

## Терминология

- «КМ» - композиционные материалы.
- «ПКМ» - полимерные композиционные материалы. ПКМ представляют собой полимерную матрицу, содержащую тонкие армирующие волокна из высокопрочных материалов (стекло, углерод, органические вещества и т.п.).
- «НК» - неразрушающий контроль.
- «Дефектоскоп» - устройство для обнаружения дефектов в изделиях из различных металлических и неметаллических материалов методами неразрушающего контроля.
- «Импедансный метод контроля» - метод основанный на различии механических импедансов дефектных и доброкачественных участков контроля.
- «Метод свободных колебаний» - метод основанный на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе параметров этих колебаний.
- «Велосиметрический метод контроля» - способ контроля, использующий влияние дефекта на скорость распространения упругих волн в изделии и длину их пути между излучателем и приемником колебаний.
- «Акустико-топографический метод контроля» - метод основан на возбуждении в контролируемом изделии мощных колебаний качающейся частоты, и визуальном наблюдении распределения порошка на поверхности изделия.



## Введение

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и перспективных материалов относятся полимерные композиционные материалы. ПКМ все чаще применяют в современном машиностроении, особенно в тех случаях, когда ни один другой материал не отвечает требованиям новой техники.

В настоящее время ПКМ и материалы на их основе серьезно потеснили конструкционные материалы, такие как железобетон, металл, дерево. ПКМ эффективно конкурируют с такими конструкционными материалами, как алюминий, титан, сталь. Активно используют ПКМ такие отрасли как авиация, космонавтика, судостроение, транспорт, химическое машиностроение, медицина.

Широкое применение ПКМ в различных отраслях промышленности повышает требования к их качеству. Особенно остро проблема качества стоит в отраслях промышленности, производящих изделия ответственного назначения, где аварии, вызванные применением дефектных деталей и узлов, связаны с огромными материальными потерями и человеческими жертвами.

Контроль качества КМ необходимо проводить как в процессе производства (в следствии отклонений производственных процессов могут образовываться различные виды неоднородностей структуры: пористость, посторонние включения, расслоения и трещины), так и в процессе эксплуатации.

В настоящее время для контроля изделий из ПКМ применяются акустические, радиационные, тепловые и оптические методы НК. Многие из перечисленных методов не обеспечивают комплексного контроля, требуют сложной калибровки, а радиационные методы требуют повышенных требований безопасности.

Для контроля изделий из ПКМ наиболее широко применяются низкочастотные акустические методы контроля. Основными преимуществами этих методов, позволяющих широко внедрить их в промышленность, является возможность контроля большой номенклатуры конструкций с различным сочетанием металлических и неметаллических материалов, простота в эксплуатации, портативность.

## Импедансный метод

Импедансный метод основан на различии механического импеданса дефектных и доброкачественных участков контролируемого изделия. Механическим импедансом  $Z$  называется комплексное отношение силы  $F$ , действующей на поверхности механической системы к средней колебательной скорости  $V$  на этой поверхности в направлении силы:  $Z = F / V$ . Изменение механического импеданса регистрируется преобразователем импедансного дефектоскопа. Преобразователи делятся на совмещенные и раздельно-совмещенные.

Основная область применения метода – выявление дефектов клеевых и паяных соединений с обшивкой (до 3 мм для алюминиевых сплавов и до 1,7 для сталей) и элементами жесткости (лонжероном, нервюрой) или наполнителем (пенопластом, сотами и др.), а также дефектов типа расслоения и непрочное в неметаллических покрытиях или изделиях из слоистых пластиков, при глубине залегания до 15-20 мм.

**Совмещенный преобразователь** (рис. 1.а) имеют один контакт с контролируемым объектом. Достоинство данного преобразователя, называемого также абсолютным, - простота, недостаток - наличие сигнала в режиме холостого хода. Этот сигнал появляется в результате инерционной нагрузки контактного наконечника и приемного

пьезоэлемента. Данный недостаток устранен в совмещенном дифференциальном преобразователе. Конструктивно дифференциальный преобразователь похож на абсолютный. Он имеет излучающий пьезоэлемент, расположенный в середине колебательной системы, и два приемных пьезоэлемента: один между звукопроводом и наконечником, второй между звукопроводом и тыльной массой.

**Раздельно-совмещенный преобразователь** (рис. 1.б) имеют два вибратора (излучающий и приемный). Контролируемый объект выступает в роли элемента связи между вибраторами.

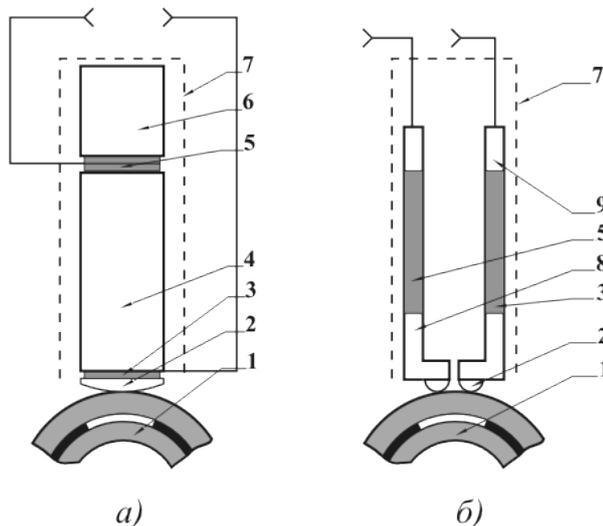


Рис. 1. Пьезоэлектрические преобразователи: (а - совмещенный б - раздельно-совмещенный)

1 – объект контроля, 2 - контактный наконечник, 3 - приемный пьезоэлемент, 4 - волновод, 5 - излучающий пьезоэлемент, 6 - тыльная масса, 7 - корпус преобразователя, 8 - излучающий вибратор, 9 - приемный вибратор.

## Локальный метод свободных колебаний

Метод свободных колебаний (МСК) основан на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе параметров этих колебаний. Если используются колебания контролируемого объекта как единого целого, то это интегральный вариант МСК, если колеблется только часть контролируемого объекта - то это локальный вариант МСК. Локальный метод требует сканирования всей поверхности контролируемого изделия.

Метод основан на возбуждении ряда частот при коротком ударе контролируемого объекта, причем, чем короче импульс удара, тем шире полоса возбужденных частот. Основной способ возбуждения - электромеханический, хотя известны и некоторые другие, например: пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический, газодинамический, оптический.

Для приема колебаний используется микрофон или пьезоприемник. Микрофон имеет более гладкую АЧХ, но более чувствителен к внешним акустическим помехам. Пьезоприемник подвержен фрикционным шумам. Информативным параметром в МСК служит спектр сигнала.

С помощью МСК выявляются дефекты в многослойных конструкциях и изделиях из пластика. МСК позволяет контролировать изделия из материалов с малыми модулями Юнга и высоким коэффициентом затухания упругих колебаний (резина, пенопласт и т. п.) и обнаруживать дефекты на большой глубине залегания (до 300 мм в пластике).

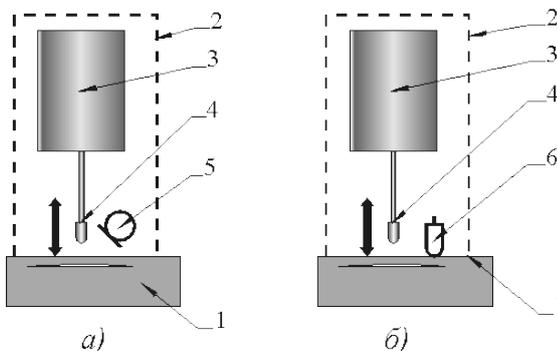


Рис. 2 Ударные преобразователи (а - с микрофонным приемником, б - с пьезоэлектрическим приемником)

1 - контролируемый объект, 2 - корпус преобразователя, 3 - электромагнит, 4 - подвижная система, 5 - микрофон, 6 - пьезоприемник.



## Велосиметрический метод

Велосиметрический метод объединяет способы контроля, использующие влияние дефекта на скорость распространения упругих волн в изделии и длину их пути между излучателем и приемником колебаний. Для этого метода характерно применение антисимметричных волн частотами 20-60 кГц и сухого точечного контакта преобразователей с контролируруемыми изделиями. Дефекты регистрируются по изменению фазы непрерывной или импульсной волны или временем распространения акустического импульса. Эти параметры не зависят от силы прижатия преобразователя к изделию, состояния акустического контакта и других меняющихся факторах, поэтому метод отличается повышенной стабильностью показаний.

Велосиметрический метод применяют для обнаружения дефектов (преимущественно расслоений) в изделиях из слоистых пластиков и неметаллических покрытиях, зон нарушения соединений между элементами многослойных конструкций, выполненных из неметаллических и металлических материалов. Метод позволяет обнаружить указанные дефекты площадью более 2-15 см<sup>2</sup> на глубине до 25 мм, с увеличением глубины залегания чувствительность падает.

## Акустико-топографический метод

Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемом изделии мощных колебаний качающейся частоты. При совпадении собственных частот отделенных дефектных зон с частотой возбуждения колебания этих зон усиливаются, и нанесенный на изделие порошок перемещается на границы дефектов, делая их видимыми. Альтернативный способ индикации увеличения амплитуды колебаний в зонах дефектов основан на использовании оптической голографии.

Метод применяется для контроля конструкций с высокой добротностью, преимущественно металлических.

## Низкочастотные акустические дефектоскопы



Акустический дефектоскоп АД-60      Акустический дефектоскоп АД-64М      Акустический дефектоскоп АД-701М

Еще в СССР были широко распространены дефектоскопы, реализующие метод свободных колебаний (МСК). Наиболее популярные приборы были АД-50У и АД-60С. Различие состояло в том, что АД-50У реализует только МСК, а АД-60С МСК и импедансный метод. В данных дефектоскопах реализован спектральный анализ сигнала по 12 частотам в диапазоне от 0,5 до 20 кГц. В середине 90-х годов был разработан и запущен в производство дефектоскоп АД-64М реализующий МСК и импедансный метод с цифровой обработкой сигнала на базе ноутбука.

В настоящее время, наша компания производит современный низкочастотный акустический дефектоскоп АД-701М, совмещающий МСК и импедансный метод. В комплект дефектоскопа входят: ударный преобразователь ПС-101 для контроля МСК; раздельно-совмещенный преобразователь ПИ-101 и совмещенный преобразователь ПИ-201 для контроля импедансным методом.

## Импедансные дефектоскопы



Импедансный дефектоскоп АД-40      Импедансный дефектоскоп ИД-91М      Импедансный дефектоскоп ИД-403

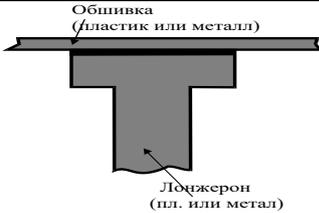
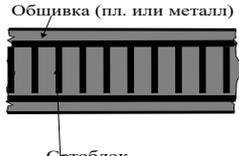
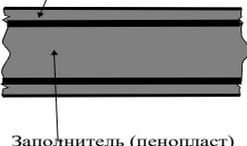
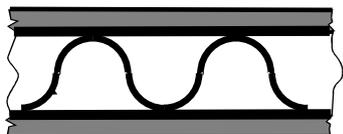
В разные годы в СССР выпускались импедансные дефектоскопы, использующие непрерывные колебания: ИАД-1, ИАД-2, ИАД-3 и наиболее популярный АД-40И. Широкое распространение получил дефектоскоп ДА-42И использующий импульсный импедансный метод.

В настоящее время наибольшее распространение получили приборы российского производства: ИД-91М, АД-42ИП, ДАМИ-С09, ИД-403.

В настоящее время, наша компания производит импедансный дефектоскоп ИД-403. В комплект дефектоскопа входят раздельно-совмещенный преобразователь ПИ-101 и совмещенный преобразователь ПИ-201.



Типовые многослойные конструкции и возможные дефекты в них

Схематическое изображение конструкции	Возможные дефекты	Примечание
Полимерный композиционный материал (органопластик, стеклопластик, углепластик) 	<ul style="list-style-type: none"><li>Расслоение между слоями пластика.</li></ul>	При проверке всего сечения требуется двусторонний доступ.
Клеевое соединение металлов 	<ul style="list-style-type: none"><li>Непроклей между листами металла.</li></ul>	Контроль со стороны более тонкого слоя.
Клеевое соединение металла и ПКМ или теплоизоляционного материала 	<ul style="list-style-type: none"><li>Непроклей между ПКМ и металлом.</li><li>Расслоение между слоями ПКМ.</li></ul>	Контроль со стороны более тонкого слоя.
Клеевое соединение ПКМ - резина - металл 	<ul style="list-style-type: none"><li>Непроклей между ПКМ и резиной.</li><li>Непроклей между резиной и металлом.</li><li>Расслоение в ПКМ.</li></ul>	
Обшивка (пластик или металл)  Лонжерон (пл. или металл)	<ul style="list-style-type: none"><li>Расслоение в обшивке.</li><li>Отслоение обшивки от лонжерона.</li></ul>	Контроль со стороны обшивки.
Обшивка (пл. или металл)  Сотоблок	<ul style="list-style-type: none"><li>Расслоение в обшивке.</li><li>Отслоение обшивки от сот.</li></ul>	
Обшивка (пл. или металл)  Заполнитель (пенопласт)	<ul style="list-style-type: none"><li>Расслоение в обшивке.</li><li>Отслоение обшивки от заполнителя.</li></ul>	
Клеевая конструкция с ячеистым заполнителем 	<ul style="list-style-type: none"><li>Расслоение в обшивке.</li><li>Отслоение обшивки от заполнителя.</li></ul>	



## Рекомендации по контролю композиционных материалов низкочастотными акустическими методами

Широкому внедрению низкочастотного акустического метода контроля композитных материалов способствовали его универсальность, удобство в эксплуатации, отсутствие необходимости смачивания контролируемых изделий, легкость контроля по криволинейным поверхностям, простота и доступность аппаратуры.

**Контроль импедансным методом.** Импедансный метод применяется для выявления дефектов клеевых и паяных соединений между тонкой (до 3 мм для алюминиевых сплавов и 1,7 мм для сталей) обшивкой и элементом жесткости (лонжероном, нервюрой и т.п.) или заполнителем (пенопластом, сотами и др.). Импедансный метод позволяет выявлять дефекты типа расслоения и непрочности в неметаллических покрытиях и изделиях из слоистых пластиков, залегающих на глубине до 15-20 мм.

**Совмещенные преобразователи** применяют для контроля изделий с тонкими обшивками, а так же в случаях, когда требуется высокая чувствительность к неглубоко залегающим дефектам.

**Раздельно-совмещенные преобразователи** применяют для обнаружения дефектов под обшивкой толщиной 0,8 – 3 мм (для алюминиевых сплавов), расслоений в пластиках, нарушений соединений слоев пластика. В зависимости от свойств материалов и конструкций, возможно обнаруживать дефекты на глубину до 15 – 20 мм.

**Контроль методом свободных колебаний.** Метод свободных колебаний применяют в основном для контроля изделий из пластиков и комбинированных конструкций из пластиков и металлов. Ширина спектров, возбуждаемых в объекте контроля, зависит от параметров конструкции и прежде всего от модуля упругости материала наружного слоя. Для изделий с наружными слоями из жестких материалов характерны широкие спектры (до 10 – 15 кГц). Конструкциям с мягким наружным слоем (резина, пенопласт и т. п.) соответствуют узкие спектры в низкочастотной области.

**Преобразователи с пьезоприемником** позволяют обнаружить дефекты на большой глубине. Недостатки преобразователей с пьезоприемником – подверженность фрикционным шумам, возникающим при движении пьезоприемника по объекту контроля.

**Преобразователи с микрофонным приемником** практически не чувствительны к фрикционным шумам, но воспринимают внешние акустические шумы. Преобразователи с микрофонным приемником особенно эффективны для контроля изделий с наружными слоями с низким значением модуля Юнга.

## Факторы, затрудняющие применение низкочастотных акустических методов контроля

**Шероховатость поверхности контроля.** С увеличением шероховатости поверхности, повышается уровень фрикционных шумов при перемещении преобразователя с сухим точечным контактом. Для получения приемлемого отношения сигнал/шум, при контроле изделий с повышенной шероховатостью необходимо снижать скорость сканирования, и соответственно производительность.

**Кривизна поверхности.** Увеличение кривизны поверхности контролируемых объектов снижает чувствительность низкочастотных акустических методов. Это обусловлено тем, что с ростом кривизны поверхности возрастает жесткость и, следовательно, модуль механического импеданса изделия в дефектных и доброкачественных зонах, увеличиваются собственные частоты отделенных дефектами зон изделий.

**Малые габариты и масса контролируемых объектов.** Рассматриваемые методы применимы в основном к изделиям, длина и ширина которых измеряются не менее чем десятками миллиметров. С уменьшением габаритов и массы контролируемых объектов меняются условия возбуждения свободных колебаний. Если в крупногабаритном изделии отражения волн от его границ практически не влияют на спектр возбуждаемых свободных колебаний, то с уменьшением габаритов эти отражения начинают играть возрастающую роль. При этом, локальный метод свободных колебаний превращается в интегральный.

**Раскрытие дефекта.** Низкочастотные акустические методы позволяют обнаружить дефекты типа нарушения сплошности (расслоения, непрочности и т. д.), имеющие заполненный газом зазор. Дефекты без такого зазора обычно не выявляются, так как механическая связь отделенной дефектом зоны с остальной частью конструкции не уменьшается и, следовательно, механический импеданс, собственные частоты и скорость распространения упругих волн существенно не меняются.

**Неконтролируемые зоны.** При контроле рассматриваемыми методами существуют неконтролируемые зоны:

- Дефект расположен на глубине, превышающей предельную глубину залегания для данного метода и материала.
- В местах, где невозможен доступ преобразователя к поверхности изделия вследствие сложной формы.
- При малой толщине отделенного дефектом слоя, в результате чего под действием силы притяжения преобразователя дефект «захлопывается» и не обнаруживается.



## Литература

1. Ю. В. Ланге Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. Москва. Машиностроение, 1992, 272 с.
2. В. В. Мурашов Методы и средства акустического контроля многослойных конструкций и изделий из полимерных материалов.
3. Ланге Ю. В., Воропаев С. И., Мужичкий В. Ф., Ермолаев А. П., Лапшин В. С., Нефедов С. В., “Новые низкочастотные акустические дефектоскопы для неразрушающего контроля многослойных конструкций”.
4. Покровский А. В., Петина О. С., (АНТК им. А. Н. Туполева) “Опыт применения дефектоскопов АД-64М и АД-42ИМ для неразрушающего контроля многослойных конструкций”.
5. Павлюченков Н. Ф., (НПП АЭРОСИЛА, г. Ступино), Нефедов С. В. (МНПО СПЕКТР), “Особенности использования дефектоскопа АД-64М для неразрушающего контроля воздушных винтов”.
6. Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах. / Ю. В. Ланге и др. Дефектоскопия, 1995, №10, с.
7. Спектры импульсных сигналов преобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов. / Ю. В. Ланге и др. Дефектоскопия.
8. Новые низкочастотные акустические дефектоскопы для неразрушающего контроля многослойных конструкций. / Ю. В. Ланге и др. Доклад 14й Российской научно-технической конференции “Неразрушающий контроль и диагностика”
9. Методика выбора информативных параметров сигналов при разработке акустического метода свободных колебаний. / В. П. Афанасьев и др. Дефектоскопия, 1990, №9, с. 19-24.
10. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. Под редакцией В. В. Клюева Машиностроение, 1995
11. В. П. Гондаревский., М. Л. Кузнецов., Импедансный контроль качества сотовых конструкций с углепластиковыми обшивками. Заводская лаборатория, 1993, №12, с.35-38
12. Yu. V. Lange The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing. Nondestructive Testing and Evaluations