

ЗВУКОВОЙ ИНДЕКС – КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью настоящего доклада является обсуждение возможностей и опыта использования частот собственных колебаний (ЧСК) изделий и специально подготовленных образцов для оценки физико-механических свойств различного рода материалов и изделий, в первую очередь неметаллических материалов с большим затуханием акустических волн, для которых применение традиционных методов звукового и ультразвукового контроля затруднено или вообще невозможно. Это, прежде всего, изделия из керамических, полимерных и композиционных материалов, а также изделия с поверхностью, затрудняющей введение ультразвуковых колебаний, например, чугунное литье, огнеупоры, абразивные изделия и т.п.

Существует метод собственных колебаний [1-6], при котором контролируемое изделие колеблется как одно целое, вернее колеблются одни части тела относительно других. Ряд физических характеристик тела может быть определен по параметрам возбуждаемых колебаний. В большинстве случаев на практике частоты собственных колебаний тел лежат в звуковом диапазоне и лишь только некоторые частоты близки к 20 кГц. Поэтому метод собственных колебаний часто называют звуковым методом контроля. Как будет показано ниже нет никаких теоретических обоснований почему эти принципы не могут быть распространены на высокочастотный диапазон.

Известно [2-4], что в общем виде взаимосвязь ЧСК изделий со скоростью распространения акустических волн в материале, из которого они изготовлены, может быть представлена в виде:

$$f_i = F_i \cdot C_l, \quad (1)$$

где f_i - частота собственных колебаний определенного вида (i);

F_i - коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделий, коэффициента Пуассона, а также от вида возбуждаемых колебаний i ;

$C_l = \sqrt{E/\rho}$ – 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 определенному виду (моду) колебаний, характеризует приведенную скорость распространения акустических волн C_l . 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 изделия. С другой стороны, при одинаковых значениях скорости C_l частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так 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 уже нашел применение описанный метод контроля для решения практических задач:

- контроль шлифовального инструмента на всех видах связок, 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 которых не могут быть использованы традиционные методы контроля твердости;
- контроль огнеупорных изделий;
- контроль углеродистых изделий;
- контроль отливок из чугуна и других металлов;
- контроль изделий из высокопрочной керамики и синтетических сверхтвердых материалов;
- контроль частот собственных колебаний турбинных лопаток;
- контроль строительных изделий и диагностика состояния зданий, сооружений и других строительных конструкций;
- определение упругих констант (модулей упругости, коэффициента Пуассона и др.) материала изделий различной формы, изготовленных из различных материалов.

В настоящее время метод контроля, основанный на измерении ЧСК, начинает находить применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литья [7-9]; для контроля за состоянием деревянных опор линий электропередач (ЛЭП) [10, 11], для определения плотности древесины при оперативном таможенном контроле [12], для контроля изделий,

используемых на железнодорожном транспорте (ж/д колеса и оси, подвесная арматура контактной сети и т.п.) [13-15].

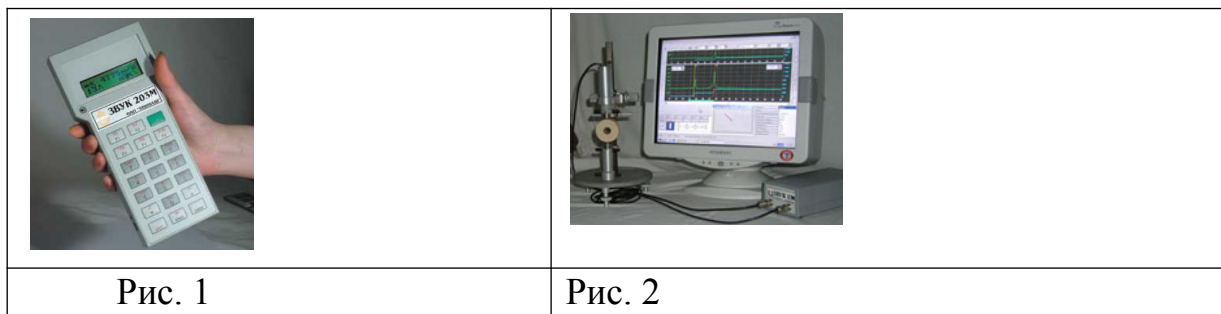
При использовании акустических методов контроля, основанных на измерении ЧСК изделий, требуется разработка специальных методик контроля, учитывающих форму и размеры изделий. Такие методики были, в первую очередь, разработаны применительно к контролю абразивных изделий для большинства типоразмеров шлифовальных инструментов на всех видах связок (керамических, бакелитовых, вулканитовых). В России применение разработанных методик для контроля основных типоразмеров абразивных инструментов 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 (СТ СЭВ 3313-81) "Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств" [16]). В соответствии с указанным стандартом рекомендовано использование для измерения ЧСК приборов типа "Звук" или других приборов с аналогичными техническими характеристиками.

В настоящее время в отечественной промышленности наиболее широкое применение находят 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 "GrindoSonic", выпускаемые фирмой «J.W.Lemmens–Electronika», Бельгия. Различные модификации приборов типа «Звук» включают приборы, действие которых основано на использовании как метода свободных, так и метода вынужденных колебаний.

На использовании **метода свободных колебаний** основано действие прибора "Звук-203М" (рис.1), реализующего патент России № 2151385 [17]. 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 подключение внешнего микрофона или пьезоэлектрического датчика. Предусмотрена также возможность подключения прибора к компьютеру, что дополнительно расширяет возможности его использования. Основное отличие прибора "Звук-203М" от упомянутого зарубежного прибора "GrindoSonic", 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, что существенно расширяет возможности прибора и упрощает процесс контроля.

Метод вынужденных колебаний (резонансный 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 даже менее, в т.ч. такие, 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 [18], патент США № 3499318 [19], патент Англии № 1153241 [20], патент Франции № 1527366 [21]). Электронная часть прибора, включающая генератор переменной частоты и широкополосный усилитель, выполнены в виде отдельного блока, подключаемого к компьютеру. Работой прибора 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).

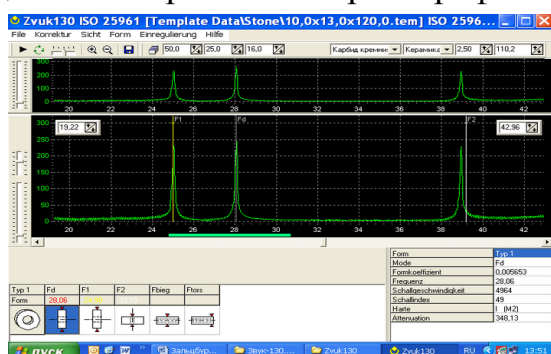


Рис. 3

Наиболее широко используемые в настоящее время в отечественной промышленности специализированные измерители частот собственных колебаний типа "Звук" сочетают требование простоты и надежности с достаточно высокой точностью измерения ЧСК. Разработано также

специальное программное обеспечение, необходимое для расчета упругих констант и анализа спектра ЧСК при контроле изделий различных форм и размеров. Комплект приборов "Звук" 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.

Совместными работами с фирмой «Абразив» (Чехия) был выполнен комплекс работ, позволивших применить этот метод не только в отечественной промышленности, но и на ряде зарубежных фирм в таких развитых странах как Австрия, Германия, Индия, Италия, Китай, Польша, США, Чехия, Швейцария и др. не только для контроля абразивных инструментов, но и изделий из других материалов [22].

Специалистами фирмы «Гранит» (Венгрия) был выполнен значительный комплекс работ по освоению акустического метода контроля физико-механических свойств и качества абразивных изделий, который позволил включить этот метод в государственный стандарт Венгрии MSZ 4505/9-83 [23, 24]. Венгерскими специалистами было подтверждено, что этот метод позволяет производить расшифровку низкочастотного спектра собственных колебаний мелкогабаритного абразивного инструмента и дает возможность проведения серийных акустических испытаний абразивного инструмента с учетом влияния основных рецептурно-технологических факторов [25-27], при этом акустический параметр C_l шлифовальных инструментов хорошо отражает изменение плотности ρ шлифовального круга. Изготовленные из заданной рецептурной смеси инструменты характеризуются имеющейся между этими двумя параметрами C_l и ρ зависимостью общего характера, причем проведенные венгерскими специалистами эксперименты подтвердили, что у инструментов, изготовленных из заданной рецептурной смеси эта зависимость линейная [27].

Выполненные совместные работы позволили также провести освоение акустического метода контроля в условиях производства фирмы «Дрезден Унион» (Германия) [28], причем в Германии применение метода было регламентировано государственным стандартом ГДР TGL 55047 [23,24].

В Чехословакии на фирме «Карборундум электрит» этот метод был включен в технологический процесс производства абразивного инструмента с использованием специально разработанного программного обеспечения.

В приборах типа «Звук» предусмотрено получение конечного результата измерений в следующих формах: ЧСК (f), скорость звука (C_l), 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_l с определенным шагом. ЗИ обозначается нечетным двухзначным числом, умножение которого на 100 дает среднее для данной градации значение скорости звука C_l в м/с. Звуковой индекс, по сути дела, может рассматриваться в качестве меры физико-механических свойств различных материалов. Этот параметр нашел достаточно широкое применение для оценки и контроля физико-механических свойств различного рода абразивных изделий в соответствии с упомянутым стандартом ГОСТ Р 52710-2007 (ранее ГОСТ 25961-83). Использование в качестве выходного параметра при акустическом контроле значения C_l , пронормированного в виде звукового индекса ЗИ, позволяет производить определение и контроль физико-механических свойств изделий как при их изготовлении, так и в условиях их эксплуатации. В связи с тем, что в соответствии с упомянутым стандартом звуковой индекс ЗИ начал использоваться в качестве выходного параметра в первую очередь при контроле физико-механических свойств абразивных инструментов, для удобства использования диапазон значений C_l , соответствующий одному звуковому индексу, был выбран равным 200 м/с. Такой диапазон соответствует ориентировочно одной степени твердости в средней части шкалы твердостей, которая является одной из основных характеристик, определяющих физико-механические свойства абразивных инструментов, и применяется для их оценки при использовании стандартизированных механических методов контроля твердости, причем различные изготовители изделий вкладывают в это понятие различный смысл, определяемый, с одной стороны, комплексом рецептурных и технологических характеристик и, с другой стороны, результатами контроля твердости различными методами и средствами. При этом, как правило, применяемые буквенные обозначения твердости являются условными и не отражают параметров, определяющих физические свойства изделий. Это исключает возможность сравнения физико-механических свойств абразивных изделий различных фирм-изготовителей и приводит к тому, что изделия, имеющие одинаковые индексы твердости, могут обладать различными, часто не сопоставимыми физико-механическими и, соответственно, эксплуатационными свойствами [29]. В настоящее время для оценки твердости абразивных инструментов в отечественной промышленности и мировой практике все более широкое распространение находят акустические методы контроля, в том числе с использованием звукового индекса для оценки физико-механических свойств изделий. Для обозначения ЗИ в соответствии с упомянутым стандартом

используются нечетные числа от 19 до 75, охватывающие диапазон C_l от 1800 до 7500 м/с. Этот диапазон позволяет оценивать физико-механические свойства практически всех основных выпускаемых в настоящее время абразивных инструментов, начиная с самых мягких кругов на вулканитовых связках, вплоть до самых твердых кругов на керамических связках, используемых для обработки шариков в подшипниковой промышленности. При необходимости, диапазон значений ЗИ может быть расширен, так, например, режущим инструментам из композиционных материалов, полученным на базе кубического нитрида бора, соответствуют ЗИ 109-155, в то же время ЗИ менее 19 имеют, например, гибкие порошковые круги. Кроме того, при необходимости повышения точности контроля диапазон C_l , соответствующий одному ЗИ, может быть уменьшен до 100 м/с, что соответствует разрешающей способности современных измерителей ЧСК. При этом могут быть введены в стандарты или другую нормативно-техническую документацию, наряду с нечетными, четные значения ЗИ, что используется, например, в отечественной промышленности для оценки свойств высокопористых керамических абразивных кругов.

Следует отметить, что звуковой индекс является высокоинформативным параметром и в ряде случаев позволяет оценивать физико-механические свойства самых разнообразных изделий не только из абразивных, но и из других видов материалов. Значения ЗИ и C_l некоторых твердых и сверхтвердых материалов, определенные акустическим методом с применением приборов типа "Звук", приведены в таблице 1. Там же для сравнения приведены значения Е-модуля и микротвердости этих материалов, взятые из справочной литературы. Как видно из таблицы, с уменьшением скорости C_l и соответственно ЗИ уменьшается и микротвердость, являющаяся одной из основных характеристик материалов подобного рода. Для Е-модуля, который в ряде случаев используется для оценки физико-механических свойств таких материалов, во всем диапазоне рассмотренных материалов подобной зависимости не наблюдается. Это позволяет рассматривать звуковой индекс в качестве дополнительной меры, характеризующей физико-механические свойства подобных материалов. Такая информация, в ряде случаев, может быть полезна при исследовании свойств новых сверхтвердых и композиционных материалов, особенно в том случае, когда размеры или структура образцов не позволяют использовать известные разрушающие и неразрушающие методы контроля для определения физико-механических свойств исследуемых материалов.

Таблица 1.

Материал или изделие	Е-модуль, кгс/мм ² x10 ³	Скорость распространения упругих колебаний C_l , м/с, x10 ³	Звуковой индекс, ЗИ	Микротвердость Н, кгс/мм ²
Алмаз	50,2-85,0	15,7-15,9	157-159	10000
Эльбор	62,0-95,0	12,0-15,6	125-157	9000
Карбид бора	29,6	10,8	107-109	3700-4300
Карбид кремния	36,5	10,6	105-107	3000-3300
Материалы С2, С8 на основе карбида кремния	34,5-41,0	10,9-11,6	109-117	-
Термокорунд	35,5-41,0	9,6-10,2	95-103	2000-2400
Минералокерамика горячего прессования	40,5-44,5	10,0-10,5	99-105	-
Карбид вольфрама	72,2	6,7	67	1730
Быстрорежущая сталь Р18	22,0	5,0	49-51	1300-1400

Было показано [26, 30], что такая таблица может быть продолжена в сторону более мягких материалов вплоть до полиэтилена, для которого значение ЗИ ориентировочно составляет ЗИ 3-ЗИ 5 (таблица 2), при этом характер зависимости физико-механических свойств рассмотренных материалов от ЗИ сохраняется. Это позволяет рассматривать ЗИ в качестве дополнительной меры физико-механических свойств не только твердых и сверхтвердых материалов, но также и других материалов, которые находят применение в различных отраслях промышленности. Возможность определения C_l в любых изотропных веществах, по нашему мнению, может быть использована при построении единой шкалы, аналогичной шкале твердости по Моосу, для сопоставления физико-механических свойств материалов в диапазоне от $C_l \sim 390$ м/с (полиэтилен) до $C_l \sim 16\,000$ м/с (алмаз), включая различные металлы и другие материалы. В настоящее время акустический метод контроля с использованием в качестве выходного параметра, характеризующего физико-механические свойства изделий, звукового индекса ЗИ уже находит применение для контроля изделий из керамических, минералокерамических, углеродных, огнеупорных, абразивных и других видов материалов.

Таблица 2

Материал	C_l , м/с	ЗИ
Алмаз	15700 - 15900	157 – 159
Эльбор	12000 - 15600	125 – 157
Карбид бора	10800	107 - 109
Термокорунд	9600-10200	97 – 101
Карбид вольфрама	6700	67
Сталь	4900 - 5200	49 - 51
Алюминий	5100 - 5200	51
Чугун	3900 - 4300	39 - 43
Медь	3400 - 3850	35 - 39
Плавленый шпат	2140	21
Кальцит	1690	17
Графит	800 - 1100	9 - 11
Тефлон	430	5
Полиэтилен	390	3

При введении в качестве выходного параметра контроля C_l и соответствующих значений ЗИ, как следует из выражения (1), должны быть стандартизованы вид колебаний, собственная частота которых подлежит измерению при контроле, и соответствующий этому виду колебаний коэффициент формы F_i , зависящий от размеров и формы изделий и незначительно от коэффициента Пуассона, который с достаточной степенью точности может быть принят постоянным, например, для большинства видов абразивных изделий. При использовании акустического метода для контроля абразивных изделий типа шлифовальные круги прямого профиля, отрезные и обдирочные круги, бруски и сегменты наиболее широкое распространение находят пять основных видов колебаний, для коэффициентов формы которых получены аналитические зависимости, учитывающие влияние размеров и формы изделий [2,3,31]. Для изделий более сложной формы, включая различного рода головки, круги в форме чашек и тарелок, профилированные круги и т. п., коэффициенты формы определяются по специальным методикам с проведением при необходимости дополнительных экспериментальных исследований [4]. Значения полученных таким образом коэффициентов формы приведены в виде таблиц в упомянутых стандартах и другой нормативно-

технической документации для основных типоразмеров абразивных инструментов и используются как при составлении градуировочных таблиц, применяемых при проведении контроля приборами типа "Звук", так и для непосредственного введения в вычислительные устройства приборов. Это позволяет получать, например, на цифровом табло прибора «Звук-203», дисплее прибора «Звук-203М» и мониторе компьютера прибора «Звук-130» непосредственно значения C_i и звукового индекса. В упомянутых стандартах для кругов прямого профиля диаметром 8-100 мм указаны виды колебаний, ЧСК которых рекомендуется измерять при испытании конкретных типоразмеров контролируемых изделий. Эти же виды колебаний использованы при разработке программного обеспечения приборов «Звук-130», нашедших достаточно широкое применение при контроле малогабаритных изделий методом вынужденных колебаний. Стандартизация указанных параметров позволяет обеспечить надежность и воспроизводимость результатов контроля, а также сопоставимость результатов, полученных с применением различных приборов и устройств акустического контроля, основанных на измерении ЧСК.

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 и т.п. [4-6]. Порядок применения метода в различных областях регламентируется как стандартами, так и отдельными специально разработанными методиками контроля.

Наиболее широкое применение в отечественной и мировой практике указанный метод собственных колебаний нашел при **контроле физико-механических свойств абразивных изделий**, основанном на наличии корреляционной связи между результатами акустического контроля и значениями твердости, заданной рецептурно или полученной по результатам механических испытаний известными разрушающими методами [5,32-35]. Применение метода в России регламентировано выше упомянутым стандартом ГОСТ Р 52710-2007 (ранее 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. Акустический метод позволяет контролировать физико-механические свойства таких абразивных инструментов, контроль твердости которых не

может производиться никакими другими известными методами, в первую очередь, малогабаритные шлифовальные круги и головки.

Контроль огнеупорных изделий, основанный на наличии корреляционной связи между частотой собственных колебаний и такими характеристиками материала изделий, как прочность, плотность, пористость и т.п., также находит достаточно широкое применение в отечественной промышленности для решения практических задач. Применение метода для контроля некоторых видов огнеупорных изделий было регламентировано ГОСТ 25714-83 «Контроль неразрушающий. Акустический звуковой метод определения открытой пористости, кажущейся плотности, плотности и предела прочности при сжатии огнеупорных изделий»[36]. Метод может эффективно использоваться при входном, выходном и промежуточном контроле, а также при эксплуатации изделий в условиях термоциклических нагрузок, при подборе комплектов изделий с заданными физико-механическими свойствами и отбраковке изделий с физико-механическими свойствами, отличными от заданных, а также имеющих существенные дефекты [37-41].

Специалистами ООО «ЗВУК» и кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Санкт-Петербург, был разработан проект целевой научно-технической программы «Неразрушающий контроль качества и диагностика огнеупорных материалов и изделий», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров [42].

Контроль углеродных и углеграфитовых изделий, основанный на наличии корреляционной связи между результатами акустического контроля и такими характеристиками материала изделий, как прочность, плотность и удельное электросопротивление, может быть эффективно использован при входном и выходном контроле физико-механических свойств углеродных и углеграфитовых изделий, например, подовых блоков электролизных ванн, обожженных анодов и углеграфитовых электродов, используемых в электрометаллургии при производстве алюминия и других металлов. Применение акустического метода позволяет оперативно проводить сплошной 100-процентный контроль изделий в партии и подбирать комплекты изделий с одинаковыми заданными физико-механическими свойствами, например для ванн электролизеров [43 - 46]. Метод также может эффективно использоваться при входном, выходном и промежуточном контроле для оценки остаточного ресурса изделий при эксплуатации в условиях циклических нагрузок, например, таких изделий достаточно сложной формы как тигли для плавки различного рода металлов и сплавов [47, 48].

Специалистами ООО «ЗВУК» и кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный» был разработан также, аналогичный указанному выше, проект целевой научно-технической программы «Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества изделий из углеродных материалов», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества углеродных и углеграфитовых изделий [49].

Контроль отливок из чугуна и других металлов основан на наличии корреляционной связи между скоростью распространения акустических волн (скоростью звука) и, например, такими важными характеристиками изделий из чугуна как твердость по Бринеллю, прочность и содержание шаровидного графита. Применение акустического метода, основанного на измерении ЧСК с применением приборов типа "Звук", дало возможность оперативно определять эти характеристики на заготовках конфорок электрических плит, деталей силовых агрегатов - дисков сцепления, маховиков и т.п. до их механической обработки без специальной подготовки поверхности, необходимой при проведении ультразвукового контроля [7 — 9, 46].

Контроль изделий из высокопрочной керамики и синтетических высокотвердых материалов. Установлены корреляционные зависимости между упругими характеристиками (скоростью C_l , 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. [50-53].

Контроль строительных изделий и диагностика состояния зданий, сооружений и других строительных конструкций в настоящее время становится весьма актуальной проблемой в связи с большим количеством зданий и сооружений, требующих ремонта, реконструкции или реставрации, а также необходимостью контроля не только качества строительных изделий, в том числе различного рода кирпича [54, 55], но и состояния эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений [56-58]. Возможность оперативной экспериментальной оценки технического состояния и остаточного ресурса таких объектов может обеспечиваться различными видами экспериментальных обследований объектов контроля по частотам собственных колебаний.

Прибор «Звук-203М» может непосредственно использоваться для **контроля частот собственных колебаний турбинных лопаток**. Частоты собственных колебаний лопаток являются конструктивным параметром, тщательно исследуются при отработке их конструкции, жестко задаются и контролируются при изготовлении, установке в изделие и, в дальнейшем, при периодических ремонтах в течение периода эксплуатации различного рода газоперекачивающих агрегатов, турбореактивных двигателей и т. п. Обычно в качестве контролируемой частоты в конструкторской и технологической документации задается одна из нижних частот спектра ЧСК лопаток, установленных в рабочее положение. В ходе контроля лопатки могут сортироваться на три группы: «годные» - их ЧСК входят в установленные конструктивными нормами рамки, такие лопатки устанавливаются в изделие; «бракованные» - эти лопатки пойдут в переплавку; лопатки, подлежащие дополнительной технологической доработке, в ходе которой ЧСК доводятся до нормы путем некоторого изменения их геометрических параметров [59]. Контроль ЧСК лопаток в ряде случаев позволяет дополнительно получать информацию как о физико-механических свойствах материала лопаток, так и о наличии в них дефектов [60, 61].

Представляет интерес возможность **определения упругих констант материалов** таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и других параметров, характеризующих упругие свойства материалов, по результатам измерения ЧСК. Наличие алгоритмов контроля и возможность получения высокой точности измерения отдельных составляющих спектра ЧСК позволяют использовать для анализа спектра непосредственно приборы «Звук» различных модификаций или другие аналогичные устройства [62-65].

Дефектоскопия изделий. Акустический контроль, основанный на измерении ЧСК, дает интегральную оценку всего объема изделия, однако, как было сказано выше и следует из выражения (1), при одинаковых значениях скорости C_1 частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и влиянием крупных дефектов. Таким образом, как было сказано ранее, 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. Как следует из формулы (1), можно разделить влияние на значения ЧСК физико-механических свойств материала контролируемого изделия и его геометрии, для чего необходимо рассматривать не только само значение ЧСК, но и отношение частот

собственных колебаний двух различных мод "i" и "k", которое не зависит от скорости C_1 и определяется только геометрическими факторами, в том числе наличием дефектов:

$$\frac{f_i}{f_k} = \frac{F_i}{F_k} \quad (2)$$

При одинаковых геометрических размерах выражение (2) фактически описывает изменение спектра ЧСК изделия при наличии в нем дефектов. При реализации метода, основанного на измерении ЧСК, для целей дефектоскопии необходимо разрабатывать специальные методики контроля, обеспечивающие надежное выделение из спектра ЧСК соответствующих выбранных для контроля видов (мод) колебаний и исключая влияние на результаты измерений формы и размеров изделий и образцов. Обычно наличие нарушений сплошности структуры изделия и наличие в нем дефектов, как было указано выше, 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 различного рода нарушения сплошности, в первую очередь трещины, и неоднородности. Такие работы с положительными результатами проводились с целью обнаружения дефектов структуры углеродных изделий, для обнаружения различного рода дефектов в чугунных отливках, например, изделий типа «Оконцеватель» [46], а также для контроля за состоянием деревянных опор в линиях электропередач (ЛЭП) [10, 11]. Кроме того, для некоторых типов углеграфитовых и керамических изделий было обнаружено изменение значений ЧСК при многократных циклических термонагружениях, что показывает возможность использования результатов контроля для оценки ресурса подобных изделий с целью своевременного вывода их из эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций [4, 47, 48].

Исследования, выполненные различными авторами, показали также принципиальную возможность использования метода свободных колебаний для поиска развитых усталостных трещин в элементах железнодорожных колесных пар [13-15]. Такой метод может быть положен в основу разработки портативного прибора, дающего объективные показания и реализующего накопленный на железных дорогах практический опыт контроля колес простукиванием.

Достаточно полно затронутые в настоящем докладе вопросы были отражены в ежеквартальном журнальном обзоре «В мире НК» (В мире неразрушающего контроля) №4(58) Декабрь 2012 г., тема номера: НК по частоте собственных колебаний [66].

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

В заключении следует отметить, что в ряде случаев при использовании метода собственных колебаний, основанного на измерении ЧСК, в качестве дополнительной меры физико-механических свойств различных материалов и изделий может быть эффективно использован упомянутый параметр C_l – приведенная скорость распространения акустических волн (определение по ГОСТ 25961-83 и ГОСТ Р 52710-2007), пронормированный в виде звуковых индексов ЗИ. Этот параметр, как было показано, является упругой константой материала изделия, связанной с модулем Юнга, плотностью, прочностью, пористостью, твердостью и другими физико-механическими свойствами материала, а также с нарушением структуры материала изделия и наличием в нем различного рода дефектов. Звуковой индекс ЗИ является высокоинформативным показателем и в ряде случаев позволяет оценивать физико-механические свойства самых разнообразных изделий из различных материалов, что позволяет, в свою очередь, рассматривать его в качестве дополнительной меры, характеризующей физико-механические свойства целого ряда материалов и изделий, при этом использование параметра C_l , пронормированного в виде звукового индекса ЗИ, в качестве выходного параметра при акустическом контроле позволяет производить определение и контроль физико-механических свойств изделий как при их изготовлении, так и в условиях их эксплуатации.

В настоящее время акустический метод контроля с использованием в качестве выходного параметра звукового индекса ЗИ, характеризующего физико-механические свойства изделий, уже находит применение для контроля изделий из абразивных, огнеупорных, углеродных, керамических и других видов материалов.

Литература

1. [Неразрушающие испытания \(справочник\). Под ред. Р. Мак-Мастера. Пер. с англ. Под ред. Т. К. Зиловой, И. И. Кифера и К. И. Корнишина, книга 2, М.-Л., "Энергия", 1965. 492 с. С.418-426.](#)
2. Глаговский Б.А., Московенко И.Б.: Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении, Л., Машиностроение, 1977, 208с. [djvu](#) | [pdf](#) | [Список литературы \(полный\)](#).
3. Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Метод оценки эксплуатационных характеристик абразивных инструментов. - Вестник машиностроения, 1980, №6, с. 45-47.

4. [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.](#)
5. Московенко И.Б. Метод свободных колебаний - самый древний метод акустического контроля.- В мире неразрушающего контроля. 1998. № 2. С.10-13.
6. [Коварская Е.З., Московенко И.Б. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий.-В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 \(58\). С.5-8.](#)
7. [Коварская Е.З., Голдобин А.К., Антонов А.В. Определение прочности и твердости отливок из чугуна методом свободных колебаний.-В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 \(58\). С.20-24.](#)
8. Славина Л.Я., Попазов Д.Д., Московенко И.Б., Зуева С.А. Акустический контроль твердости заготовок из чугуна с помощью прибора «Звук».- Изд. "Машиностроение": Заводская лаборатория. 1994. № 6. том 60. С.38-40.
9. Воронкова Л.В. Ультразвуковой контроль чугунных отливок.- М., типография МГТУ им. Баумана, 1998.
10. Московенко И.Б., Гаврилов В.В., Коварская Е.З., Кононов О.А., Лиманов И.Я. Устройство для звукового контроля деревянных опор. -Патент на полезную модель RU 85238 U1, МПК G 01 N 29/12, опубл. 27.07.2009.
11. Лиманов И.Я., Белалами С., Попов Д.В., Символоков А.Ю. Акустический контроль опор воздушных линий электропередач .-В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 (58). С.25-28.
12. Симоненко А.А. Определение плотности древесины с применением низкочастотного акустического метода свободных колебаний [Текст] / А.А. Симоненко, Е.З. Коварская // Научно-технический журнал РОНКТД «Контроль. Диагностика», №2 (188). – М. – 2014. – С. 43-49.
13. Московенко И.Б., Кугушев В.И., Славина Л. Развитие акустического метода «простукивания» цельнокатаных железнодорожных колес. - В мире неразрушающего контроля. 2004. №1 (23). С.64-66.
14. Ерилин Е.С., Сорокин С.В., Фогель А.Л. Нелинейный акустический метод выявления трещин в вагонных колесных парах. - В мире неразрушающего контроля. 2004. № 4(26). С.65-68.
15. Кугушев В.И. Методика обнаружения значительных дефектов железнодорожных колес по результатам измерения частот их собственных колебаний. - В мире неразрушающего контроля. 2010. № 2(48). С.72-74.
16. Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Шаварина М.И., Коварская Е.З. ГОСТ 25961-83 (СТ СЭВ 3313-81)"Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств //Изд-во стандартов. - М.-1984.-16с. (Переиздание с изменениями.-1990.-28с.).
17. Московенко И.Б., Кропотов А.О., Кононов О.А., Коварская Е.З., Хаит А.Л., Славина Л.Я. Устройство для определения твердости и других физико-механических свойств абразивных изделий. - Патент 2151385 РФ, МКИ 7G 01 N 3/40, опубл. 20.06.2000, Бюлл. № 17.
18. Богданов В.В., Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Несмашный Е.В., Пигулевский Е.Д., Рыбаков В.А. Устройство для определения твердости

- абразивных изделий .- Патент 1648770 ФРГ, МКИ G 01 N 3/40 / .Заявл 18.03.67. Выдано 02.12.76.
19. Богданов В.В., Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Несмашный Е.В., Пигулевский Е.Д., Рыбаков В.А. Устройство для определения твердости абразивных изделий - Патент 3499318 США, МКИ G 01 N 3/40 / Заявл. 06.03.67.Выдано 10.03.70.
20. Богданов В.В., Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Несмашный Е.В., Пигулевский Е.Д., Рыбаков В.А. Устройство для определения твердости абразивных изделий - Патент 1153241 Англия, МКИ G 01 N 3/38 / Заявл.16.03.67.Выдано 29.05.69.
21. Богданов В.В., Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Несмашный Е.В., Пигулевский Е.Д., Рыбаков В.А. Устройство для определения твердости абразивных изделий - Патент 1527366 Франция, МКИ G 01 N / Заявл. 14.06.67.Выдано 22.04.68.
22. Kovarskaya E., Moskoenko I., Slavina L., Zima M., Rekhson L. Natural oscillation frequencies measuring and test of articles and materials (статья).- /The 15- th international DAAAM Symposium, Vienna, Austria, 3-6th November 2004.- S.261-262.
23. [Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Звуковой индекс - критерий оценки характеристик абразивных инструментов \(статья\)// Международная конференция "Intergrind 88" \(г. Будапешт, Венгрия, 15-17 ноября 1988 г.-том1 С.45-52.](#)
24. Глаговский Б.А., Израйлович Д.С., Московенко И.Б. Акустический метод контроля твердости как объект международной стандартизации (статья) //V111 международная конференция по шлифованию, абразивным инструментам и материалам "Intergrind' 91", 1-4 октября 1991, Ленинград.-1991.-ч.1.- С.103-109.
- 25.Voronko Jurij. vizsgalata // Kismeretu korongok szonikus vizsgalata // Gepgyartastechnologia,-XX, évfolyam,-6-szám, 1980, junius.- S.257-263.
- 26.Forrai Tamas Kemenysegvizsgalat akusztikai módszerrel // Gepgyartastechnologia,-XXVIII, évfolyam,-10-szám., 1988 oktober.-S.459-462.
- 27.Dr. Voronko Jurij A technologiai tenyezok hatasa az abraziv szerszam mechanikai tulajdonsagaira // Gepgyartastechnologia,-XXVIII, évfolyam,-10-szám., 1988 oktober.-S.463-469.
- 28.Blankenbourg S., Mockel R., Clausnitzer M., Glagowskij B., Moskowenko I. : Akustische Hartepfung zur Schleifkorperauswahl // Werkstatt und Betrieb.- 118. (1985).- 5.-S.267-270.
29. Московенко И.Б., Славина Л.Я., Федотова С.М.,Коварская Е.З. Опыт освоения метода контроля твердости абразивных инструментов на заводах-производителях //Сб. Статей конференции 12 сентября 2005г.-Волгоград-Волжский. 2005.
30. Глаговский Б.А., Московенко И.Б., Славина Л.Я. Исследование физико-механических свойств синтетических высокотвердых материалов акустическим методом. - труды ВНИИАШ, 1978, с.63-69.
- 31.В.А. Glagovsky, I.B. Moskoenko, V.A.Rybakov Verfahren und Gerat zur Hartepfung von kleinen Schleifwerkzeugen // Materialprufung. Bd. 15.- 1973.- № 9.- S.316-319.

32. 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.
33. Коварская Е.З., Московенко И.Б., Чудакова С.М. Метрологическое обеспечение контроля физико-механических характеристик низкочастотным акустическим методом.- В мире неразрушающего контроля. 2004. №2 (24). С.17-19.
34. Коварская Е.З., Московенко И.Б., Чудакова С.М., Цывьян А.М. О введении ГОСТ Р 52710-2007.- В мире неразрушающего контроля. 2007. №4 (38). С.52-35. Kriegesmann J., Glagovsky V.A., Moskowenko I.B., Schmid H.A. NDT of Abrasive Tool Hardness // Industrial Diamond Review.- v. 53.- № 557.-1993- 4/93.- p. 206-209 (Germany).
36. Полонский Ю.А., Боричева В.Н., Сенявин Н.К., Зелигшер Г.Я., Норкина А.С. ГОСТ 25714-83 "Контроль неразрушающий. Акустический звуковой метод определения открытой пористости, кажущейся плотности, плотности и предела прочности при сжатии огнеупорных изделий. //Изд-во стандартов. - М.-1983.-8с.
37. Московенко И.Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств строительных и огнеупорных изделий. - В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С.26-28.
38. Московенко И.Б. Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств огнеупорных изделий.- Новые огнеупоры. 2003. №1. С.50-55.
39. Московенко И.Б., Буравов А. Д., Вихман С. В., Коварская Е.З., Некрасова О.К., Смирнова М.А. Возможности использования неразрушающих акустических методов контроля для оценки физико-механических свойств и качества огнеупоров. - Новые огнеупоры. 2011. № 12. С.38-42.
40. 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.
41. Московенко И.Б., Буравов А. Д., Зима М., Коварская Е.З. Разработка рекомендаций по контролю акустическим методом качества огнеупорных изделий на основе периклаза, в том числе переклазоуглеродистых. - Новые огнеупоры. 2014. № 2. С.57-60.
41. Московенко И.Б., Коварская Е.З., Потапов А.И. Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров. - Новые огнеупоры. 2015. № 2. С.64-67.
43. Московенко И.Б., Гребенкин А.Ф. Акустический метод неразрушающего контроля качества углеродных изделий. - "Машиностроение". Заводская лаборатория. 1992. № 2. том 58. С.23-25.
44. Московенко И.Б. Неразрушающий контроль физико-механических свойств углеграфитовых и других огнеупорных изделий. - Новые огнеупоры. 2007. № 1. С.48-50.
45. [A.F. Grebjonkin, W.A Krjukowskij, B.A. Glagovsky, W.A. Lyssanow, I.B. Moskovento, Zerstorungsfreie akustische Materialprufung an Kohlenstoffanoden // Aluminium-66, Jahrgang. -1990.- № 9.- S.854-857.](#)

46. Elena Z. Kovarskaya, Igor B. Moskoenko Nondestructive Control Of Physico-Mechanical Properties And Quality Of Carbon Materials And Products Used In The Production Of Aluminum. В сборнике: ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И МИНЕРАЛЫ – 2019», сборник докладов Одиннадцатого международного конгресса. 2019. С.304-310.
(Коварская Е.З., Москоенко И.Б. Неразрушающий контроль физико-механических свойств и качества различного рода материалов и изделий, используемых при производстве алюминия))
47. Москоенко 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.
48. Москоенко И.Б., Коварская Е.З., Чернявец А.Н. Акустический метод контроля углеграфитовых изделий в процессе их производства и эксплуатации. - В мире неразрушающего контроля. 2005. №2 (28). С. 12 – 14.
49. Москоенко И.Б., Коварская Е.З., Потапов А.И. Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества изделий из углеродных материалов. - Новые огнеупоры. 2017. № 2. С.61-65.
50. Вильк Ю.Н., Славина Л.Я. Связь твердости, характеристик упругости и плотности образцов оксида алюминия, полученных методом горячего прессования. Известия академии наук СССР, Неорганические материалы., Москва, 1983, №9. С.1497—1500.
51. Ипатов Н.С., Макаров В.Н., Паокина Л.С., Проскуряков С.Л., Славина Л.Я. Исследование возможности акустического контроля инструментов из киборита. – Сверхтвердые материалы. 1993. №1. С.41-43.
52. Нешпор В.С., Зайцев Г.П., Славина Л.Я. и др. Физико-механические характеристики высокотвердых поликристаллических материалов. - Огнеупоры. 1995. №9. С.2-5.
53. I.B. Moskoenko, L.Ya.Slavina, G.P. Zaitsev and N. Yu. Artsutanov, Determination of elastic constants of materials on specimens in the shape of square plates. -Nondestr.Test.Eval. 2001.-Vol. 17.-p.133-142.
54. Коварская Е.З., Москоенко И.Б. Результаты опробования возможности применения низкочастотного акустического метода для определения марочности кирпича по частотам собственных колебаний. - В мире неразрушающего контроля. 2015. №2 (68). С. 27 – 30.
55. Губайдуллин Г.А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона. - В мире неразрушающего контроля. 2002. №2 (16). С.21-22.
56. Савин С.Н., Ситников И.В., Данилов И.Л. Использование микроколебаний для диагностики строительных конструкций. -В мире неразрушающего контроля. 2002. № 2 (16). С.18-20.
57. Савин С.Н. Современные методы технической диагностики и мониторинга как средство безопасной эксплуатации строительных конструкций. - В мире неразрушающего контроля. 2008. №4 (42). С.14-18
58. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М. Сейсмометрическая диагностика состояния зданий в задачах реставрации. -В мире неразрушающего контроля. 2011. № 4(54). С.16-20.

59. Коварская Е.З., Мартынов В.А., Кузьмин Е.Ю. Современное оборудование и методика контроля частот собственных колебаний лопаток реактивных двигателей.- III международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» Сб. трудов том IV секция «Приборостроение и методы контроля», Санкт-Петербург, 14-15 апреля 2015, с.45-47.
60. Крюков И.И., Андреев П.А., Мошников А.В., Мочалов Б.С. Обследование технического состояния установки лопаток осевого компрессора газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4 путем контроля собственных частот их колебаний.-В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 (58). С.17-19
61. Ваньков Ю.В., Бусаров А.В., Александрович Ю.П. Контроль клепаного соединения лопаток ГТУ методом свободных колебаний.-В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 (58). С.10-12.
62. Московенко И.Б., Ерофеев А.А., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И. Акустическая диагностика изделий из уплотненной древесины. -ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS. 1999. № 3(33). С.11-13.
63. Перрен А.А. Контроль физико-механических свойств стеклопластиков акустическими методами - В мире неразрушающего контроля. 2005. №2 (28). С.4-6.
64. Коварская Е.З., Московенко И.Б. Оценка состояния материалов и изделий при НК их физико-механических свойств. - В мире неразрушающего контроля. 2010. №4 (58). С.12-13.
65. Перрен А. А., Баганик А. М. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении. - В мире неразрушающего контроля. 2011. №3 (53). С.24-26.
66. Тема номера: НК по частоте собственных колебаний. -В мире неразрушающего контроля. 2012. №4 (58). С.5-28.