** Кроме того, круглые пластинки могут колебаться изгибно так, как показано на рис. 50-7, с круговой узловой линией. Для каждого из этих видов колебаний существуют высшие гармоники, а также комбинации этих видов колебаний [Л. 1].

**Сложные колебания.** Можно предположить, что наличие многих видов колебаний будет усложнять контроль с помощью резонансных колебаний. В общем это не так, потому что существует относительно большое различие в собственных частотах каждого вида колебания, так же как и в трудности возбуждения высших гармоник. Обычно основная частота собственных колебаний является самой удобной для целей контроля.

**Частотные уравнения.** Для простых геометрических форм указанные соображения могут быть применены для вывода частотных уравнений контролируемых тел. Необходимо рассмотреть три отдельных случая, чтобы показать используемый метод: стержень прямоугольного сечения, круглая пластинка и круглая пластинка с центральным отверстием.

**Стержень прямоугольного сечения.** Для этого случая общее выражение для частоты колебаний будет:

$$f = \frac{k^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EIg}{A\rho}} [z\alpha], \quad (50-2)$$

где  $k$  — постоянная, зависящая от вида колебания;

- $l$  — длина, дюймы;
- $E$  — модуль Юнга, фунт/дюйм<sup>2</sup>;
- $I$  — момент инерции ( $bh^3/12$ );
- $g$  — ускорение силы тяжести, дюйм/сек<sup>2</sup>;
- $A$  — площадь сечения, дюйм<sup>2</sup>;
- $\rho$  — плотность, фунт/дюйм<sup>3</sup>;
- $b$  — ширина (в направлении, перпендикулярном направлению изгиба), дюймы;
- $h$  — толщина (в направлении изгиба), дюймы.

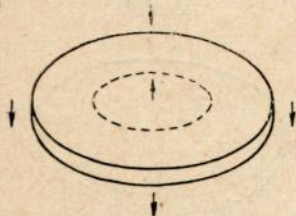


Рис. 50-7. Основной вид изгибных колебаний тонкого круглого диска с круговой узловой линией.

**Стержень квадратного сечения.** Для стержня, толщина и ширина которого одинаковы, уравнение принимает вид:

$$f = \frac{k^2 h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{Eg}{12\rho}} [z\alpha], \quad (50-3)$$

или, учитывая значения постоянных и подставив вместо  $k$  его величину 4,73, для основного изгибного колебания незакрепленного стержня получим:

$$f = \frac{20,3h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} [z\alpha]. \quad (50-4)$$

Для сравнения модулей упругости ряда одинаковых по размерам стержней квадратного сечения (50-4) можно переписать в виде:

$$E = \frac{0,00242f^2 l^4 \rho}{h^2}. \quad (50-5)$$

**Круглая пластинка.** Для круглой пластинки [Л. 3] общий вид выражения для частоты имеет вид:

$$f = \frac{k}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{gD}{\rho h}} [z\alpha], \quad (50-6)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести, дюйм/сек<sup>2</sup>;  
 $D = Eh^3/12(1-\sigma^2)$  — модуль жесткости к изгибу, фунт/дюйм;  
 $E$  — модуль упругости, фунт/дюйм<sup>2</sup>;  
 $r$  — радиус, дюймы;  
 $h$  — толщина, дюймы;  
 $k$  — постоянная, зависящая от вида колебаний;  
 $\rho$  — плотность, фунт/дюйм<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  — коэффициент Пуансона.

Решение частотного уравнения с подстановкой вместо  $k$  величины, равной 5,25, для колебаний с двумя диаметрными узловыми линиями дает:

$$f = \frac{4,74h}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} [z\alpha]. \quad (50-7)$$

Для сравнения модулей упругости ряда одинаковых круглых пластинок уравнение можно представить в виде:

$$E = \frac{0,0445f^2 r^4 \rho (1-\sigma^2)}{h^2}. \quad (50-8)$$

**Круглая пластинка с центральным отверстием.** Специальным случаем является круглая пластинка с центральным отверстием в центре.

Поправочный коэффициент для вида колебаний с двумя диаметрными узловыми линиями, который учитывает радиус отверстия и радиус пластинки, равен:

$$\left[ 1 - \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right], \quad (50-9)$$

где  $R$  — радиус отверстия, дюймы;  
 $r$  — радиус пластинки, дюймы.

Если этот коэффициент подставить в уравнение для частоты указанного вида колебаний пластинки, то выражение принимает вид:

$$f = \frac{4,74h(r^2 - R^2)}{r^4} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}} \quad [24]. \quad (50-10)$$

Поправка была найдена эмпирически и верна с точностью до 1% для тонких пластинок при отношениях радиуса пластинки к радиусу отверстия больше, чем 3:1 или 4:1.

Если радиус отверстия близок к радиусу пластинки, то тело начинает принимать форму кольца. Его частотные характеристики лучше всего определять с помощью эталонов для изгибных, радиальных и крутильных колебаний круглых колец. Кроме того, эта поправка не была проверена при отношениях диаметра к толщине, меньших, чем 6:1 или 7:1.

**Сложные формы.** Бывают случаи, когда форма изделий, сравниваемых с помощью метода собственных колебаний, очень сложна. Если частотные уравнения не могут быть выведены, то необходимо постепенно изменять размеры типовых изделий и измерять полученное в результате этого изменение частоты. Такой метод может быть использован для оценки влияния фактора формы и внесения поправки при наличии малой разницы в размерах.

Второй путь — изготовление образца простой геометрической формы из того же материала по той же технологии, по которой изготавливаются изделия сложной формы. Измерения на образце обеспечивают оценку физических характеристик изделий в случаях, которые рассматриваются.

**Измеряемые характеристики.** Частотные уравнения включают в себя влияние размеров и физических свойств. Если имеется уравнение, то можно оценить какой-то неизвестный фактор (в том случае, если другие факторы известны) путем быстрого измерения частоты собственных колебаний. Теоретически и часто практически метод собственных колебаний применяется для измерения или определения:

- 1) длины;
- 2) ширины;
- 3) толщины;
- 4) диаметра;
- 5) модуля упругости;
- 6) плотности;
- 7) коэффициента Пуассона;
- 8) модуля разрыва;
- 9) трещин;
- 10) затухания;
- 11) модуля сдвига;
- 12) температурной зависимости характеристики по пп. 5, 7, 8, 10 и 11;
- 13) металлургических факторов.

Путем сравнения частот собственных колебаний с частотами видов колебаний, которые создают сдвиг, изгиб и сжатие,

используя их математические зависимости [Л. 5], можно определять модули изгиба, сдвига и объемного сжатия, а также коэффициент Пуассона [Л. 5]. Ниже будет показано, как с помощью метода собственных колебаний могут быть обнаружены трещины и другие неоднородности в изделии.

**Использование гармоник.** Практически интересен тот факт, что пока вид и номер гармоники колебаний постоянен, любая гармоника может использоваться для относительной оценки физических постоянных. В уравнениях (50-2) и (50-6) постоянная  $k$  определяется только видом колебания. Размеры тела могут быть такими большими, что самая низкая частота собственных колебаний лежит вне диапазона частот имеющегося частотомера. В таких случаях можно использовать гармоники высшего порядка.

## 50-2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ

**Аппаратура.** Выбор контрольной аппаратуры зависит от установки контролируемого тела, средств возбуждения колебаний и способа определения резонансных колебаний.

**Установка детали.** При контроле деталь должна быть установлена на опорах, которые должны располагаться в узлах колебаний. Например, для случая, приведенного на рис. 50-1, где показан основной вид изгибных колебаний стержня длиной  $l$ , две опоры могут размещаться под стержнем от каждого конца на расстоянии 0,22 длины стержня. Для случая на рис. 50-5, где показан основной вид изгибных колебаний круглой пластинки, четыре опоры могут быть размещены под пластинкой вдоль диаметральных линий. Упор или зажим может быть также установлен в центре пластинки.

При выборе других видов опор или зажимов важно, чтобы опора была только в узлах колебаний для предотвращения затухания колебаний во время контроля.

**Возбуждение.** Имеются два способа возбуждения собственных периодических колебаний: 1) ударное возбуждение; 2) непрерывное возбуждение. При ударном возбуждении может применяться ручной или механизированный ударник. Для непрерывного возбуждения используется электромеханический возбудитель колебаний в сочетании с генератором переменной частоты, охватывающим интересующий нас диапазон частот.

**Преимущества непрерывного возбуждения.** Непрерывное возбуждение имеет ряд преимуществ при контроле методом собственных колебаний. Оно дает возможность:

- 1) определять частоту собственных ко-

лебаний в телах, имеющих большое затухание;

2) проверять виды колебаний методом песчаных фигур, звуконосителем или вибродатчиком;

3) возбуждать контролируемую деталь только на основной частоте, с тем чтобы колебания других типов не усложняли оценки результатов контроля;

4) менее критично к затуханию, вносимому опорами.

**Детекторы колебаний.** Среди различных приборов, пригодных для определения частоты собственных колебаний, наиболее широкое применение нашли микрофоны и вибродатчики. Микрофон, возбуждаемый вместе с колеблющимся телом через воздух, не требует установки на изделии и не является нагрузкой для него. С другой стороны, он чувствителен к окружающему шуму. Вибродатчик, который использует механическую связь с колеблющимся телом, менее чувствителен к окружающему шуму, но подвергается влиянию вибрации, проникающих в тело через опоры. Наиболее пригодный детектор колебаний лучше всего выбрать, изучив ограничения, присущие каждому отдельному способу контроля.

**Методика контроля.** В литературе даются различные способы измерения частоты собственных колебаний твердых тел и различные области применения этих методов [Л. 6—22]. В качестве примера можно привести звуковой компаратор (Saturn Electronic Company, Niagara Falls, N. Y.), в котором собраны элементы, необходимые для проведения таких измерений [Л. 6]. В этой аппаратуре контролируемое тело устанавливается на опорах в узлах предпочитаемого вида колебаний. Штифт электромагнитного возбуждателя колебаний помещается около пучностей колебаний на контролируемом объекте.

**Электрическая схема.** Возбудитель питается от усилителя мощности, возбуждаемого генератором переменной частоты; генератор соединяется с горизонтально отклоняющими пластинами электронно-лучевого осциллографа. Микрофон, устанавливаемый около пучности ко-

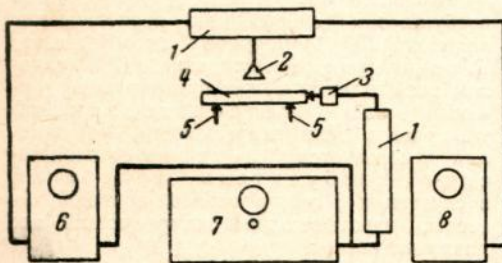


Рис. 50-8. Блок-схема звукового компаратора.

1 — усилитель; 2 — микрофон; 3 — возбудитель; 4 — тело; 5 — опоры; 6 — электронно-лучевой осциллограф; 7 — генератор переменной частоты; 8 — электронный вольтметр.

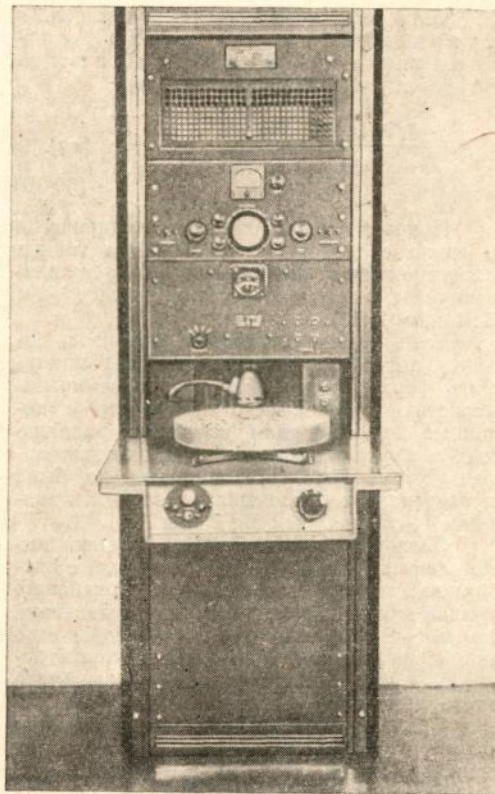


Рис. 50-9. Звуковой компаратор.

лебаний тела, соединяется через усилитель с вертикально отклоняющими пластинами осциллографа. Разъем и выключатель облегчают подключение вибродатчика. Усилитель подключен также к электронному вольтметру для измерения соответствующих амплитуд колебаний. Блок-схема установки показана на рис. 50-8.

**Определение частоты собственных колебаний.** Если частота предпочитаемого вида колебаний неизвестна, но находится в пределах рабочего диапазона генератора, необходимо пройти весь диапазон частот. В этом случае на экране осциллографа периодически образуются фигуры Лиссажу различной формы. Этот эффект наблюдается потому, что электромеханический вибратор, кроме основной частоты, определяет задающим генератором, содержит гармоники с амплитудой, достаточной для того, чтобы возбуждать тело на частоте собственных колебаний. Этот эффект часто полезен. Например, если наблюдается фигура Лиссажу с тремя «лепестками», то для получения резонанса в контролируемом теле на основной частоте собственных колебаний частоту генератора следует утронить<sup>1</sup>. Благодаря резо-

<sup>1</sup> Этот метод относится только к простейшим типам колебаний. (Прим. ред.)

нансу и увеличению амплитуды колебаний, материалы с низким коэффициентом затухания требуют небольшой энергии возбуждения.

**Обработка результатов.** Увеличение амплитуды колебаний при резонансе фиксируют детектором колебаний и подают на усилитель, заставляя горизонтальную линию развертки принимать форму наклонной линии, эллипса или круга в зависимости от фазовых соотношений. Этот же сигнал подается на электронный вольтметр, который измеряет относительную амплитуду колебаний. При промышленном контроле частота собственных колебаний ряда однотипных деталей изменяется только в узком диапазоне частот и необходимо изменить частоту возбуждителя только в этих пределах. Это сокращает до минимума время, требуемое для определения частоты колебаний стержня. В зависимости от размеров деталей с помощью звукового компаратора, показанного на рис. 50-9, может контролироваться до 250—300 изделий в час.

### 50-3. ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Контроль абразивных кругов.** На примере применения метода собственных колебаний для контроля абразивных изделий можно иллюстрировать пути возможного использования такого контроля. Важной характеристикой абразивных изделий является их твердость; она определяет прочность на разрыв, т. е. связь отдельных абразивных частиц и, следовательно, работу шлифовального круга. Обычно для оценки твердости используют инструмент клиновидной формы, вдавливаемый рукой опытного оператора в шлифовальный круг. Оператор сортирует круги в широких пределах «на ощупь». Второй метод, известный как ударный, заключается в многократном сбрасывании закаленного инструмента на поверхность круга и измерении глубины лунки после определенного количества ударов. Кроме того, может использоваться метод вдавливания острого вибрирующего инструмента в абразивный круг с известным усилием и глубина проникновения инструмента может быть определена после установленного количества его колебаний. Такие методы контроля не предназначены для сравнения различных видов абразивных изделий, имеющих разную величину зерен и связку или разное качество абразивного зерна. По общему мнению, они могут применяться для определения различий между идентичными абразивными изделиями. Механизированные виды контроля в общем дают хорошее соответствие с фактическими данными о качестве шлифовки.

**Соответствие между данными контроля по ударному методу и методу собственных колебаний.** При использовании в аб-

разивных кругах керамических связующих веществ, что делается для повышения их твердости (это определяется методом ударного углубления), частота собственных колебаний такого круга увеличивается. Зависимость частоты собственных изгибных колебаний с двумя узловыми диаметральными линиями от глубины углубления, определенного при ударном методе, по существу линейна. Такая зависимость показана на рис. 50-10. Диаграммы этого типа показывают, что существует соответствие между результатами этих двух методов, по крайней мере для номеров абразивных зерен, начиная с 36 и меньше (данные по номерам абразивного зерна см. в книге «Краткие практические рекомендации», Бюллетень № 118-50 Национального бюро стандартов Департамента торговли США). Для больших номеров зерна порядка 20 и крупнее получается худшее соответствие, по-видимому, потому, что точность ударного метода уменьшается, если величина абразивного зерна приближается к размерам острого конца инструмента. При таких экспериментах наблюдается, что чем большее количество лунок, полученных ударным методом, берется при измерениях для усреднения, тем лучше точки укладываются на прямой линии графика. Этого можно было ожидать, потому что контроль методом собственных колебаний определяет среднюю твердость круга, в то время как контроль методом ударного углубления определяет твердость в точке непосредственно под наконечником инструмента. Таким образом, для каждого вида и размера абразивного круга могут устанавливаться допуски на частоту собственных колебаний. Круги с частотой собственных колебаний, находящейся в этих допусках, признаются годными, остальные бракуются.

Успех контроля методом собственных колебаний абразивных кругов обусловлен тем фактом, что их качество находится в соответствии с коэффициентом физических постоянных по уравнению (50-1) и,

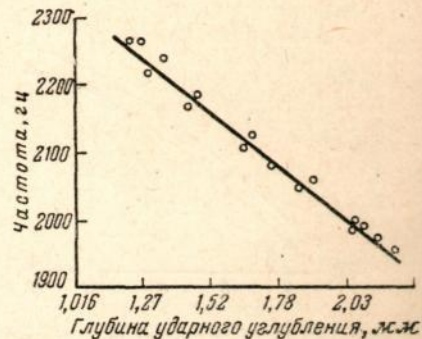


Рис. 50-10. Соответствие между данными контроля по ударному методу и методу собственных колебаний для абразивных кругов с керамической связкой.

следовательно, с частотой собственных колебаний. Это соответствие, вероятно, существует для многих других изделий.

**Поправка на размер круга.** Так как частота собственных колебаний изменяется в зависимости от размеров, так же как и от физических свойств тела, то необходимо рассмотреть влияние размеров на результаты контроля [Л. 8]. На практике круги, изготовленные определенным способом, приблизительно одинаковы по размерам, что дает возможность применять данный контроль с целью сортировки еще до их окончательной обработки и отбраковки кругов с твердостью, не соответствующей необходимым требованиям. По другим производственным технологиям могут изготавливаться круги с меньшим образом в размерах. В этих случаях контроль кругов методом собственных колебаний следует производить после их окончательной обработки.

Методы сортировки кругов по их истираемости или углублению инструмента могут применяться в основном только после их обработки из-за отрицательного влияния на данные этих методов поверхностной корки и неровности поверхности.

**Изменения радиальных размеров.** При контроле методом собственных колебаний большинства абразивных кругов сочетаются два фактора, которые сводят к минимуму влияние радиальных размеров на частоту собственных колебаний. Поскольку круги отливаются в формы с постоянными размерами, изменения размеров кругов невелики. Как видно из уравнения (50-7), изменения порядка долей миллиметра при радиусе круга, равном 75—100 мм или больше, не вызывают большого изменения собственной частоты.

**Изменения толщины.** Изменения толщины порядка долей миллиметра при толщинах меньше 5—6 мм более значительны. При контроле необработанных тонких кругов, изменения толщины которых велики, в то время как допуски на твердость малы, их толщина может быть из-

мерена, если ввести поправку на частоту согласно формуле

$$F = \frac{f h_n}{h_m}, \quad (50-11)$$

где  $F$  — скорректированная частота;  
 $h_n$  — номинальная толщина;  
 $f$  — измеренная частота;  
 $h_m$  — измеренная толщина.

Например, при производстве кругов с номинальной толщиной 12 мм. могут встречаться отклонения от нее.

Скорректированная частота является частотой собственных колебаний, которая должна была бы наблюдаться, если бы круг имел фактическую толщину 12 мм. Для того чтобы выяснить, стоит ли вводить поправку, необходимо руководствоваться допусками на твердость, точностью обрабатывающего оборудования и единообразием размеров, получаемым при данном производственном процессе.

**Влияния связки.** Описание влияния бесчисленных комбинаций абразивных зерен и связки выходит за пределы настоящего раздела. Однако для иллюстрации на рис. 50-11 показаны изменения частоты для двух различных связок при трех различных содержаниях их в кругах. Данные взяты для ряда кругов из окиси алюминия N 80 размером  $200 \times 12 \times 36$  мм с керамической связкой. Они иллюстрируют случай, при котором частота повышается с увеличением процента содержания связки. Подобные же кривые характеризуют абразивные круги из карбида кремния с различными соотношениями абразива и связки.

**Модуль разрыва.** Контроль методом собственных колебаний получает все большее распространение для сравнения модулей разрыва абразивных изделий с резиновой связкой. Исследователи установили, что существует связь между частотой собственных колебаний и модулем упругости [Л. 9 и 10]. На практике предполагают, что максимальная скорость разрыва<sup>1</sup> идентичных абразивных кругов с резиновой связкой изменяется вместе с изменением частоты собственных колебаний. Типичное соотношение между скоростями разрыва и резонансными частотами для ряда абразивных кругов размером  $150 \times 50 \times 175$  мм дается в таблице.

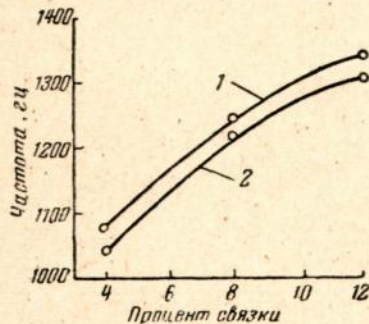


Рис. 50-11. Соответствие между резонансной частотой и процентом материала связки в шлифовальных кругах из окиси алюминия с керамической связкой.

1 — связка типа В; 2 — связка типа А.

Резонансная частота, Гц	Скорость вращения круга при разрыве, об/мин
670	3 500
680	3 550
692	3 600
700	3 650

<sup>1</sup> Имеется в виду разгонная скорость вращения при испытании. (Прим. ред.)



**Обнаружение трещин.** Контроль методом собственных колебаний может использоваться для обнаружения трещин в телах различных форм. Ниже для иллюстрации рассмотрены примеры, имеющие отношение к абразивным изделиям.

**Трещины в абразивных брусках для хонингования.** Абразивный брусок для хонингования, который может иметь форму прямоугольного стержня с размерами  $135 \times 13,5 \times 200$  мм, весьма удобен для возбуждения в нем изгибного вида колебаний, как это было показано на рис. 50-1. Трещина в нем была имитирована пропилом на боковой поверхности в центре стержня. Она может быть ориентирована в двух направлениях по отношению к направлению колебаний. На рис. 50-12 показан вид с торца этого стержня в двух положениях.

**Метод обнаружения трещин** состоит в измерении резонансных частот основного вида колебаний после установления стержня в направлениях *A* и *B*. В табл. 50-1 даны результаты измерений для различных глубин трещины.

Различие в частотах собственных колебаний при ориентации трещины в положениях *A* и *B* увеличивается с глубиной трещины. Если трещина находится ближе к одному концу стержня, то различие в частотах должно уменьшаться. При работе с изгибными колебаниями в стержнях без трещин с примерно квадратным поперечным сечением обнаруживаются иногда две резонансные частоты, лежащие близко одна от другой. Это явление происходит потому, что сечение стержня не точно квадратное. В большинстве случаев при возбуждении колебаний в одном направлении получают также компоненты движения в других направлениях. В этом случае одна резонансная частота возникает из-за колебания в направлении толщины, а другая — из-за колебания в направлении ширины.

Другой метод обнаружения трещин состоит в измерении отношения частот гармоник к частоте основных колебаний. Например, для хонинговального бруска частота  $f_2$  первой гармоники сравнивается с частотой  $f_1$  основного изгибного вида

Таблица 50-1

**Влияние глубины трещины, имитированной пропилом, на резонансные частоты абразивного бруска для хонингования**

Глубина трещины, мм	Частота, гц		Разность частот
	Направление		
	A	B	
0	1 552	1 552	0
1,6	1 533	1 541	8
3,2	1 469	1 533	64
4,8	1 400	1 513	113
5,4	1 327	1 507	180

<sup>1</sup> Направления *A* и *B* указаны на рис. 50-12.

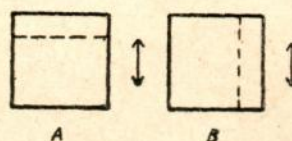


Рис. 50-12. Расположения трещин, имитированных пропилом (пунктирная линия), с указанием направлений колебаний (стрелка) при контроле абразивных брусков для хонингования.

колебаний. Данные табл. 50-2 получены при использовании колебаний в направлении *A* (рис. 50-12). В этом случае отношение частот увеличивается с увеличением глубины трещины.

Таблица 50-2

**Влияние глубины трещины (имитированной пропилом) на отношение частоты гармоники к основной частоте абразивного бруска для хонингования (ориентация *A* на рис. 50-12)**

Глубина трещины, мм	Частота, гц		Отношение частот, $f_2/f_1$
	$f_1$	$f_2$	
0	1 552	4 260	2,74
1,6	1 533	4 259	2,78
3,2	1 469	4 258	2,90
4,8	1 400	4 257	3,04
6,4	1 327	4 256	3,21

**Радиальные трещины в шлифовальных кругах.** В некоторых абразивных кругах часто встречаются радиальные трещины, распространяющиеся от осевого отверстия к внешнему диаметру. Их влияние на собственную частоту может быть показано на абразивном круге с керамической связкой диаметром 200 и толщиной 6 мм с центральным отверстием диаметром 36 мм. Для этого диска используется основной изгибный вид колебаний. Пропил на разные глубины имитирует трещину, идущую от осевого отверстия к внешнему диаметру. Если круг находится в контакте с возбуждателем колебаний, то две узловые диаметральные линии устанавливаются под углом  $45^\circ$  по обе стороны от возбуждателя. Таким образом, угловое положение узловой линии внутри круга определяется положением круга по отношению к возбуждателю. Из многих возможных направлений трещины по отношению к узловой линии нас будет интересовать ее направление либо по узловой линии, либо по линии пучностей, как это показано в положениях *A* и *B* на рис. 50-13. Таблица 50-3 составлена по результатам измерений частот при двух направлениях трещин различной длины. Практически контроль радиальных трещин состоит в ориентировании круга в нескольких положениях по отношению

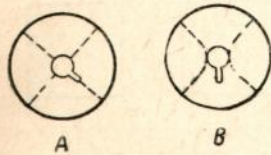


Рис. 50-13. Возможные расположения радиальной трещины по отношению к узловым линиям колебаний (пунктирные линии) в шлифовальном круге.

к возбудителю, сдвинутых примерно на 10 или 20° друг от друга, и определении частотного спектра для данного типа колебаний.

Таблица 50-3

**Влияние глубины радиальной трещины (имитированной пропилом) на резонансные частоты шлифовальных кругов**

Глубина трещины, мм	Частота, гц		Разность частот
	Трещина на угловой линии	Трещина на линии пучностей	
0	1 243	1 243	0
6,4	1 242	1 239	3
12,8	1 238	1 233	5
19,2	1 236	1 226	10
26	1 232	1 215	17

Этот пример показывает возможность расширения области применения метода свободных колебаний для контроля наличия в изделиях трещин.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Walier M. D., Vibration of free circular plates, pt 1, Normal modes, Proc. Phys. Soc., London, **50**, № 1, 1938, 70.
2. Timoshenko S., Vibration problems in engineering, New York, D. Van Nostrand Co., Inc., 1928, 199.
3. Timoshenko S., Vibration problems in engineering, New York, D. Van Nostrand Co., Inc., 1928, 312.
4. Timoshenko S., Vibration problems in engineering, New York, D. Van Nostrand Co., Inc., 1928, 292.
5. Marks L. S. (ed.), Mechanical engineering handbook, 4th ed., New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1941, 444.

6. Rowe R. F. (to the Carborundum Co.), Vibration apparatus for testing articles, U. S. Patent № 2486984, Nov. 1, 1949.

7. Rowe R. G., Sonic tests grade abrasive wheels, Steel, **126**, № 26, 1950, 74, 84.

8. Rowe R. G., Testing abrasive wheels with the sonic comparator, Nondestructive Testing, **10**, № 2, 1951, 29.

9. Prigge R. E., Correlation of modulus of rupture and modulus of elasticity, B. S. Thesis, New York State College of Ceramics, May 1951.

10. Williams R. M., Sonic apparatus for measuring modulus of elasticity of resin bonded abrasives, M. S. Thesis, New York State College of Ceramics, May 1951.

11. Grime G., Determination of Young's modulus for building materials by a vibration method, Phil. Mag. [7] **20**, 1935, 304.

12. Grime G. and Eaton J. E., Determination of Young's modulus by flexural vibrations, Phil. Mag. [7] **23**, 1937, 96.

13. Powers T. C., Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations, Am. Soc. Testing Materials Proc., **38**, pt II, 1938, 460.

14. Obert L., Sonic method of determining modulus of elasticity of building materials under pressure, Am. Soc. Testing Materials Proc., **39**, 1939, 987.

15. Hornibrook F. B., Discussion on sonic method of determining for modulus of elasticity, Am. Soc. Testing Materials Proc., **39**, 1939, 996.

16. Forgue S. V. and Loomis G. A., Modulus of elasticity of dinnerware bodies by a sonic-vibration method, Bull. Am. Ceram. Soc., **20**, № 12, 1941, 425.

17. Pickett G., Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders, Am. Soc. Testing Materials Proc., **45**, pt II, 1945, 846.

18. Colonna-Ceccaldi J., L'essai au son des meules céramiques (Sound tests of ceramic grindstones), Mécanique, **30**, 1946, 253.

19. Baab K. A. and Kramer H. M., Sonic method for determining Young's modulus of elasticity, J. Am. Ceram. Soc., **31**, 1948, 318.

20. Decker A. R., Note regarding the sonic Determination of modulus of elasticity using round-section bars, J. Am. Ceram. Soc., **33**, 1950, 192.

21. Dorn J. E. and Teitz T. E., The modulus of elasticity—a review of metallurgical factors, Metal Progr., **58**, № 1, 1950, 81.

22. Andrews C. W., Effect of temperature on the modulus of elasticity, Metal Progr., **58**, № 1, 1950, 85; Dynamic modulus, Metal Progr., **58**, № 1, 1950, 96.