

Use of Natural Oscillation Technique in Nondestructive Evaluation of Physic Mechanical Properties of Materials and Products

E. Z. Kovarskaya
I. B. Moskovenko

Рассмотрены состояние и перспективы развития акустического метода контроля, основанного на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) контролируемых объектов. Приведены физические основы метода и описаны приборы, реализующие метод измерения ЧСК с использованием свободных и вынужденных колебаний. Рассмотрены основные области применения метода, примеры решения практических задач и перспективы его дальнейшего использования в различных областях.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Целью настоящей статьи является обобщение возможностей и опыта использования частот собственных колебаний (ЧСК) изделий и специально подготовленных образцов для оценки физико-механических свойств различного рода материалов, в первую очередь, неметаллических материалов с большим затуханием акустических волн, для которых применение традиционных методов УЗК затруднено или вообще невозможно. Это, прежде всего, изделия из керамических, полимерных и композиционных материалов, а также изделия с поверхностью, затрудняющей

ввод ультразвуковых колебаний, например, чугунное литье.

Известно, что в общем виде взаимосвязь ЧСК изделий со скоростью распространения акустических волн в материале, из которого они изготовлены, может быть представлена в виде:

$$f_i = F_i C_i, \quad (1)$$

где f_i — частота собственных колебаний определенного вида i ; F_i — коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделия, коэффициента Пуассона, а также вида возмущаемых колебаний i ; $C_i = (E/\rho)^{1/2}$ — приведенная скорость распространения акустических волн (определение по ГОСТ 25961-83 и ГОСТ Р 52710-2007) — скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, изготовленном из такого же материала, что и материал контролируемого объекта; E — модуль нормальной упругости (модуль Юнга); ρ — плотность материала изделия.

Из выражения (1) следует, что при одинаковой форме и размерах изделий частота f_i , соответствующая определенной моде колебаний, характеризует приведенную скорость распространения акустических волн C_i . Этот параметр является упругой константой материала изделия, связанной с модулем Юнга, плотностью, прочностью, пористостью, твердостью и другими физико-механическими свойствами материала, а также с наличием дефектов или нарушением структуры материала.

С другой стороны, при одинаковых значениях скорости C_i частота f_i может

изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и наличием и влиянием достаточно крупных дефектов. Таким образом, в любом случае изменение частоты f_i определенной моды колебаний означает либо изменение физико-механических свойств материала изделия, либо наличие в нем дефектов. При этом и ухудшение физико-механических свойств материала (уменьшение прочности, твердости и т. п.), и наличие дефектов обычно приводят к понижению значения ЧСК.

Основные области, в которых нашел применение описанный метод контроля для решения практических задач:

- контроль шлифовального инструмента на всех видах связей, в том числе фасонного (профилированного, с выточками), отрезных кругов любого диаметра, а также малогабаритных инструментов диаметром 8 мм и менее, для определения физико-механических свойств которого не могут быть использованы традиционные методы контроля твердости;
- контроль огнеупорных и строительных изделий;
- контроль углеграфитовых изделий;
- контроль заготовок из чугуна разных марок;
- контроль изделий из высокопрочной керамики и синтетических сверхтвердых материалов;
- контроль частот собственных колебаний турбинных лопаток;
- диагностика состояния зданий и строительных конструкций;
- определение упругих констант (модулей упругости, коэффициента Пуассона

Сотрудники ООО «НПЦ «ЗВУК», г. Санкт-Петербург:



Коварская Елена Зеликовна

Зам. генерального директора. Окончила в 1974 г. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности электроакустика и ультразвуковая техника. Научные интересы — методы НК, основанные на измерении частот собственных колебаний изделий и образцов из различных материалов.

Московенко Игорь Борисович

Генеральный директор, д. т. н. Окончил в 1962 г. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности электроакустика и ультразвуковая техника. Научные интересы — методы НК, основанные на измерении частот собственных колебаний изделий и образцов из различных материалов.



Рис. 1. Прибор «Звук-203М»

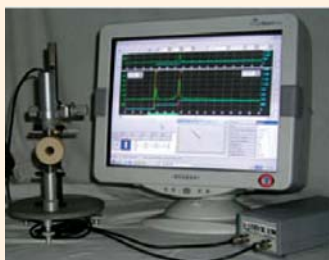


Рис. 2. Прибор «Звук-130»

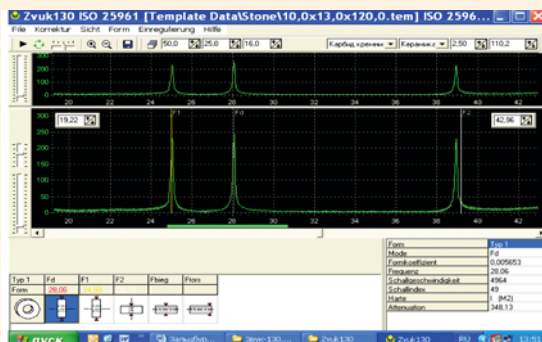


Рис. 3. Результаты контроля на экране монитора прибора «Звук-130»

и др.) изделий различной формы из различных материалов.

В настоящее время метод контроля, основанный на измерении ЧСК, начинает находить применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литых; изделий, используемых на железнодорожном транспорте (ж/д колеса и оси, подвесная арматура контактной сети); для контроля состояния деревянных опор линий электропередач, для определения плотности древесины при оперативном таможенном контроле и т. п. При использовании этого метода контроля требуется разработка специальных методик контроля, учитывающих форму и размеры изделий [1].

Применительно к контролю абразивных изделий в России такие методики разработаны для большинства типоразмеров шлифовальных инструментов на всех видах связок (керамическая, бакелитовая, вулканитовая) и их применение регламентировано Государственным стандартом ГОСТ Р 52710-2007 «Инструмент абразивный. Акустический метод контроля твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн» (ранее — ГОСТ 25961-83 «Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств»). В соответствии с указанными стандартами рекомендовано использование для измерения ЧСК приборов типа «Звук» или других приборов с аналогичными техническими характеристиками.

В отечественной промышленности наиболее широкое применение находят специализированные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» различных модификаций, выпускаемые ООО «ЗВУК», Санкт-Петербург, приборы типа ИЧСК-1, ИЧСК-2, выпускаемые НПП «Интерприбор», г. Челябинск; из зарубежных аналогичных приборов наибольшее применение для производственного контроля находят приборы типа «Grindo-Sonic», выпускаемые фирмой «Lemmens Electronika», Бельгия.

Аппаратура типа «Звук» включает приборы, основанные как на методе свободных колебаний, так и на методе вынуж-

денных колебаний (резонансный метод), а также программное обеспечение, необходимое для расчета упругих констант и анализа спектра ЧСК при контроле изделий различных форм и размеров. Комплект приборов, включающий приборы нового поколения типа «Звук-130» и «Звук-203М», обеспечивает возможность проведения анализа спектра ЧСК как крупногабаритных заготовок и изделий, так и изделий весьма малых размеров непосредственно в условиях их производства и эксплуатации. В приборах предусмотрено получение конечного результата измерений в следующих формах: ЧСК (f), скорость звука (C_s), модуль Юнга (E). Возможно также получение других физико-механических характеристик изделий при условии введения соответствующих корреляционных зависимостей.

Для удобства эксплуатации приборов в промышленных условиях и осуществления сортировки контролируемых изделий предусмотрено также получение результата в виде так называемых звуковых индексов (ЗИ) — градаций скорости звука C_s с шагом 200 м/с. ЗИ обозначается нечетным двухзначным числом, умножение которого на 100 дает среднее для данной градации значение скорости звука C_s , м/с.

Метод свободных колебаний.

На этом методе основан прибор «Звук-203М» (рис. 1), реализующий патент России № 2151385. Частотный диапазон прибора от 22 Гц до 17,4 кГц позволяет контролировать изделия в широком диапазоне размеров, приблизительно от 20–50 см до нескольких метров. Колебания в изделии возбуждаются ударом с помощью молотка или специального ударника, а в качестве приемника колебаний используется встроенный в корпус прибора микрофон. Возможно также подключение внешнего микрофона или пьезоэлектрического датчика.

Основное отличие от упомянутого зарубежного прибора «Grindo-Sonic», использующего этот же метод измерения, состоит в том, что в приборе имеются полосовые фильтры, с помощью которых

возможно выделять не только основной тон, но и более высокие ЧСК изделия. В приборах предусмотрено подключение к компьютеру, что расширяет возможность их использования.

Метод вынужденных колебаний (резонансный метод).

Этот метод реализован в приборе «Звук-130» (рис. 2). Частотный диапазон прибора от 0,5 до 500 кГц позволяет контролировать малогабаритные изделия с размерами от 3 мм и менее, в т. ч. таких, контроль физико-механических свойств которых в настоящее время никакими другими методами не производится.

Контролируемое изделие закрепляется в измерительной стойке между двумя пьезоэлектрическими преобразователями, снабженными куполообразными насадками для уменьшения влияния приемно-излучающей системы на колебания изделия (патент Германии № 1648770, патент США № 3499318). Электронная часть прибора, включающая генератор переменной частоты и широкополосный усилитель, выполнена в виде отдельного блока. Работой приборов управляет специальная программа, по которой производится расчет ожидаемого спектра ЧСК контролируемого изделия и выбор условий измерения для конкретных типоразмеров изделий различных форм и размеров. Результаты контроля выводятся на экран монитора в графическом и цифровом виде (рис. 3).

Указанные методы и приборы нашли достаточно широкое применение для определения физико-механических свойств различных материалов и изделий, входного и выходного контроля, оценки стабильности технологического процесса изготовления различных изделий, подбора комплектов изделий с одинаковыми или специально заданными свойствами, мониторинга состояния изделий при эксплуатации в циклических режимах [2]. Порядок применения метода в различных областях регламентируется как стандартами, так и отдельными специально разработанными методиками контроля.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НК

Контроль физико-механических свойств абразивных изделий основан на наличии корреляционной связи между результатами акустического контроля и значениями твердости, заданной рецептурно или полученной по результатам механических испытаний известными разрушающими методами. Применение метода регламентировано упомянутыми стандартами ГОСТ Р 52710-2007 и ГОСТ 25961-83. Измерители частот собственных колебаний типа «Звук» различных модификаций используются для контроля физико-механических свойств абразивных изделий самого широкого диапазона размеров и геометрической формы от 3 до 1200 мм, позволяя практически мгновенно получать конечный результат контроля, усредненный по всему изделию. Метод позволяет контролировать также свойства абразивных инструментов, контроль твердости которых не может производиться никакими другими известными методами [3–5].

Контроль огнеупорных и строительных изделий основан на наличии корреляционной связи между ЧСК и такими характеристиками изделий, как прочность, плотность, пористость и т. п. Применение метода для контроля некоторых видов огнеупорных изделий регламентировано ГОСТ-25714-83 «Контроль неразрушающий. Акустический звуковой метод определения открытой пористости, кажущейся плотности, плотности и предела прочности при сжатии огнеупорных изделий» [6–9].

Метод может эффективно использоваться при входном, выходном и промежуточном контроле, а также при эксплуатации изделий в условиях термоциклических нагрузок и при подборе комплектов изделий с заданными физико-механическими свойствами.

Контроль углеродных и углеграфитовых изделий основан на наличии корреляционной связи между результатами акустического контроля и такими характеристиками изделий, как прочность, плотность и удельное электросопротивление.

Метод может быть использован при выходном и входном контроле физико-механических свойств углеродных и углеграфитовых изделий, например, подовых блоков ванн электролизеров и углеграфитовых электродов, используемых в электрометаллургии при производстве алюминия и других металлов. Применение метода позволяет оперативно проводить сплошной 100-процентный контроль изделий в партии и под-

бирать комплекты изделий, например, для ванн электролизеров, с одинаковыми заданными физико-механическими свойствами [10, 11].

Метод может эффективно использоваться при входном, выходном и промежуточном контроле, для оценки остаточного ресурса изделий при эксплуатации в условиях циклических нагрузок, таких изделий сложной формы как, например, тиглы для плавки металла [12, 13].

Контроль отливок из чугуна основан на наличии корреляционной связи между скоростью распространения акустических волн (скоростью звука) и такими важными характеристиками как твердость по Бринеллю, прочность и содержание шаровидного графита. Применение метода измерения ЧСК с применением приборов типа «Звук» дало возможность оперативно определять эти характеристики на заготовках конфорок электроплит, деталей силовых агрегатов — дисков сцепления, маховиков и т. п. до их механической обработки без специальной подготовки поверхности, необходимой при проведении УЗК [14, 15].

Контроль изделий из высокопрочной керамики и синтетических высокопрочных материалов. Установлены корреляционные зависимости между упругими характеристиками (скоростью C_p , коэффициентом Пуассона) и твердостью, плотностью, а также эксплуатационными показателями (износостойкостью и прочностными характеристиками) изделий из высокопрочной керамики на основе корунда, карбида кремния, карбида бора, кубического нитрида бора и т. п. с различными добавками. Такие изделия используются для изготовления режущих пластин, износостойких деталей, элементов органокерамической брони и т. п. [16–19].

Контроль строительных конструкций, зданий и сооружений в настоящее время становится весьма актуальной проблемой в связи с большим количеством зданий и сооружений, требующих ремонта, реконструкции или реставрации, а также необходимостью оценки состояния эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений. Возможность оперативной экспериментальной оценки технического состояния и остаточного ресурса таких объектов по ЧСК может обеспечиваться различными видами экспериментальных обследований объектов контроля [20–23].

Определение упругих констант материалов. Возможность определения таких упругих констант как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и других параметров, характеризующих упругие свойства

различных материалов по результатам измерения ЧСК, представляет большой интерес при определении и исследовании свойств новых сверхтвердых и композиционных материалов. Особенно в том случае, когда размеры или особенности структуры образцов не позволяют использовать известные разрушающие и неразрушающие методы контроля для определения указанных параметров. Наличие алгоритмов контроля и возможность получения высокой точности измерения отдельных составляющих спектра ЧСК позволяют использовать для анализа спектра ЧСК приборы типа «Звук» различных модификаций или другие аналогичные устройства [24–27].

Дефектоскопия изделий. Акустический контроль, основанный на измерении ЧСК, дает интегральную оценку всего объема изделия. Однако обычно наличие нарушений сплошности структуры изделия и наличие в нем дефектов приводит к понижению ЧСК и соответствующего значения C_1 ниже некоторого заранее определенного значения и к изменению спектра ЧСК, т. е. изменению соотношения между ЧСК разных видов колебаний. Эти обстоятельства в ряде случаев позволяют обнаруживать указанные нарушения. Такие работы с положительными результатами проводились с целью обнаружения дефектов структуры углеродных изделий для обнаружения различного рода дефектов, например, в чугунных отливках типа «шапка изолятора», а также для контроля состояния деревянных опор в линиях электропередач. Для некоторых типов углеграфитовых и керамических изделий обнаружено изменение значений ЧСК при многократных циклических термонагрузениях, что показывает возможность использования результатов контроля для оценки ресурса изделия с целью своевременного вывода его из эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций [28, 12].

Исследования, выполненные различными авторами, показали также принципиальную возможность использования метода свободных колебаний для поиска развитых усталостных трещин в элементах железнодорожных колесных пар. Такой метод может быть положен в основу разработки портативного прибора, дающего объективные показания и реализующего накопленный на железных дорогах практический опыт контроля колес простукиванием [29–31].

При проведении дополнительных научно-исследовательских работ области применения метода могут быть существенно расширены как в направлении контроля физико-механических свойств различного рода материалов и изделий,

так и в направлении дефектоскопии изделий и определения состояния и остаточного ресурса различного рода конструкций, зданий и сооружений.

Литература

- Коварская Е. З., Московенко И. Б. Опыт промышленного использования акустического метода оценки физико-механических свойств изделий по частотам собственных колебаний. – Дефектоскопия. 1991. № 6. С. 9–15.
- Московенко И. Б. Метод свободных колебаний – самый древний метод акустического контроля. – В мире НК. 1998. № 2. С. 10–13.
- Московенко И. Б., Славина Л. Я. Приборы типа «Звук» для контроля твердости и других физико-механических свойств абразивных инструментов. – Металлообработка. 2002. № 1(7). С. 32–34.
- Коварская Е. З., Московенко И. Б., Чудакова С. М. Метрологическое обеспечение контроля физико-механических характеристик низкочастотным акустическим методом. – В мире НК. 2004. № 2(24). С. 17–19.
- Коварская Е. З., Московенко И. Б., Чудакова С. М., Цывьян А. М. О введении ГОСТ Р 52710-2007. – В мире НК. 2007. № 4(38). С. 52–53.
- Московенко И. Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств строительных и огнеупорных изделий. – В мире НК. 2002. № 2(16). С. 26–28.
- Московенко И. Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств огнеупорных изделий. – Новые огнеупоры. 2003. № 1. С. 50–55.
- Московенко И. Б., Буравов А. Д., Вихман С. В. и др. Возможности использования неразрушающих акустических методов контроля для оценки физико-механических свойств и качества огнеупоров. – Новые огнеупоры. 2011. № 12. С. 38–42.
- Московенко И. Б., Буравов А. Д., Вихман С. В., Коварская Е. З. Исследование возможности оценки физико-механических свойств изделий из огнеупорных бетонов акустическими методами. – Новые огнеупоры. 2012. № 4. С. 38–39.
- Московенко И. Б., Гребенкин А. Ф. Акустический метод неразрушающего контроля качества углеродных изделий. – Заводская лаборатория. 1992. № 2. Т. 58. С. 23–25.
- Московенко И. Б. Неразрушающий контроль физико-механических свойств углеграфитовых и других огнеупорных изделий. – Новые огнеупоры. 2007. № 1. С. 48–50.
- Московенко И. Б., Чернявец А. Н., Коварская Е. З. Акустический неразрушающий метод контроля качества углеродных тиглей для плавки металла. – Цветные металлы. 1997. № 3. С. 77–79.
- Московенко И. Б., Коварская Е. З., Чернявец А. Н. Акустический метод контроля углеграфитовых изделий в процессе их производства и эксплуатации. – В мире НК. 2005. № 2(28). С. 12–14.
- Воронкова Л. В. Ультразвуковой контроль чугунных отливок. – М.: МГУ им. Баумана, 1998.
- Славина Л. Я., Попазов Д. Д., Московенко И. Б., Зуева С. А. Акустический контроль твердости заготовок из чугуна с помощью прибора «Звук». – Заводская лаборатория. 1994. Т. 60. № 6. С. 38–40.
- Вильк Ю. Н., Славина Л. Я. Связь твердости, характеристик упругости и плотности образцов оксида алюминия, полученных методом горячего прессования. – Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1983, № 9. С. 1497–1500.
- Ипатов Н. С., Макаров В. Н., Паокина Л. С. и др. Исследование возможности акустического контроля инструментов из киборита. – Сверхтвердые материалы. 1993. № 1. С. 41–43.
- Нешпор В. С., Зайцев Г. П., Славина Л. Я. и др. Физико-механические характеристики высокотвердых поликристаллических материалов. – Огнеупоры. 1995. № 9. С. 2–5.
- Moskovenko I. B., Slavina L. Ya., Zaitsev G. P., Artsutanov N. Yu. Determination of elastic constants of materials on specimens in the shape of square plates. – Nondestr. Test. Eval. 2001. V. 17. P. 133–142.
- Губайдуллин Г. А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона. – В мире НК. 2002. № 2(16). С. 21–22.
- Савин С. Н., Ситников И. В., Данилов И. Л. Использование микроколебаний для диагностики строительных конструкций. – В мире НК. 2002. № 2(16). С. 18–20.
- Савин С. Н., Современные методы технической диагностики и мониторинга как средство безопасной эксплуатации строительных конструкций. – В мире НК. 2008. № 4(42). С. 14–18.
- Капустян Н. К., Антоновская Г. Н., Басакина И. М. Сейсмометрическая диагностика состояния зданий в задачах реставрации. – В мире НК. 2011. № 4(54). С. 16–20.
- Московенко И. Б., Ерофеев А. А., Легуша Ф. Ф., Пугачев С. И. Акустическая диагностика изделий из уплотненной древесины. – Ultragarsas. 1999. № 3(33). С. 11–13.
- Перрен А. А. Контроль физико-механических свойств стеклопластиков акустическими методами. – В мире НК. 2005. № 2(28). С. 4–6.
- Коварская Е. З., Московенко И. Б. Оценка состояния материалов и изделий при НК их физико-механических свойств. – В мире НК. 2010. № 4(50). С. 12–13.
- Перрен А. А., Баганик А. М. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении. – В мире НК. 2011. № 3(53). С. 24–26.
- Московенко И. Б., Гаврилов В. В., Коварская Е. З. и др. Устройство для звукового контроля деревянных опор / Патент на полезную модель RU 85238 U1, МПК G 01 N 29/12, опубл. 27.07.2009.
- Московенко И. Б., Кугушев В. И., Славина Л. Я. Развитие акустического метода «простукивания» цельнокатаных железнодорожных колес. – В мире НК. 2004. № 1(23). С. 64–66.
- Ерилин Е. С., Сорокин С. В., Фогель А. Л. Нелинейный акустический метод выявления трещин в вагонных колесных парах. – В мире НК. 2004. № 4(26). С. 65–68.
- Кугушев В. И. Методика обнаружения значительных дефектов железнодорожных колес по результатам измерения частот их собственных колебаний. – В мире НК. 2010. № 2(48). С. 72–74.

Статья получена 23 ноября 2012 г.