

Рецензент канд. техн. наук Г.С. Корзинков (Ленинградская государственная академия)

Галембо А.С.

Г16 Фортепиано. Качество звучания. — М.: Лепропримбул-издат, 1987. — 168 с.

Рассмотрены конструкция и технология изготовления фортепиано в точки зрения его акустики. Представлены новые методы оценки качества звучания фортепиано, современная аппаратура для анализа звучания, пути улучшения музыкально-акустических свойств инструмента.

Материал базирется на современных информационных, научных и производственных исследованиях.

Для конструкторов, технологов, мастеров и исследователей в области производства и ремонта фортепиано.

Г 340400000-096
90-87
0441011-87

ББК 37.27

ПРЕДИСЛОВИЕ

Индивидуальное производство музыкальных инструментов, господствовавшее вплоть до XIX в., обеспечивало высокое качество продукции, наилучшим образом удовлетворяло запросы отдельных, ориентально малочисленных потребителей. Но с ростом народонаселения, изменением социальных и культурных условий жизни людей выросла и потребность в музыкальных инструментах, поэтому их производство в основном стало массовым. В таких условиях достижение высокого качества продукции может быть связано только с удовлетворением освобожденных, утраченных требований большого числа потребителей. Эти требования исторически меняются в зависимости от эволюции музыкального искусства — композиторского и исполнительского, архитектуры, моды и т.д. Поэтому музыкальная промышленность в стремлении достичь совершенства всегда ориентируется на мнение музыкантов-практиков, профессиональные критерии которых были достаточно весомы (иногда) в основном смысле.

Вопреки распространеному мнению индивидуальное производство музыкальных инструментов высокого класса никогда не основывалось только на систематическом освоении особых технологических операций, введенных некоторым орауи производителем и учени. Дело успеха не самым делом пошло в начале общедоступного времени технологических приемов, который мастер теоретически использует при изготовлении деталей, узлов и инструмента в целом: истинный "творец мастера" состоит в теоретическом подходе к каждому экземпляру. Следующий инструмент при этом не повторяет в технологическом изготовлении предыдущий, так как неизбежно отклонения от точного копирования при изготовлении узлов и тех же деталей или узлов индивидуальны и на основании богатого опыта выявляет у настоящего мастера потребность корректировать технологию, с тем чтобы обеспечить наилучшее согласование узлов, а значит более качественный музыкальный инструмент.

Массовое производство, напротив, обычно руководствуется точным технологическим процессом. Тем не менее при подготовке и производстве новой модели музыкального инструмента его разработчики должны грамотно изготовить первые образцы для выбора из технологического времени именно той совокупности точных технологических решений, которая обеспечивает наилучшее возможное качество инструмента. Работа по определению точной технологии в этом случае аналогична индивидуальному изготовлению нескольких инструментов этой модели. Часто при этом отклонение технологических операций и в массовом производстве остается "индивидуальными", напримерintonировка фортепиано.

Еще более к индивидуальному оказывается производство предпринятими заказчик инструментах, получаемые в последние время все более широкое распространение. Поэтому руководство по изготовлению высококачественных инструментов должно уделять основное внимание именно разнообразным технологическим приемам, позволяющим целенаправленно изменять свойства важнейших узлов инструмента.

Привлекение ориентации специалистов в производстве материалов, умения воспользоваться той или иной рекомендацией требуют знаний в области акустики и психологии, необходимых для повышения качества звучания музыкального инструмента, формирования представлений о физических процессах, происходящих при звукообразовании. Одна из глав этой книги содержит самые необходимые определения объективных и субъективных параметров звука. Однако тем, кто хочет повысить свой творческий потенциал, необходимо углубить научные познания. И хотя большинство прикладных задач музыкального производства не решается строгими математическими расчетами, расширени круга факторов придает большую практическую пользу. Достаточно вспомнить, сколь наземными оказались акустические исследования А.Д. Римского-Корсаковой для разработки этенственных фортепиано, или обогатили наши познания о музыкальных инструментах исследования Б.Я. Янковского в области акустики скрипки, работы А.А. Володина по психологии восприятия музыкальных звуков и синтезу новых тембров и т.д. Все эти исследования имеют явно прикладной характер для музыкальной промышленности. Лучшие меры повышения качества музыкальных инструментов получают достижения науки и часто сами проводят научные исследования (Стейнвей, Хэммонд, Пфайффер и т.д.). Поэтому в книгу включены сведения о научной литературе по каждой из затронутых тем, что может оказаться полезным для заинтересованного читателя.

Книга дает также ряд рекомендаций по проведению самостоятельных производственных экспериментов, необходимых для нахождения оптимальных технологических решений.

В настоящее время научные исследования в области производства музыкальных инструментов активно ведутся во всем мире, в том числе в странах — членах СНГ: СССР, ПНР, ГДР, ЧССР. Многие из них посвящены вопросам качества звучания фортепиано. Однако книги, затрагивающие основы акустики фортепиано, не издавались уже несколько десятилетий; за это время фундаментальный труд не издается уже несколько десятилетий; за это время фундаментальный труд не издается уже несколько десятилетий; за это время фундаментальный труд не издается уже несколько десятилетий. Предлагаемая книга является попыткой обобщить накопленный за это время опыт по научно обоснованному усовершенствованию конструкции и технологии производства фортепиано с целью улучшения качества его звучания.

Глава I. МУЗЫКАЛЬНЫЙ ЗВУК

Звуком в широком смысле слова называют механические колебания и волны любой частоты в упругих средах. Однако чаще термином "звук" пользуются для обозначения колебаний в диапазоне частот, воспринимаемом человеческим слухом (16—20000 Гц). Для более низких частот употребляется термин "инфразвук", колебания с частотами выше 20000 Гц называют ультразвуком.

Мы будем иметь дело со звуками, возникающими в воздухе и в твердых телах. Звуки в твердых телах часто обобщают термином "вибрация".

Звук — явление материального мира, существующее вне зависимости от нашего сознания. Объективные параметры звука — частота, интенсивность, спектр и др. — являются параметрами раздражений системы слухового восприятия.

Субъективный эффект, возникающий в результате раздражения, называется ощущением. Слуховое ощущение также именуется звуком. Следовательно, слово "звук" имеет двойное значение, поэтому надо всегда правильно представлять себе, о чем идет речь — об объективном физическом явлении или ощущении слушателя.

Принято считать, что музыкальные звуки отличаются от немusicalных высокой определенностью. Если в обычной жизни такой трактовки бывает достаточно, то при профессиональной работе с музыкальными инструментами следует помнить, что данное разграничение весьма условно. В самом деле, любой реальный звук музыкального инструмента (в том числе и фортепиано) содержит призвуки шумового характера, в шумовые инструменты (например, барабаны) звучат с довольно заметной высотой определенности, которая используется в музыке, — барабаны настраиваются.

Работа над качеством звучания музыкальных инструментов в процессе их производства требует знаний физической природы звука, основных законов его возникновения, существования и восприятия. Элементарные и обязательные для понимания содержания этой книги сведения приведены ниже; более полное изложение представлено в специальной технической литературе (см.: Римский-Корсаков, 1973; Соловьева, 1972; Тейлор, 1978; Данкер, Фельдотлер, 1971).

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Периодическое колебание есть повторение изменений положений и скоростей материальной частицы или физического тела через равные промежутки времени.

На рис. 1 графически изображено простое гармоническое колебание, описываемое синусоидальной функцией:

$$y = A \sin(2\pi ft + \varphi),$$

где y — смещение колеблющейся частицы от положения равновесия (колебательное смещение); f — частота колебаний; T — период; φ — начальная фаза колебания. Величина $A \sin \varphi$ есть отклонение колеблющейся частицы от положения равновесия в начальный момент отсчета времени ($t = 0$).

Период простого гармонического колебания обратно пропорционален его частоте:

$$T = 1/f.$$

В практике акустических измерений имеют значение также колебательная скорость (\dot{y}) и колебательное ускорение (\ddot{y}), аналитическое описание которых получается последовательным дифференцированием функций смещения:

$$\dot{y} = \dot{y} = 2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi);$$

$$\ddot{a} = \ddot{y} = 4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft + \varphi).$$

Гармонические колебания могут быть и сложными. В этом случае они состоят из простых гармонических колебаний, частоты которых пропорциональны числам натурального ряда.

Аналитически такие колебания описываются суммой простых колебаний:

$$y = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) = \sum_{k=1}^n A_k \sin(2\pi f_k t + \varphi_k),$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, n$ — числа натурального ряда; A_k — амплитуда колебательного смещения k -го простого колебания; f_k — частота k -го простого колебания; φ_k — начальная фаза k -го простого колебания.

Из формул следует, что при одинаковых амплитудах колебательного смещения амплитуды колебательной скорости пропорциональны

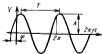


Рис. 1. Графическое изображение простого гармонического колебания

частоте, а колебательное ускорение — квадрату частоты простого гармонического колебания.

Период сложного гармонического колебания равен периоду составляющего колебания, для которого $k = 1$. Это колебание наименьшей частоты в сложном звуке называется обычно основным тоном.

Колебания возникают в упругих системах в результате нарушения их равновесия; при этом система, будучи предоставлена самой себе, совершает собственные или свободные колебания, характер и параметры которых зависят от свойств системы. Например, струна фортепиано, выведенная из состояния равновесия ударом молоточка, совершает собственные колебания.

Колебания в системе могут возникать также под влиянием постоянно действующей силы, величина которой колеблется. В таком случае система совершает вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы; параметры вынужденных колебаний зависят от свойств самой системы, от свойств источника вынуждающей силы и от характера их связи. Дека фортепиано совершает вынужденные колебания под влиянием внешней силы — периодически изменяющегося давления со стороны струны.

Когда частота вынуждающей силы совпадает с частотой какого-либо из собственных колебаний системы, наступает явление резонанса, т.е. резкого возрастания амплитуды колебания системы на этой частоте. Если медленным нажатием клавиши до малой октавы снять со струн демпфер, не возбуждая звука, а затем вызвать звук до первой октавы, то после снятия пальца с клавиши до первой октавы мы услышим продолжение этого звука в результате резонанса струн до малой октавы.

В большинстве музыкальных инструментов, в том числе и в фортепиано, звуки являются затухающими. Затухание колебаний происходит по нескольким причинам: звуковая энергия излучается колеблющимся телом в окружающую среду (в результате чего мы его слышим), энергия колебаний теряется на преодоление внутреннего трения в материале колеблющегося тела (например, струны) и, кроме того, на приведение в движение соседних физических тел, имеющих контакт с колеблющимся телом (например, опор струны).

Если силы трения, противодействующие простому гармоническому колебанию упругой системы, пропорциональны колебательной скорости, то затухание этого колебания является экспоненциальным и выражается формулой

$$y = A e^{-at} \sin(2\pi ft + \varphi),$$

где a — коэффициент затухания; $e = 2,71828$ — основание натуральных логарифмов.



Рис. 2. Экспоненциальное затухание простого колебания

Чем больше силы сопротивления колебаниям, тем больше коэффициент затухания колебаний, т.е. быстрее уменьшаются их амплитуды. Экспоненциальное затухание простого гармонического колебания изображено на рис. 2.

Иногда удобно оценивать затухание показателем, характеризующим убывание амплитуды за один период колебаний. Этот показатель называется логарифмическим декрементом затухания (δ):

$$\delta = \pi T.$$

Строго говоря, затухание колебания непериодично, так как характеризующие их физические величины не повторяются в точности. Однако поскольку мы слышим в затухающих звуках фортепиано определенную высоту, мы можем их считать периодическими с достаточной для целой данной книги точностью.

Затухание звуков фортепиано в общем не является чисто экспоненциальным, так как вызывающие его причины многообразны и сложны (см.: Handley, Martin, Benioff, 1957).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА

Распространение звука в воздухе — явление обыденное и понятное. Передачу звука твердой средой легко проиллюстрировать с помощью африканского опыта, который несведущему человеку может показаться фокусом. Прикрепите один конец длинной металлической проволоки к деке фортепиано, а другой протяните в другую часть здания (или вообще в другое здание), где услышать фортепиано невозможно. Если теперь прикоснуться этим свободным концом к деке гитары, то можно отчетливо услышать все, что играет на фортепиано, причем звуки будут исходить из гитары. Свойство твердой среды передавать звук делает возможным создание музыкальных инструментов.

Скорость звука не зависит от его высоты, громкости и других параметров, а определяется лишь упругими свойствами среды распространения. Вот почему когда мы удаляемся от играющего оркестра, музыка не превращается для нас в звуковую тучу.

Колебания распространяются в упругой среде в виде волн двух типов: продольных и поперечных. Волны называются продольными (или волнами сжатия), если частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Звук в воздухе создается продольными

волнами. Если частицы среды колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны, такая волна называется поперечной (или волной сдвига). Колебания натянутой струны — пример поперечных волн.

В твердом теле могут существовать как продольные, так и поперечные волны; более того, один вид легко превращается в другой.

В упомянутом выше примере с передачей звука от фортепиано к гитаре через проволоку мы имели дело именно с таким превращением поперечные волны в деке фортепиано возбуждали продольные колебания в проволоке, а те в свою очередь порождали поперечные волны в деке гитары.

Расстояние, пройденное волной за период времени (T), называется длиной волны (λ). Она связана со скоростью распространения (v) следующим образом:

$$\lambda = vT.$$

Легко вычислить, что длина звуковой волны в воздухе составляет 12,5 м для самого низкого и 0,2 м для самого высокого звука фортепиано.

Уравнение распространения волны для простого гармонического колебания

$$y = A \sin 2\pi f(t - x/v),$$

где x — координата точки пространства относительно начала отсчета.

ШУМ

Основой музыкальных звуков являются гармонические или почти гармонические колебания, создающие в той или иной мере определенное ощущение высоты звука. Когда же математической закономерности между частотами элементарных колебаний, входящих в сложный звук, отсутствует, звуки носят характер шумов. Если "идеальный" музыкальный звук — чистый (синусоидальный) тон, то "идеальный" шум — так называемый белый шум — содержит элементарные колебания всех частот. Оба "идеальных" звука на самом деле наиболее скучны и с музыкальной точки зрения некрасивы. Чистый тон по тембру напоминает очень невыразительную флейту, а белый шум — насмолкающие аллодисменты или звук водопада. Однако стоит ограничить диапазон частот шума, как он начинает принимать некоторую вышнюю определенность.

Таким образом, четкой границы между музыкальными звуками и шумами нет — эта граница определяется особенностями восприятия, основанного на субъективных представлениях о высоте определенной

В звук фортепиано, как и других музыкальных инструментов, наряду с "музыкальной частью", определяемой основным тоном и обертонами, присутствуют и шумовые признаки. И хотя в основном в больших дозах эти признаки уходят звук, полное их исчезновение лишило бы звуки фортепиано одного из характерных и обязательных тембровых признаков. Поэтому анализ шумов играет большую роль в объективном описании звуков музыкальных инструментов. Звук фортепиано во многом определяется шумом, особенно в дискантовом регистре. Происхождение, состав и роль этих шумов будут подробно описаны в главе VI.

ИНТЕНСИВНОСТЬ, ЧАСТОТА, СПЕКТР

Интенсивность звука называется энергия, переносимая звуковой волной через единицу поверхности, перпендикулярной направлению волны, в единицу времени. Учитывая законы восприятия, в психоакустике удобнее оперировать уровнем интенсивности, который связан с интенсивностью формулой

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

где I_0 — интенсивность, равная 10^{-12} Вт/м² и приблизительно соответствующая минимальной интенсивности звука, ощущаемой слухом человека; I — интенсивность оцениваемого звука; N — уровень в децибелах (дБ).

Если, например, интенсивность звука возрастает в 100 раз, то уровень его интенсивности увеличивается на 20 дБ, поскольку $\lg 100 = 2$. Удвоение интенсивности соответствует увеличению уровня интенсивности примерно на 3 дБ.

Энергия звука очень мала, если сравнить с другими источниками энергии. Звуковая энергия, излученная 50 000 болельщиками за полчаса часа футбольного матча, едва хватило бы, чтобы согреть одну чашку кофе.

Частота простого колебания, как известно, есть количество периодов этого колебания в единицу времени. Единица частоты — 1 герц (Гц) — соответствует 1 колебанию в секунду.

Частота сложного гармонического звука имеет то же определение и соответствует частоте основного тона этого звука. Так, для первой октавы имеет частоту 440 Гц, во второй октаве содержится обертоны 880 Гц, 1320 Гц и др.

Обычно частота измеряется специальным прибором — частотомером, имеющим стрелочную или цифровую индикацию. Измерение частоты требует времени для установления всех процессов в измерительных и индикационных цепях прибора, поэтому быстрые изменения частоты измерить очень трудно.

Понятие фазы применяется к простому колебанию (например, к частому тону); фаза — это угол (аргумент) синусоидальной функции, описывающей это колебание. Так, колебание $y = A \sin(2\pi ft + \varphi)$ имеет фазу $[2\pi ft + \varphi]$. При периодическом колебании фаза нарастает со скоростью $\omega = 2\pi f$, называемой круговой частотой, величина φ показывает фазу колебания в момент начала отсчета времени. Измерения фазы в радианах или в градусах, как правило, специальными приборами (фазометрами); она может быть также установлена в простейших случаях по изображению колебаний на экране осциллографического прибора.

Спектр применяется для описания сложных звуков. Математический спектр получается преобразованием Фурье, позволяющим представить сложную функцию в виде суммы синусоидальных компонент. Долгое время считалось, что разложение Фурье имеет только теоретическое значение и не соответствует реально происходящим волновым процессам. Сейчас мы уже знаем о реальном существовании гармоник, с помощью акустической аппаратуры мы можем их услышать, увидеть на экранах спектральных анализаторов; спектральный язык стал всеобщим, на нем объясняются все, имеющее дело с техническими применениями колебаний; в век электроники он стал также языком музыкантов.

Здесь мы опускаем математическую трактовку вопроса, которую читатель сможет найти во многих учебниках, и среди них — в доступной по форме изложении монографии А.А. Харшавина (1952).

Амплитудный спектр звука — это совокупность частот и соответствующих им амплитуд (интенсивностей) синусоидальных колебаний, составляющих звук. Если звук обладает периодичностью, то его спектр будет линейным, дискретным, спектр шума — сплошной. Спектр звуков музыкальных инструментов — комбинированный, содержащий как сплошные участки, так и характерные спектральные линии. Спектр обычно изображается в виде спектрограммы, т.е. диаграммы зависимости интенсивности (или уровня интенсивности) синусоидальных колебаний, входящих в состав звука, от частоты этих колебаний.

Таким образом, любое колебание можно представить графически не только во временной области (изображение формы колебания), но и в частотной области (спектральное изображение).

Для наглядности на рис. 3 изображены несколько акустических сигналов во временной и спектральной областях.

Такое спектральное описание является достаточно точным для стационарных колебательных процессов, когда параметры колебаний не изменяются во времени.

Реальные звуки обладают свойством затухания. Затухание составляющих сложного звука, как правило, неодинаково.

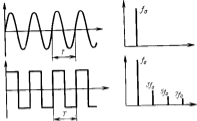


Рис. 3. Временное и спектральное представление некоторых периодических колебаний

Переходный процесс возникновения звука также связан со сложным изменением амплитуд и даже частот составляющих спектра, в следовательно, и формы волны. Поэтому спектр реального, нестационарного звука изменяется во времени, и эта изменчивость спектра оказывается очень важной для понимания природы тембра звуков музыкальных инструментов. Изображение изменяющегося спектра возможно в виде трехмерных диаграмм (рис. 4) или сонограмм (рис. 5). Иногда в качестве одной из характеристик изменяющегося спектра полезно определить максимальный спектр, дающий представление о максимальных амплитудах каждой составляющей спектра за все время от начала звука до его полного затухания.

Современные акустические приборы позволяют определить максимальный спектр звука в небольших временных интервалах, много меньших, чем полная длительность звука. Анализируя максимальные спектры, полученные в малых временных интервалах от начала звука до его окончания, можно оценивать изменчивость спектра, причем эта оценка будет тем точнее, чем меньше временной интервал, в котором производится каждое измерение спектра, по сравнению с длительностью анализируемого звука.

Чаще спектральные изображения на современных приборах отражают не величины амплитуд или интенсивностей составляющих спектра, а уровни их интенсивностей в децибелах. Такие изображения в большей степени соответствуют законам восприятия звуков, поэтому более удобны для оценки и сравнения спектров при решении прикладных задач.

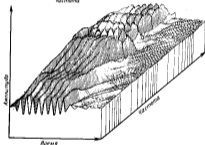
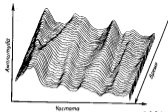


Рис. 4. Примеры трехмерного изображения спектра звука

Поскольку спектр — сложное понятие, его нельзя оценить одним числом (величиной), как частоту, интенсивность, фазу. Как же описать спектр? Чем один спектр может походить на другой или отличаться от него?

Некоторые характеристики спектров уже "зарекомендовали себя" при сравнительном анализе звуков.

1. Протяженность спектра, т.е. полоса частот, в пределах которой компоненты спектра имеют интенсивность, достаточную для возбуждения слухового рецептора.

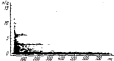


Рис. 5. Сонограмма звука форте 44 октавы фортепиано. Изменчивость длительности затухания звук спектральной частоты энергии сигнала на частоте, определяемой по оси абсцисс, в момент времени, определяемый по оси ординат

В качестве единицы протяженности спектра А.А. Володин применил октаву; началом отсчета частоты при этом служит частота основного тона. Энергия, заключенная в каждой октаве, считается мерой удаленной энергии спектра и вычисляется в условных единицах как сумма квадратов амплитуд компонент спектра, относящихся к данной октаве. Для звука, имеющего гармонический ряд обертонов, удельная энергия спектра вычисляется по формуле

$$P_{\text{от}} = \frac{n = 2^m - 1}{\sum_{k=1}^{n=2^m-1} A_k^2}$$

где m — номер октавы (начало отсчета — первая гармоника); k — номер гармоники; A_k — амплитуда k -й гармоники.

Для звуков фортепиано характерно уменьшение протяженности спектра с затуханием, в результате того, что высокие обертоны затухают с большей скоростью, чем низкие.

Для фортепиано характерно также уменьшение протяженности спектров от басового регистра к дискантовому.

2. Напряженность спектра характеризует распределение энергии по компонентам. Например, на рис. 6 спектры a и b при сравнимой напряженности имеют равную протяженность. Спектр a при малой протяженности имеет высокую напряженность, а спектр z при большой протяженности имеет малую напряженность.

Напряженность спектров звуков фортепиано (как и их протяженность) уменьшается с затуханием.

3. Отсутствие или значительное ослабление обертонов определенных номеров может дать информацию об источнике звука. Например, басовые звуки фортепиано обладают характерной периодичностью огибающей спектра (рис. 7). Эти спектры состоят из эквидистантных групп по 7–9 обертонов в каждой, другими словами — огибающие спектров имеют минимумы, соответствующие частичным тонам с номерами n и $[7-n]$, где $n = 1, 2, 3$, что связано с характерным для фортепиано выбором места удара по струне.

4. Частотное расположение энергетических максимумов спектра.

5. Наличие и количественные характеристики шумовых компонент.

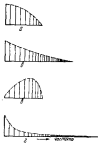


Рис. 6. Спектры разной протяженности и напряженности

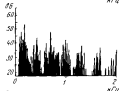
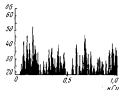
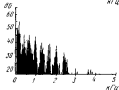


Рис. 7. Типичный максимальный спектр звука от субконтрактного фортепиано в разных масштабах частоты



6. Степень гармоничности обертонов, т.е. соответствия частот обертонов гармоническому ряду.

7. Келстр — специфическая обобщенная характеристика огибающей спектра, характеризующая ее периодичность. Способ описания сложных сигналов был впервые предложен в 1963 г. для упрощенного автоматического определения периодичности появления эха при сейсмических измерениях. С тех пор келстр и его модификации находят все более широкое применение в акустических исследованиях речевых формант, в эхолокации, при акустической диагностике машин

и т.д. В музыкальной акустике, судя по технической литературе, келстр до сих пор не использовался, хотя проблемы выделения и анализа периодичности стоят и перед исследователями музыкальных звуков, например, при объективном описании факторов, влияющих на интонационную окраску звуков.

Физически келстр определяется как "спектр мощности логарифмического спектра мощности" (Noll, 1967, p. 293).

Этому определению соответствует математическая формула

$$C(\tau) = |F\{\log |F(\omega)|^2\}|^2,$$

где $|F(\omega)|^2$ — спектр мощности сигнала; $C(\tau)$ — келстр; τ — кoeffициент.

Существуют и другие модификации келстра — вместо спектра мощности может быть использован амплитудный спектр, вместо прямого преобразования Фурье — обратное и т.д. (см.: Randall, 1981); выбор модификации зависит от цели ее применения. Однако общая идея применения келстрального описания музыкальных звуков заключается в том, что если сигнал имеет сложный спектр, то наличие в нем гармоник может быть незаметным при рассмотрении огибающей спектра, если наряду с гармониками в спектре присутствует множество других составляющих. Если подвергнуть сигнал вторичному спектральному анализу, другими словами, если получить спектр огибающей спектра, то периодичность огибающей спектра, если таковая имеется даже в скрытом виде, будет выявлена и огибающей келстра хорошо заметным пиком, координаты которого дают однозначную информацию об основной частоте содержащегося в сигнале гармонического колебания.

На рис. 8 приведена осциллограмма, спектр и келстр периодического звука. Из этих иллюстраций видно, что, анализируя огибающую келстра, нетрудно определить частоту разностного тона в комбинации гармонического составляющих спектра.

Независимой переменной келстра является коэфффициент, измеряемый в единицах времени. Значение коэфффициента, соответствующее келстральному пику, равно периоду разностного тона.

На рис. 9 приведены огибающая спектра и келстр звука ля большой октавы роля. Пики келстра отчетливо показывают период основного тона (110 Гц) и наличие в спектре характерного усиления обертонов, отстоящих друг от друга на 330 Гц.

Легко заметить, что термины "келстр" и "коэфффициент" — свободные обращения слов "спектр" и "frequency" (частота). По аналогии с понятиями "фаза", "гармоника", "период", употребляемыми при рассмотрении спектров, при келстральном анализе сигналов используются термины "зафа", "рагмоника", "репериод".

Более подробная математическая и физическая трактовка понятия "келстр" выходит за пределы темы данной книги и может быть найде-

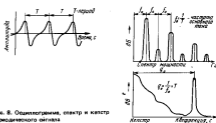


Рис. 8. Осциллограмма, спектр и келстр периодического сигнала

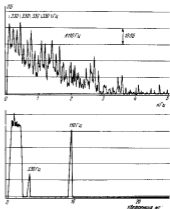


Рис. 9. Огибающая спектра и келстр звука ля большой октавы роля

на в специальной литературе по акустике и по методам обработки сигналов (см.: Нойл, 1967; Нойл, 1973; Ранделл, 1981; Шафер, Рабинер, 1970; Сондхус, 1988). Там же содержится сведения и о других современных способах выделения периодичности сложных сигналов, перспективные для использования при изучении звуков музыкальных инструментов (квилстр, спектр гармонического произведения и др.). Современные акустические приборы в сочетании с ЭВМ дают возможность получать все вышеуказанные объективные характеристики звука.

Описание спектра в каждой конкретной исследовательской задаче не полностью исчерпывается перечисленными характеристиками, так как спектры практически могут характеризоваться и множеством других параметров, относительная важность которых зависит от цели исследования.

Выбрать минимум наиболее информативных данных — самая сложная задача при использовании спектрального описания звуков для их исследований или оценки по качеству. Анализ спектральной информации требует от творческого работника большого опыта и знаний.

ГРОМКОСТЬ, ВЫСОТА, ТЕМБР

Объективные параметры звука определяются метрологически (с помощью приборов), субъективные же могут быть количественно оценены лишь в психофизиологических экспериментах; обычно для получения достоверных оценок используется статистическая обработка мнений испытуемых.

Установление количественных соотношений между объективными и субъективными параметрами звука — это основная задача специальной отрасли науки — психоакустики.

Если для школьного курса физики достаточно знать в соответствии с классическим учением Гельмгольца, что интенсивность музыкального звука определяет его громкость, частота — высоту, а соотношение гармоник — тембр, то для практической работы с музыкальными звуками эти сведения недостаточны, они дают лишь упрощенное понятие о связях объективных и субъективных параметров звука, которые на самом деле очень сложны и до сих пор изучены не полностью.

Громкость звука соответствует субъективному восприятию его интенсивности. Чем больше интенсивность звука, тем более громким он кажется. Однако этот закон соблюдается строго только в том случае, если сравниваемые звуки одинаковы по частоте и форме колебаний. Однако же интенсивные звуки разных частот имеют неодинаковую громкость. Звуки с частотами 3–5 кГц кажутся нам особенно громкими. В диапазоне 0,5–7 кГц чувствительность слуха достаточ-

но высока, но за пределами этой области частот — ниже и выше — чувствительность слуха падает.

Например, чтобы быть таким же громким, как тон 1000 Гц с уровнем интенсивности 60 дБ, тон с частотой 50 Гц должен иметь уровень интенсивности 78 дБ, а тон с частотой 10 000 Гц — около 65 дБ. Тон с частотой 4000 Гц, соответствующий почти максимальной чувствительности слуха, при той же громкости имеет уровень интенсивности всего 51 дБ.

Если для чистых тонов соотношения громкости и интенсивности определяются достаточно просто, то ощущение громкости сложных звуков зависит и от их спектрального состава, т.е. частот и относительной интенсивности составляющих спектра (см.: Римский-Корсаков, 1973; Цвикер, Фельдкелер, 1976).

В практике удобно пользоваться шкалой уровня громкости. Единицей уровня громкости является фон. Уровень громкости данного звука численно равен уровню интенсивности чистого тона частотой 1000 Гц, громкость которого на слух равна громкости данного звука. Отсюда следует, что для чистого тона частотой 1000 Гц уровень громкости в фонах численно равен уровню интенсивности в децибеллах (дБ).

Музыканты в исполнительской практике руководствуются следующими градациями громкости:

- ppp* — пиано-пианиссимо (чрезвычайно тихо);
- pp* — пианиссимо (очень тихо);
- p* — пиано (тихо);
- mp* — меццо-пиано (умеренно тихо);
- mf* — меццо-форте (умеренно громко);
- f* — форте (громко);
- ff* — фортиссимо (очень громко);
- fff* — форте-фортиссимо (чрезвычайно громко).

По мнению большинства музыкантов, каждая ступень соответствует изменению уровня громкости на 9–12 фон — в зависимости от индивидуальности музыканта и акустических условий.

Кроме зависимости громкости от частоты, упомянутой выше, существует также явление маскировки обими звуками другия, что затрудняет оценку их громкости. Сложным образом влияет на громкость звука его длительность (при коротких звуках), адаптация слуха (при больших длительностях звука) и переходные процессы (см.: Римский-Корсаков, 1973; Цвикер, Фельдкелер, 1976).

Высота звука — субъективная мера его частоты. Чем больше частота звука, тем он выше. Слух человека максимально чувствителен к изменениям частоты в диапазоне 500–4000 Гц; здесь дифференциальный порог ощущения высоты (т.е. едва различимое слухом изменение частоты) составлет всего 0,2%. На более высоких и более низких

частотах, а также при малых интенсивностях звука дифференциальные пороги возрастают (см.: Цвиккер, Фельдкелер, 1976).

Высота звука связана с его частотой в основном логарифмическим законом; это означает, что разность высот (интервал) двух чистых тонов определяется отношением их частот. Единица высоты — октава — соответствует интервалу между звуками, частоты которых различаются вдвое.

Равномерно темперированный строй, принятый в современной музыкальной практике, предусматривает деление октавы на 12 полутонов. Изменение высоты звука на один полутоном соответствует изменению его частоты в $\sqrt[12]{2} \approx 1,05946$ раза. В качестве самой малой единицы изменения высоты применяется сотая доля полутона — цент, соответствующий отношению частот $2^{1/200} \approx 1,00057779$.

Приведем решение некоторых простых метрологических задач, которые из-за отсутствия в литературе доступных методик довольно часто вызывает затруднения практиков при измерении точности строя.

Задача 1. Определить интервал в полутонах или центах между двумя звуками, имеющими частоты f_1 и f_2 ($f_2 > f_1$).

Решение:

$$N \text{ (полутонов)} = 12 \log_2 \frac{f_2}{f_1};$$

$$n \text{ (центов)} = 1200 \log_2 \frac{f_2}{f_1}.$$

Задача 2. Интервал между двумя звуками выражен в полутонах или в центах. Определить отношение частот этих звуков.

Решение:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{N \text{ (полутонов)}}{12}} = 2^{\frac{n \text{ (центов)}}{1200}}$$

или

$$\frac{f_2}{f_1} = 1,0005946^N = 1,00057779^n.$$

Задача 3. Определить приблизительно, сколько герц соответствует интервалу в 1 цент в области частоты f .

Решение:

$$\Delta f \text{ (Гц)} = f \left(\frac{2^{1/200} \sqrt{f} - 1}{2^{1/200} \sqrt{f}} \right) = f \left(\frac{2^{1/200} \sqrt{f} - 1}{2^{1/200} \sqrt{f}} \right) = 0,00057779 f.$$

Задача 4. Определить приблизительно, сколько центов соответствует разнице в 1 Гц в области частоты f .

Решение:

$$n \text{ (центов)} = 600 \log_2 \frac{f+1}{f-1}.$$

Задача 5. Определить частоту f звука, которая отличается от n центов выше (ниже) звука частоты f_0 .

Решение:

$$\text{выше } f = f_0 \cdot 2^{n/1200} = 1,00057779^n f_0;$$

$$\text{ниже } f = f_0 \cdot 2^{-n/1200} = f_0 / 1,00057779^n.$$

Все сказанное выше относится к гармонической высоте, т.е. к ощущению интервалов при одновременном воспроизведении звуков. При последовательном восприятии звуков ощущение, связанное с их частотой, изменяется; в этом случае говорят о мелодической высоте (см.: Римский-Корсаков, 1973). Мелодические октавы совпадают с гармоническими при частотах приблизительно до 500 Гц; в более высоких регистрах октавы начинают расширяться — отношение частот составляющих их звуков становится больше двух; соответственно расширяются и другие интервалы.

Известны и иные отклонения от логарифмической связи между высотой и частотой. Так, при небольших интенсивностях звука его высота меньше расчетной (см.: Цвиккер, Фельдкелер, 1976). Высота очень коротких звуков зависит от их длительности.

Спектральный состав звука влияет на восприятие высоты. Известно, что высота сложного музыкального звука определяется обычно частотой его основного тона. Однако если в богатом обертоном музыкальном звуке отсутствует основной тон, высота его не изменяется (см.: Тейлор, 1976). Это происходит благодаря нелинейным свойствам слуха, способствующим ощущению разностных тонов, в частности тонов, имеющих частоту, равную разности частот соседних обертонов; эта разница равна (или приблизительно равна) частоте основного тона. Такое сложное восприятие высоты характеризует, например, басовые звуки фортепиано, спектр которых не содержит слышимого основного тона, а иногда и одного или двух наиболее низких обертонов.

Негармоничность обертонов фортепианной струны, вызванная жесткостью этой струны, заставляет нас также отходить от "классического" восприятия высоты и производить настройку фортепиано по кривой Рейлсбека (см.: Mc Ferrin, 1976).

Таким образом, даже относительно сложная для понимания высота звука оказывается в ряде случаев зависимой от многих его объективных параметров.

Тембр звука — основная характеристика его качества. Звуки одной и той же высоты, излученные на разных музыкальных инструментах с одинаковой громкостью, различаются по тембру. По тембру мы отличаем звуки скрипки от звуков аккордеона, звук хорошего пианино от звука плохого. По аналогии с высотой и громкостью тембр обычно трактуется как субъективная характеристика качества зву-

в основном зависящая от его спектра (см.: ФЭС, 1966), после чего делается замечание, что на тембр звука влияют переходные процессы (атаки и затухания, другие проявления нестационарности).

Исследования последних десятилетий (см., например: Яковлев, 1968; De Luca, 1972; Luce, Clark, 1965; Righini, 1965; Weyer, 1978) показали, что влияние переходных процессов на тембр звука настолько значительно, что приведенное выше определение тембра нельзя считать полным, особенно если речь идет о нестационарных звуках, примером которых может служить звук фортепиано.

Поэтому тембром звука мы будем называть тот атрибут слухового восприятия, в терминах которого можно судить о различиях двух равногромких, равновысотных, равнопродолжительных одноканальных образов представленных звуков.

Поскольку высота и громкость звука сравнительно легко оцениваемы, к тембру следует относить все, не касающееся высоты, продолжительности и громкости. Это, пожалуй, наиболее неопределенно, но одновременно наиболее полное представление о тембре. Это означает, например, что бесконечный синусоидальный тон не обладает тембральными признаками, так как равногромкие и равновысотные синусоидальные тоны ничем друг от друга не отличаются.

Восприятие тембра более сложных звуков, как показал А.А. Володин (1972), неразрывно связано с высотным восприятием. Важнейшим связывающим их признаком звука является интонационная ясность.

Интонационная ясность, т.е. степень высотной определенности — субъективное свойство звука. Высота звука может быть однозначно определена даже при заметных отклонениях от периодичности, гармоничности, в условиях маскировки шумовым призвуком и т.д. Среди звуков фортепиано наибольшей интонационной ясностью обладает звук среднего регистра, к крайним регистрам высотная определенность звуков снижается; в крайних басах (из-за высокой негармоничности многочисленных обертонов) и в крайних дискантах (из-за маскировки шумовым призвуком) она настолько уменьшается, что может затруднить настройку фортепиано.

Степень интонационной ясности, таким образом, может быть различной при одинаковой высоте звука, поэтому она является одним из признаков тембра. В этом диалектически проявляется тембровое единство восприятия сложных музыкальных звуков. В музыкальном звуке почти всегда характерность достигается ценой понижения интонационного его содержания (см.: Володин, 1972). Тем не менее чрезмерное снижение интонационной ясности может стать дефектом тембра. Например, "металлическое" звучание басов или "стеклянный" дискантовый звук (см. главу VI) есть следствие снижения интонационной ясности звуков.

Изучение качества музыкальных звуков основывается на наглядном соответствии между объективными физическими свойствами звука и субъективными словесными определениями. Над этим работали многие психофизики и акустики, изучавшие физическую сущность таких словесных определений, как "яркость", "полнота", "широковатость", "плотность" тембра и т.д. Если для измерения высоты или громкости звука достаточно одной шкалы, то у тембра может быть несколько независимых качественных определений, например, он может быть ярким и полным, либо ярким и холодным, т.е. изменяться независимо в шкалах яркости, полноты и др.

Выражаясь языком психофизики, тембр описывается в многомерном пространстве определенно. Сколько независимых измерений в этом пространстве? Если собрать все шкалы словесных определений, предложенные и исследованные различными авторами (см. Галунов, 1970; РО, 1970), то их будет более 70. Какие из них "независимы" и какие являются "несамостоятельными", производными от "независимых", — на этот вопрос пока нет универсального ответа; да и вряд ли такой ответ может существовать.

А.В. Румоский-Корсаков отметил несовершенство словесных определений, используемых музыкантами для описания тембров. Если слушателю недостаточно чисто звуковых определений (например, "звонкий"), то он "восполняет" этот пробел определениями, взятыми из области ощущений других модальностей — зрительных, тактильных и т.д. (например, "яркий", "блестящий", "широковатый" и т.д.). Понимание этих определений неоднозначно у различных слушателей, поэтому, несмотря на большое количество исследований (см.: Володин, 1972; Румоский-Корсаков, Длиннов, 1962; Berger, 1964; Grey, 1977; Kuriyagawa, Yahiro, Kashiwano, 1978; Plomb, 1976; Pollard, Jansson, 1962; Saidanha, Corso, 1964; Wedin, Good, 1972), описание многообразия тембров сложных музыкальных звуков в шкалах словесных определений до сих пор не является ни исчерпывающим, ни достаточно достоверным. Некоторое исключение составляют, пожалуй, синтетизированные звуки, тембр которых определяется конечным числом объективных параметров.

В настоящее время на основании вышеуказанных источников можно считать установленным, что:

звук, лишенный обертонов, звучит неокрашенно, глухо, пусто; в нижнем регистре это особенно заметно;

звук, у которого сильно выражены несколько первых обертонов, характеризуется как сочный, полный;

звук, у которого сильно выражены высокие обертоны, попадающие в область частот 3000—6000 Гц, расценивается в зависимости от силы этих обертонов как пронзительный, резкий, яркий; наоборот, при недостатке этих составляющих он может быть оценен как тусклый.

По Волдину (1972), протяженность спектра определяет "цветность" признака тембра ("густотность", "яркость", "прозрачность"), а направленность спектра — степень интонационной ясности звука. При практическом использовании подобных выводов следует ясно представлять себе, что они не универсальны. Во-первых, они касаются определенного набора звуковых источников (отдельных видов музыкальных инструментов), с которыми экспериментировали авторы и не могут безоговорочно применяться для других звуков. Во-вторых, они неполны, так как касаются лишь влияния максимального спектра на тембр, влияния, которое считалось до последнего времени основополагающим.

Но если с этим согласиться, то почему мы выделяем голос в хоре или инструменты в оркестре, когда резонно было бы слышать один сигнал с более богатым спектром? Эксперименты, проведенные различными авторами, достоверно доказали, что звуки, имеющие одинаковый максимальный спектр, но различную временную динамику, легко различаются слухом. Отсюда вытекает, что описание звука реального музыкального инструмента на основе только изучения спектральных линий несет очень мало информации и недостаточно для распознавания музыкальных инструментов (см.: Berger, 1964; Sakdinha, Corso, 1964).

И хотя до сих пор в технической акустике иногда утверждается, что тембр зависит только от порядка и интенсивности гармоник, совершенно ясно, что спектр "нижнего" музыкального звука является лишь элементом тембра, изменяющимся во времени (как только звук достигает установившегося режима, он терлет окраску, — см.: Winckel, 1960).

Звук фортепиано и других музыкальных инструментов обнаруживает весьма сложные формы нарастания и спада интенсивности; выбирая из огромного множества объективных параметров звука те, которые существенны в решении конкретной задачи, спешей перед исследователем, чтобы принимать решения так или иных типичных изменений объективных параметров звука, детализировать слуховые впечатления о звуке, а иногда и уметь определять технические (конструктивные и технологические) источники некоторых специфических особенностей звука, необходимо знать те факторы, которые могут оказывать закономерное и направленное влияние на звук.

ФОРМАНТЫ

Известно, что частотный состав звука после усиления средствами электроники видоизменяется, звук меняет свою окраску в зависимости от параметров усилителя, в частности — от его амплитудно-

частотной характеристики. Если эта характеристика такова, что в некоторой полосе частот усиление больше, чем в остальных, то относительная интенсивность спектральных компонентов, попадающих в эту полосу частот, окажется выше, и таким образом спектр звука изменится. Расположение полосы частот с увеличенным усилением при этом никоим образом не зависит от частоты звука, подаваемого на вход усилителя: в любом звуке после усиления при обозначаются высокие обертоны, с повышением звука максимум усиления будет перемещаться к основному тону. Такое воздействие на звук характерным образом меняет частотный баланс спектра.

Таким же образом дека фортепиано, воспринимающая колебания струн, видоизменяет формы этих колебаний в соответствии со своей частотной характеристикой. И хотя в теоретических работах считают идеальной дека, которая обладает равномерной частотной характеристикой, на самом деле характеристика дека имеет множество неравномерностей, способствующих концентрации звуковой энергии в отдельных частотных областях, называемых формантами. Как и большинство отклонений от теоретического идеала, форманты в хорошем музыкальном инструменте украшают звук и воспринимаются как индивидуальные признаки инструмента. Поскольку основное действие формант заключается в том, что они характерным, но неодинаковым образом влияют на тембр звуков различной высоты, это влияние проявляется в большей степени и легче обнаруживается слухом не в отдельных звуках, а в мелодическом и гармоническом движении. Именно поэтому музыканты охотнее оценивают общий характер звучания музыкального инструмента по мелодическим и аккордовым последовательностям, а не по отдельным звукам. Это следует иметь в виду при составлении методик экспериментов качества музыкальных инструментов.

На определении формантных особенностей базируются приемы "простукивания" дека и корпусов музыкальных инструментов для оценки их качества (см.: Гринев, 1973; ИЖР, 1973). Настройка дека (см. главу VI) есть также способ регулирования ее формантной характеристики.

Из этого следует, что изучение формант при анализе звуков музыкальных инструментов имеет большое значение для определения объективных критериев качества звучания.

Форманты, характеризующие частотные области концентрации звуковой энергии, являются основным индивидуальным признаком тембральной идентичности каждого музыкального инструмента.

Первоначальный процесс (атака, затухание) тона изменяется под воздействием форманты; она представляет собой разновидность "спектрального мерцания", изменяющего каждую форму волны, производимую основным вибратором инструмента.

Представим себе, что мы возбуждали импульсы колебательную систему, форманта которой представлена единственной резонансной частотой; на выходе системы при этом появятся бесконечные по времени синусоидальные колебания, это легко доказать теоретически. На практике любой форманта имеет конечную ширину, в нашем случае это приводит к уменьшению длительности результирующего синусоидального колебания, т.е. музыкальному тону более короткой продолжительности. Например, если ударить карандашом по щеке или по зубам, то, изменяя объем резонаторов носа и рта, можно получить довольно определенные по высоте звуки, а при достаточном навыке — даже исполнить мелодию.

Форманты могут быть одиночными или множественными. А.А. Володин (1972, с. 22) придавал особое значение когерентным формантам, т.е. таким формантам, частоты которых образуют кратный ряд аналогично гармоническому ряду: "Подобно тому, как восприятие аккорда из сложных звуков при кажущейся однородности объективной спектральной структуры приводит к более явному восприятию высотных компонентов, чем при восприятии аккорда простых тонов, "аккорд" формантных ассоциаций в восприятии представляется более ясным и образным, чем "аккорд" одиночных формант". Володиным показано, что когерентные форманты увеличивают музыкальную выразительность звука, обогащают его интонационное содержание, способствуют ослаблению шумовых признаков.

Основные формантные области музыкальных инструментов объективно определяются различными способами.

При "простукивании" деки, т.е. возбуждении ее широкополосным импульсом, максимумы огибающей спектра звукового отклика деки соответствуют формантным областям ее частотной характеристики.

Выявить форманты фортепиано можно также непосредственной регистрацией частотных характеристик дек (см.: Рамский-Корсаков, Дьяконов, 1952).

Перспективным методом выявления формант представляется метод накопленных спектров. Он основан на том, что частоты формант не зависят от высоты издаваемого звука. Поэтому, если с одинаковой силой возбуждать все звуки инструмента и записывать накопленный спектр всей полученной последовательности звуков, то области основных формант будут выделены на огибающей такого накопленного спектра, причем этот результат будет соответствовать реальным условиям звукоизвлечения на инструменте (см.: Jansson, Sundberg, 1975).

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Широко известно явление адаптации — приспособления, привыкания, свойственного не только слуху, но и другим органам чувств. Адапта-

ция проявляется в уменьшении чувствительности к стационарному стимулу большой интенсивности.

Звук называется стационарным, если его параметры не изменяются во времени. Стационарный звук, если он имеет достаточную длительность, звучит и невыразителен, про него говорят, что он не обладает "живостью". В музыке стационарные звуки могут создаваться лишь искусственно, как правило, электронным синтезом.

Звуки традиционных музыкальных инструментов — "живые" звуки, они радуют наш слух благодаря своей изменчивости. Едва развиемся, такой звук начинает изменять все свои параметры, и не бывает естественного звука, который бы возник с уже сформированной частотой, интенсивностью, спектром. Звук фортепиано — ярчайший тому пример.

Изменение параметров звука — переходные процессы — могут иметь разный характер. Это и начальное формирование, нарастающей амплитуды звука, и затухание, и флуктуация отдельных параметров звука в процессе его развития.

Существование явления адаптации доказывает: слух к переходным процессам более чувствителен, чем к стационарным. Переходные процессы влияют на восприятие звука в большей степени; если (как в фортепианном звуке) переходные процессы очень резки, то это влияние становится определяющим.

Импорирование переходных процессов при исследовании музыкальных звуков, нарушенное практически лишь в последние 15—20 лет, можно объяснить в основном низким уровнем акустической аппаратуры, не позволившей ранее проводить достаточно точный анализ переходных процессов.

Переходные процессы в звуках фортепиано включают в себя атаку и затухание (звук фортепиано, как и любой звук ударного происхождения, вообще не содержит стационарных процессов). Сложность явления такого звука связана с тем, что каждая компонента его спектра возникает, растет и затухает индивидуально, претерпевая в процессе затухания множественные флуктуации. Совокупность и одновременно всех этих явлений дает акустический эффект, проявляющийся в усилении в разные моменты различных обертонов. Эти флуктуации трудноуловимы на слух, но специально натренированный слух может им ощутить. Вот пример, который можно продемонстрировать при помощи ролея.

На трогае педали, извлекая с достаточной силой звук сальтовой октавы (98 Гц) и удерживая клавишу в нажатом положении. Через некоторое время в звуке начнет выделяться по громкости четвертый обертоны (490 Гц, приблизительно соответствует си первой октавы), который чередуется со вторым (294 Гц — ре первой октавы) и пятым (588 Гц — ре второй октавы) обертонами.

Определяющая роль переходных процессов в формировании тембра подтверждается современной практикой разработки электромузыкальных инструментов, имитирующих традиционные: в группу инструментов, требующих особо тщательной имитации переходных процессов, входит электроняно.

Атака звука, если она не приводит к полному установлению его параметров, есть понятие достаточно условное. Субъективно атака звука заканчивается тогда, когда слушатель получает достаточную информацию, чтобы оценить громкость, высоту и тембр звука. Объективно длительность атаки сложного звука может, исходя из целей исследования, определяться временем достижения звуком максимальной интенсивности, временем формирования основной частоты, временем полного формирования максимального спектра звука. Какими физическими процессами обусловлена атака звука музыкального инструмента?

При звуковозвращении на музыкальном инструменте необходимо некоторое время, чтобы преодолеть инерцию звукового источника и привести излучатель из состояния покоя в нормальный режим колебаний. В течение этого времени, которое очень мало (особенно для тональных звуков ударного происхождения), уничтожаются случайные компоненты, а звук становится более гармоничным, музыкальным. Каждая компонента звука имеет в атаке свою особую динамику, зависящую от механических свойств звукового источника.

Насколько в акустике читатель может понять, что такое атака звука и почему она так важна, из аналогии музыки с речью: насколько хорошо слышны согласные, предшествующие гласному звуку, а ведь эти согласные представляют собой не что иное, как развитие атаки последующей гласной.

Если рассмотреть формирование атаки звука в группе инструментов ударного возбуждения, например в духовых или смычковых, то обнаружится, что здесь атака звука в большей степени зависит от исполнителя, более того, исполнитель управляет источником звука пока звук существует.

В группе инструментов ударного возбуждения исполнитель меньше влияет на звучание — он только дает звуку первый толчок. Планшет, свободно управляя громкостью, весьма ограничен в средствах управления тембром каждого звука (см. главу VII). Поэтому, если в инструментах первой группы атака звука несет информацию не только об инструменте, но и исполнителе, то в инструментах группы ударного возбуждения основные признаки каждого звука диктуются только особенностями инструмента. Это делает атаку звука важнейшим предметом исследования при изучении качества звучания фортепиано.

Известно, что при изменении фазовых соотношений между компонентами спектра может измениться форма результирующего коле-

бания, однако традиционно считалось, что слух нечувствителен к этим изменениям. В настоящее время классическая теория "фазовой глухоты" опровергнута многими исследованиями, экспериментально доказавшими, что слух чувствителен не только к спектру, но и к форме звуковых колебаний, а следовательно, и к фазовым изменениям в спектре звука (см.: Соловьева, 1972).

В 1968 г. М. Шредер проделал интересный эксперимент. Он синтезировал 31 компонентный звук, в котором все компоненты имели одинаковую фазу, и сконструировал устройство, позволяющее быстро изменять фазу любой компоненты на противоположную. Оказалось, что, последовательно изменяя таким образом фазы разных компонент звука без изменения его амплитудного спектра, можно сыграть вполне ощутимую слухом мелодию (см.: Шредер, 1975). На восприимчивости слуха к фазовым изменениям базируется устройство фазовых эффектов в ЭМИ. Сейчас уже не вызывает сомнений, что переходные процессы, связанные с изменением фазовых соотношений в сложных звуках, могут влиять на тембр.

Длительность затухания звука фортепиано составляет подавляющую часть его общей длительности. В музыке редко используется полная длительность фортепианных звуков, почти всегда звуки фортепиано прерываются демпфированием струны. При этом звук не прекращается мгновенно, так как и струна, и в особенности дека достаточно инерционны. Если свободное затухание звука фортепиано просто является слухом, то затухание в результате демпфирования является быстрым переходным процессом, а потому ощущается слухом как призыв: более или менее громкий в зависимости от качества демпфирования. В музыкальных пассажах призыв демпфирования не слышен, он маскируется резкой атакой последующего звука. Совместное звучание демпфированного затухания одного звука и атаки другого аннулирует эту атаку, что сказывается на восприятии тембра. Поэтому качество демпфера и его регулировки имеет большое значение для обеспечения качества звука фортепиано, причем не только тем, которым соответствуют демпферы.

При изучении затухания звука фортепиано большое внимание приходится уделять различиям в затухании составляющих спектра. Высокие обертоны затухают много быстрее, чем основной тон и ближайшие к нему обертоны. Очень быстро затухает слуховой призыв. Такая динамика затухания способствует впечатлению "ударного" характера звука фортепиано.

Следует отметить, что затухание в большей степени, нежели атака звука, подвержено преобразующему влиянию акустических особенностей помещения, в котором звучит фортепиано. Поэтому объективное измерение параметров затухания следует производить в помещениях со стандартными акустическими условиями.

Быстрые переходные процессы на прослеживаются слухом как временный процесс, а воспринимаются как специфический признак тембра. Однако иногда удается "услышать" переходный процесс, если его замедлить, например записать на магнитную ленту, а затем воспроизвести на замедленной скорости движения ленты.

НЕГАРМОНИЧНОСТЬ

Обычно в учебниках, посвященных простым колебательным системам, говорится, что обертоны струны теоретически должны быть гармониками основного тона. Однако практически редко выполняются необходимые для этого условия. Струна не является идеально гибкой, не бывает абсолютно жестко закрепленной на концах, ее опоры всегда в какой-то степени подвижны. Это делает обертоны негармоничными.

Негармоничность обертонов фортепианных струн довольно полно изучена. В небольших пределах эта негармоничность придает тембру фортепиано необходимую характерность и "живость" (см.: Уоллс, 1962). Однако чрезмерная негармоничность может испортить тембр, особенно в басовом регистре, в звук которого появляется "металл", неприятный эвон.

Полагают, что негармоничность обертонов можно уменьшить применением маленьких грузиков на нерабочей части струны (см.: Миллер, 1949). Негармоничность струн можно управлять также путем изменения податливости штыря (см.: Экхей, 1969). Более подробно о негармоничности обертонов фортепианных звуков будет рассказано в главе V.

КОМБИНАЦИОННЫЕ ТОНЫ, БИЕНИЯ

Слуховая система человека нелинейна. Это означает, что она может создавать на выходе частоты, отсутствующие на ее входе. Даже при прослушивании достаточно интенсивного чистого тона слухом ощущается наличие его гармоник, их называют субъективными, так как объективно они отсутствуют. Если же слушать одновременно два тона, имеющие частоты f_1 и f_2 , то количество возникающих субъективных тонов увеличивается за счет разностных и суммарных тонов с частотами $(f_1 - f_2)$, $f_1 + f_2$, $(2f_1 - f_2)$, $2f_1 + f_2$, $(2f_1 - 2f_2)$ и т.д. (см.: Тейлор, 1976).

Комбинационные тоны, особенно разностный, достаточно сильны; их громкость может превышать громкость исходных звуков. Так, Бекеш демонстрировал хорошо слышимый разностный тон 110 Гц между тонами 220 и 110 Гц, каждый из которых был по интенсивности на 20 дБ ниже порога слышимости (см.: Bekésy, 1933).

Комбинационные тоны играют большую роль в формировании высоты звуков множественного регистра фортепиано, объективно не содержащих слышимого основного тона; наиболее важны те комбинационные тоны, которые имеют большую амплитуду и более низкую, чем исходные тоны, частоту.

Если сблизить частоты f_1 и f_2 двух одновременно слышимых равно-прямых тонов до тех пор, пока частота разностного тона $(f_1 - f_2)$ выйдет за нижний предел звукового диапазона, разностный тон перестает быть слышимым, но возникает специфическое явление биений: мы услышим всего один тон, громкость которого периодически изменяется с частотой, равной разности частот исходных тонов. При этом частота слышимого тона оказывается средней между частотами исходных тонов.

На подходе и управлении частотой биений базируется точная подстройка музыкальных интервалов в процессе настройки фортепиано и других музыкальных инструментов.

Однако небольшое биение в звуке фортепиано, соответствующее расстройке примерно 2 цента для струн с частотой от 165 до 734 Гц, по мнению некоторых исследователей, придает тембру некоторую живость и считается приятным для слуха (см.: Kirk, 1959).

Комбинационные тоны и биения могут возникать не только между объективными, но и между объективными и субъективными тонами. Сложный спектральный состав фортепианных звуков и созвучий дает основание полагать, что в них всегда присутствует множество биений и комбинационных тонов. При изучении восприятия звуков фортепиано следует учитывать вклад субъективных тонов в тембр этих звуков.

Физиологический механизм возникновения комбинационных тонов до сих пор не выяснен полностью. Нелинейные свойства слуха пока не поддаются количественному описанию. Однако явление, связанное с этой нелинейностью, имеет большое значение: их понимание дает возможность хотя бы в качественном аспекте объяснить восприятие человеком музыкальных звуков.

СУБСЕНСОРНЫЕ ЗВУКИ

При анализе восприятия звука мы обычно учитываем только те звуки, которые по частоте и интенсивности находятся в пределах осознано слышимых (рис. 10). Однако вместе с такими звуками многие источники создают еще и звуки, которые сознание не регистрирует как слышимые — это звуки инфра- и ультразвукового диапазона, а также осязаемые звуки, находящиеся за порогом ощущения. Такие звуки условно называются субсенсорными.



Рис. 10. Область слышимых звуков

Ультра- и инфразвуки мы не слышим. Это доказано прямыми измерениями. В то же время мы бессознательно реагируем на них. Гениальный физик-экспериментатор (и знаменитый проказник) Роберт Вуд однажды помог создать тревожное настроение в театральном зале, включив генератор инфразвука частотой 13 Гц в разряд спектакля. Эффект превзошел все ожидания: актеры не могли играть, зрители в безотчетной тревоге покидали зал, а некоторыми слушателя испарика. Предполагают, что инфразвуковая чувствительность лежит в основе предсказания штормов некоторыми приобретенными интеллами.

Воздействие ультразвука на человека может вызвать повышение остроты зрения и другие изменения в организме; даже правила техники безопасности для работающих со сильными ультразвуками учитывают это.

Выбраши, вероятно, также воспринимаются здоровыми людьми во многих случаях неосознанно, мы убеждаемся в этом на примере глухонемых, для которых вибрация становится осознанным источником информации: сидя за столом, они реагируют на звонки стоящего на столе телефона, улавливая по шагам приближающегося знакомого (см.: Соловьева, 1972).

Для нас особенно важно, что область воспринимаемых человеком звуков существенно расширяется именно при переходных процессах (см.: Ритович, 1958). Любые изменения в звуке концентрируют наше внимание — активность мозга проявляется в следовании изменениям внешней среды. Звук фортепиано содержит субсонорные компоненты — ультразвуковой отклик металлической рамы является элементом втаки дискантовых звуков. Акустические условия в помещении, где проводится испытание инструмента, также включают в себя субсонорные поля. Комбинационные тоны субсонорных составляющих могут быть слышимыми.

Физиолог Г.В. Гершуни во время психогического сна испытуемого несколько раз включал перед приказом о пробуждении субсонорный звук. И вот результаты: испытуемый стал просыпаться от этого звука без приказа — возник условный рефлекс на субсонорный звук (см.: Гершуни, 1964). Подобные рефлексы на субсонорные звуки вырабатывались и у бодрствующих людей. Субсонорные звуки регистрируются подсознанием; человек не может проанализировать или описать их.

Таким образом, субсонорные звуки и вибрации могут безотчетно для слушателя изменять его мнение о характере звучания инструмента; такую возможность надо принимать во внимание.

Глава II. АППАРАТУРА ДЛЯ АНАЛИЗА ЗВУКА

Специализированные приборы для изучения музыкальных звуков промышленностью не выпускаются. Исключение составляют, пожалуй, приборы для контроля настройки (тюнеры). Поэтому анализ музыкальных звуков производится, как правило, с помощью акустических приборов общего назначения.

Эти приборы значительно отличаются друг от друга техническими характеристиками, степенью приспособленности к анализу именно музыкальных звуков. От умения выбрать измерительную аппаратуру зависит оперативность и точность измерений, уровень экспериментальных задач, доступных решению.

Техника акустических измерений в последние десятилетия обогатилась совершенными приборами, раскрывшими перед исследователями арсенал принципиально новых возможностей анализа сложных звуков. Углубленный спектральный анализ в реальном времени, регистрация переходных процессов, разделение звука на отдельные временные участки (сегментирование), цифровой запись и преобразование звука, обработка звуковой информации на специализированных ЭВМ — вот лишь краткий перечень средств, с которыми еще недавно акустики-экспериментаторы могли только мечтать и без которых сейчас трудно представить себе исследование звуков фортепиано.

Большой опыт в использовании современных приборов для изучения музыкальных звуков имеют акустические лаборатории ЛПО по изготовлению музыкальных инструментов и отраслевого института музыкально-промышленности НИКТИМП (отделок Правдинский, Московская обл.). Этот опыт позволил дать ряд рекомендаций по применению акустических приборов в музыкальной промышленности (см.: Порвенок, 1973, 1980). В этой главе особое внимание уделено некоторым акустическим приборам, хорошо зарекомендовавшим себя в отечественной практике изучения звуков фортепиано.

В СССР для измерений параметров звука, вибраций и механического движения особенно широко применяется аппаратура всемирно известной датской фирмы "Броль и Кьер".

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Современные акустические исследования звуковых колебаний нечлениются с преобразования этих колебаний в электрический сигнал. Для этой цели применяются акустические преобразователи. В практи-

Тип акселерометра	Чувствительность по направлению, мВ/м·с ⁻²	Частотный диапазон, Гц	Масса, г	Рекомендуемое применение
4369	≈ 1,5	0,2—10800	14	Измерение параметров колебаний дат, корпусов
8309	≈ 0,03	1—60 000	3	Измерение параметров колебаний металлических деталей, измерение механических ударов
4375	≈ 0,45	1—20 000	2	Измерение параметров движения клавиш
4374	≈ 0,2	1—25 000	0,85	Измерение параметров движения деталей клавишного механизма
4370	≈ 10	0,2—6 000	40	Измерение параметров колебаний с малыми амплитудами

де звучения звуков фортепиано в специализированных лабораториях используются, как правило, измерительные конденсаторные микрофоны (датчики звукового давления) и пьезокерамические акселерометры (датчики ускорения) фирмы "Брюль и Кьеп", отличающиеся широким частотным и динамическим диапазоном, стабильностью, высокой чувствительностью.

Мы приведем основные параметры микрофонов этой фирмы и рекомендуемых типов предусилителей к ним. Из приведенных данных видно, что совместное применение этих приборов позволяет проводить анализ колебаний не только в диапазоне слышимых звуков, но и в соседних с ним ультразвуковом и инфразвуковом диапазонах:

Тип микрофона	Рекомендуемый тип предусилителя	Динамический диапазон, дБ	Частотный диапазон, Гц
4134	2619	20—160	1,8—20 000
4136	2618	48—182	3,5—70 000
4147	2631	64—150	0,01—18 000
4166	2639	15—146	2,6—10 000
4138	2633	58—168	66—140 000

Пьезокерамические акселерометры той же фирмы применяются для преобразования в электрический сигнал вибрирующий дат, корпусов, а также параметров движения различных узлов фортепиано.

При выборе типа акселерометра необходимо учитывать следующие: частотный диапазон акселерометра должен перекрывать диапазон частот анализируемых колебаний;

чувствительность акселерометра должна быть достаточной для выявления колебаний необходимого минимального уровня интенсивности;

масса акселерометра должна быть значительно меньшей, чем масса детали, динамикой которой анализируется, только в этом случае прикрепление акселерометра к анализируемой детали не изменит параметров ее движения.

Технические данные некоторых акселерометров фирмы "Брюль и Кьеп", рекомендуемых для преобразования в электрический сигнал параметров движения узлов и деталей фортепиано приведены в табл. 1.

Акселерометры генерируют электрический сигнал, пропорциональный колебательному ускорению. Для измерений скорости или перемещения движущихся деталей акселерометр используется со специальными усилителями, содержащими интеграторы, например усилителем преобразования сигнала типа 2635.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для изучения быстрых изменений электрических величин служат электронно-лучевые осциллографы. Эти приборы в большом ассортименте выпускаются отечественной промышленностью.

Выбор типа осциллографа диктуется следующими условиями: диапазон частот осциллографа должен перекрывать диапазон частот исследуемых звуков;

осциллограф должен иметь как постоянную, так и ждущую развертку;

осциллограф должен обеспечивать полное изображение на экране сигналов длительностью от долей микросекунды до нескольких секунд.

Технические данные об осциллографах широко известны из регулярно выпускаемых каталогов и справочников. Для исследований звуков фортепиано применимы, к примеру, универсальные осциллографы типа С1-98 или С1-117.

Рассмотрение отдельных фрагментов осциллограммы удобно производить на осциллографах, в которых предусмотрено возможность задержки начала развертки относительно запускающего импульса (например, С1-82). Для сравнительного анализа двух и более одновременных процессов (например, силы воздействия на клавишу и звуковая отклик клавишного механизма), нужны многолучевые осциллографы типов С1-55, С1-74 (двухлучевые), С1-92 (двухлучевый с возможностью задержки развертки), С1-91/5 (двухканальный с возможностью задержки развертки и предционного измерения временных параметров

ываюлов), С1-91/1 (для одновременного исследования четырех сигналов с возможностью задержки развертки).

Для анализа изображения, полученного на экране осциллографа, иногда необходимо сохранить, зафиксировать это изображение. Простейшим решением этой проблемы является применение "заполняющих" осциллографов, например С8-13 (однолучевой), С8-17 (двухлучевой).

Большая возможность оперативных исследований с быстрой обработкой результатов измерений, дает применение осциллографов, работающих в режиме диалога с ЭВМ (например, осциллограф С9-9, С9-10).

Чтобы зафиксировать подробное изображение длительного колебательного процесса, иногда применяются фоторегистраторы (например, типа РФК-5).

Уникальный специализированный прибор "Таврос" уменьшителя" типа 5623 фирмы "Броль и Кьер" незаменим при изучении композиции спектра звука, так как позволяет выделить из звука для последующего анализа отдельные временные фрагменты необходимой длительности.

Для изучения медленно текущих процессов, например формирования временной огибающей уровня текущего сигнала в процессе его затухания, применяются шлейфные осциллографы и самописцы. Их преимущество заключается в том, что они производят автоматическую регистрацию изменения последующей величины, поэтому не нуждаются в дополнительной регистрирующей аппаратуре. Эти приборы выпускаются отечественной промышленностью, а также в странах-членах СЭВ.

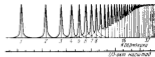
ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Принцип анализа звукового спектра заключается в разделении частотного диапазона на отдельные полосы частот и определении уровня интенсивности звука в каждой из этих полос. Спектральные анализаторы, применяемые в современной акустике, подразделяются на две группы, принципиальное различие которых лежит в способе деления частотного диапазона на полосы анализа, другими словами, в масштабе частотной шкалы анализатора. Этот масштаб может быть логарифмическим. В этом случае ширина полосы анализа пропорциональна ее средней частоте и измеряется в процентах от значения средней частоты.

Стандартные анализаторы этой группы имеют обычно шкалы частот, выраженные в долях октавы; например, октавный, $1/3$ -октавный, $1/12$ -октавный анализатор.

Вторая группа анализаторов основана на линейном масштабе частоты. В этих приборах ширина отдельной полосы анализа, измерен-

Рис. 11. К нелинейному $1/3$ -октавному анализу музыкальных звуков



ная в герцах, имеет постоянное для всего частотного диапазона значение.

Анализ спектра шума в логарифмическом масштабе частот удобен и соответствует действующим стандартам. Однако для музыкальных звуков такой анализ малоинформативен. Если звуки фортепиано анализировать в $1/3$ -октавных полосах, то только первые обертоны попадут в разные полосы, а обертоны с номерами выше четвертого будут смешиваться, так как попадут в одну и ту же частотную полосу (рис. 11). Кроме того, этот способ не обеспечивает сколько-либо точной количественной оценки относительной интенсивности шумовых процессов, характерных для звуков музыкальных инструментов, он неприменим для объективного выделения признаков высокой определенности в звуках с ограниченной интонацией, например в отклике дек на возбуждение ударом.

Поэтому гармоничный анализ музыкальных звуков следует проводить в линейном масштабе частот, при этом полоса анализа должна быть в 5-10 раз меньше частоты основного тона, чтобы можно было рассмотреть содержание межобертоновых частотных полос и оценить шумовое заполнение спектра.

Наиболее удобны для анализа звуков фортепиано анализаторы спектра в реальном масштабе времени. Такие анализаторы позволяют на экране дисплея проследить изменение спектра во времени, проанализировать спектральную структуру переходных процессов.

Поскольку накопление спектральной информации происходит за конечный интервал времени, важной характеристикой анализатора в реальном масштабе времени является длительность этого интервала. В современных анализаторах фирмы "Броль и Кьер" (типы 2031, 2032, 2033) эта длительность равна приблизительно 200 мс. Это означает, что переходные процессы этики фортепианного звука, длящийся всего десятки или даже единицы миллисекунд, таким анализатором не прослеживаются, однако он очень удобен при анализе в реальном времени относительно медленных колебательных процессов (примерно до 2 000 Гц). Анализатор типа 3348 (той же фирмы) несколько лучше, так как производит частотный анализ в реальном масштабе времени на частотах до 10 000 Гц.

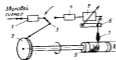


Рис. 12. Сонограф и схема его устройства: 1 — усилитель записи; 2 — магнитный барабан; 3 — переключатель; 4 — усилитель воспроизведения; 5 — переменный узкополосный фильтр; 6 — перо; 7 — электромагнитное перо; 8 — барабан с термочувствительной бумагой; 9 — сонограмма.

Анализ атаки звука фортепиано становится возможным, если применить сегментирование звука на малые временные фрагменты и производить анализ максимального спектра каждого звукового отрезка в их последовательности. В этом случае время, достаточное для анализа спектра каждого короткого фрагмента звука, получается многократным воспроизведением сигнала с помощью воспроизведения звука, записанного на кольцо магнитной ленты. Для такого измерения применим, например, комплект аппаратуры, состоящий из микрофона, "Гауссова умножителя", магнитофона и анализатора в реальном времени фирмы "Бродли и Кьер" (см.: Galemba, 1978a).

Одна из наиболее удачных разработок для осуществления спектрального анализа сложных звуков — сонограф фирмы "Кей Элементарик" (США), созданный несколько десятилетий назад и до сих пор не имеющий аналогов. Принцип работы сонографа, разработанный Р. Поттером, левн из рис. 12. Исследуемый звук записывается на магнитный барабан. Постоянно вращая магнитный барабан, пропускают воспроизводимый сигнал через узкополосный фильтр, частотная полоса которого сдвигается при каждом обороте барабана в пределах анализируемой области частот. Усиленный выходной сигнал фильтра подается на электромагнитное перо, которое оставляет след на термочувствительной бумаге, при этом интенсивность зачернения следов соответствует напряжению на выходе фильтра. Бумага намотана на барабан, вращающийся синхронно с магнитным барабаном. Сдвиг полосы пропускания фильтра происходит синхронно со сдвигом пера относительно бумаги. Таким образом с помощью сонографа (или дилемического спектрографа, как его еще называют) получается трехмерное представление спектра анализируемого сигнала. На рис. 5 изображена

сонограмма небольшого фрагмента звука соль четвертой октавы фортепиано. По оси ординат сонограммы производится отсчет частоты в линейном масштабе, по оси абсцисс — время в линейном масштабе, а контрастность почернения участков изображения соответствует спектральной плотности энергии сигнала. Из приведенной сонограммы видно, как изменяется спектральное содержание звука по мере его затухания; можно заметить также быстрое затухание высоких обертонов по сравнению с низкими, а также флуктуации интенсивности каждого обертона.

Сонограф позволяет получать также двухмерные спектры в любой момент времени (изображение текущего спектра) и отображающую изменение амплитуды сигнала во времени. Сонограф имеет основной частотный диапазон анализа до 16000 Гц, а с дополнительными устройствами — до 96000 Гц.

Из всех до сих пор придуманных способов изображений трехмерного спектра сонограмма наиболее наглядно отображает эволюцию спектра звука. Поэтому сонограф незаменим при нахождении объективных различий в сложных нестационарных звуках.

Прямое измерение частоты звука можно производить практически в любом не очень шумном помещении, а во время как измерения, связанные с интенсивностью (а это значит спектральный анализ, измерение параметров затухания и других переходных процессов), требуют специальных акустических условий. В отечественной музыкальной промышленности для этих целей имеется несколько заглушенных (их иногда называют безэховыми) камер. Если преследовать только цель сравнения нескольких инструментов или звуков одного типа (т.е. для относительных измерений), можно ограничиться требованием идентичности акустических условий; при этом предпочтено отдается установка, типичная для применения исследуемого музыкального инструмента (концертный зал, жилая комната, учебный класс).

Очень удобно применять записывающую технику в качестве промежуточного звена между музыкальным инструментом и анализирующей аппаратурой; этой цели служат специальные измерительные магнитофоны, отличающиеся от бытовых и студийных равномерностью амплитудно-частотной и других характеристик в исследуемом диапазоне частот.

Развитие компьютерной техники значительно расширяет возможности объективного анализа звуков. Наряду с упомянутыми выше приборами, работающими в режиме диалога с ЭВМ, все большее применение в мировой науке и технике находят многофункциональные измерительные комплексы, в которых функции различных приборов моделируются программными средствами. Одним из отечественных устройств такого типа является комплекс для анализа сигналов СК 4-71.

Хорошо себя зарекомендовала как за рубежом, так и в СССР одна из лучших специализированных ЭВМ для анализа электрических сигналов ИР-110 производства французской фирмы "Интерлекс". Она обладает возможностями оперативного измерения практически любого параметра сигнала, подаваемого в цифровой или аналоговой форме, запоминания и накопления данных измерения, их математической обработки, графического отображения и т.д. За подобными устройствами большое будущее, в том числе и в области решения прикладных задач музыкальной акустики.

Успех решения поисковых и прикладных задач объективного исследования звуков музыкальных инструментов в огромной степени зависит от уровня применяемой техники акустического анализа, и творческие работники производства должны хорошо ориентироваться в современной аппаратуре для акустических измерений.

Глава III. ЗВУКОБРАЗОВАНИЕ. КЛАВИШНЫЙ МЕХАНИЗМ

Особенности тембра звука любого вида музыкального инструмента определяются принципом звукообразования, оптимальностью конструкции и технологией. Фортепиано основано на ударе молоточком звука. Названием "фортепиано" характеризует одно из основных отличий этого инструмента от его предшественника — клавикорда, клавесина. Это отличие, сделавшее фортепиано "королем" музыкальных инструментов, придавшее ему необычайную универсальность, заключается в широких возможностях управления громкостью издаваемых звуков.

Звукообразование на фортепиано начинается с нажатия или удара клавиши. С помощью клавиш планшет приводит в движение сложный рычажный механизм, называемый клавишным механизмом и служащий для разгона молоточка до требуемой скорости, от которой зависит громкость издаваемого звука. Перед тем как ударить по струне, молоточек отрывается от разгоняющего его механизма и последнюю часть пути летит по инерции. Соударение его со струной происходит без воздействия пианиста, поэтому тембр звука зависит только от физико-механических параметров молоточка и возбуждаемой им системы, состоящей из струн и деки.

Под действием упругих сил, возникающих при ударе о струну, молоточек отлетает от струны, отдав ей часть своей энергии. В струне устанавливается режим собственных колебаний.

Одна из олов струны мелодикона, вторая олована с эффективным излучателем звука — декой, анизотропной неоднородной деревянной пластиной, закрепленной по контуру. Дека под воздействием струны совершает вынужденные колебания, излучая при этом звуковую энер-

гию в окружающую среду. Если клавиша остается нажатой, то по мере уменьшения энергии колебаний струны происходит затухание звука.

Если пианист освобождает клавишу, то клавишный механизм отключает на струну демпфер, и тогда медленное свободное затухание звука сменяется быстрым демпфированием.

Диапазон возможного изменения громкости звука фортепиано зависит прежде всего от динамического диапазона клавишного механизма, параметров молоточка, струны и деки.

Излученная декой энергия звуковых волн составляет лишь небольшую часть той энергии, которая затрачивается пианистом на издаваемые звуки. Увеличение потерь энергии существенно снижает акустические и игровые достоинства фортепиано, поэтому следует представлять себе основные причины, вызывающие эти потери, чтобы сознательно и направленно уменьшать их при совершенствовании пианино и роялей.

При нажатии клавиши пианист сообщает клавишному механизму определенную энергию. Передача энергии происходит импульсом, длительность и величина которого зависят от способа и силы воздействия на клавишу. При игре врасплох, например, эта сила практически постоянна, при игре legato она постепенно нарастает до максимального значения (см. Ринского-Корсаков, Джексона, 1952).

Энергия, переданная клавишному механизму, тратится на приведение в движение всех рычагов механизма, на деформацию этих рычагов и мягких противоударных прокладок, на преодоление сил трения в осях и сочленениях механизма.

Под воздействием клавишного механизма узел молоточка, рычажницы, отрывается от штиллера клавишного механизма. Кинетическая энергия молоточка, летящего к струне, пропорциональна квадрату его скорости. Поскольку в дальнейшем процессе звукообразования из всего клавишного механизма участвует только узел молоточка, коэффициент полезного действия клавишного механизма определяется как отношение кинетической энергии молоточка* к энергии, переданной клавише пианистом.

Молоточек, ударяя по олованной струне, также отдает ей только часть своей энергии. Остальная энергия тратится на деформацию молоточка, а также на отскок молоточка от струны. Таким образом, коэффициент полезного действия системы молоточек — струна можно определять как отношение колебательной энергии струны (или хор струн) к кинетической энергии молоточка до удара о струну.

*Для краткости в дальнейшем будем называть энергией молоточка энергию узла молоточка, состоящего из собственно молоточка и жестко связанного с ним рычажницы.

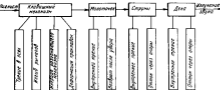


Рис. 13. Схема энергетического баланса фортепиано

При колебаниях струны полезной является та часть ее энергии, которая передается дека через шпиг, создавая в ней вынужденные колебания. Безразличные потери энергии струны в основном связаны с оттоком энергии через опоры в нерабочие части струны и с преодолением внутреннего трения в материале струны. Полезное действие струны можно определить коэффициентом, равным отношению энергии, переданной деке, к энергии, полученной струной от молоточка.

Дека тоже не излучает в воздух всю передаваемую ей энергию. Этому мешает отток энергии через края дека, которая закреплена неидеально жестко, и потери на преодоление сил внутреннего трения в материале дека. Эти потери возрастают, если дека содержит много неоднородностей, вызывающих дополнительные отражения волны. Коэффициент полезного действия дека определяется как отношение количества излучаемой ею звуковой энергии к тому количеству энергии, которое дека получает от струны.

Переменные потери энергии на всех этапах звукообразования (рис. 13) неизбежны, однако они чрезвычайно возрастают у некачественных фортепиано, обладающих неудачной конструкцией, технологическими дефектами или изготовленными недостаточно тщательно.

Коэффициент полезного действия фортепиано — отношение излученной звуковой энергии к энергии, переданной пианистом клавишному механизму, — следует стремиться сделать максимальным, а это достигается ограничением вышестеричных потерь энергии за счет правильного конструирования, оптимальной технологии и высокой культуры производства.

Протому одной из главных задач настоящей книги является описание тех принципов и приемов, благодаря которым можно обеспечить оптимальный энергетический баланс фортепиано. Когда инструмент обладает большой звуковой мощностью, другими словами, большим коэффициентом полезного действия, значительно облегчается его ин-

тонировка, достигается красное гамбра, увеличивается динамический диапазон, существенно улучшаются игровые свойства.

Первым важным узлом фортепиано, определяющим энергетический баланс инструмента, является клавишный механизм.

История фортепиано началась с клавишного механизма, изобретенного Кристофором в 1709 г. С тех пор этот механизм претерпел значительные конструктивные изменения и в настоящее время, спустя почти три века, представляет собой сложное рычажное устройство, позволяющее эффективно управлять звучением инструмента: извлекать звуки нужной длительности и громкости, в желаемых сочетаниях и последовательностях, с большой скоростью. От качества клавишного механизма зависят игровые свойства фортепиано, удобство игры, темпкость, с которой пианист может отражать свои тончайшие эмоции в характере звучания инструмента.

Качество клавишного механизма, не имеющего явных дефектов, может существовать только исполнителем, слушатель его практически не ощущает. И все же клавишный механизм, если он не удовлетворяет пианиста, не создает необходимой комфортности и легкости игры, неизбежно создает препятствия исполнительской технике, снижает эмоциональную свободу пианиста, создает у него чувство неуверенности, а это, естественно, ощущается и слушателями.

Теоретическими расчетами в области кинематики клавишных механизмов фортепиано мы обязаны фундаментальным работам инженеров Э. Ганзига и В. Пфаффера, опубликованным довольно давно (см.: Gansing, 1909; Pfeiffer, 1921; 1940). С тех пор (судя по технической литературе) в мире не проводились теоретические работы об усовершенствовании кинематики клавишных механизмов, результаты которых были бы достойны серьезного внимания.

Однако за это время существенно изменились требования к фортепиано, обогатился арсенал применяемых материалов, изменилась технология. Значительно увеличилась требуемая громкость звучания роялей, так как концертные залы стали гораздо больше. Увеличились напряжения струн фортепиано, повысилось качество сушки и войлоков и т.д. Настроившимся фортепиано в разных странах накоплен большой опыт собственных модификаций клавишных механизмов. Изучение этого опыта может принести большую пользу современным конструкторам.

Незаслуженно мало внимания уделяется инженерами и исследователями качеству клавишных механизмов. Традиционно считалось, что звучание фортепиано в первую очередь зависит от качества дека и струн, молоточков; клавишный механизм рассматривался как второстепенный фактор, обуславливающий лишь удобство игры.

В НИИ музыкальной промышленности (г. Ленинград) с 1937 по 1940 г. проводились исследования сил, действующих в клавишном

механизма фортепиано при различных приемах звукоизвлечения. Авторами этих работ были измерены гибкости мягких прокладок клавишного механизма и рассчитано их относительное значение в формировании гибкости всего клавишного механизма; были разработаны оригинальные методы измерения динамических параметров клавишного механизма, систематизированы факторы, влияющие на коэффициент полезного действия клавишного механизма (см.: Римский-Корсаков, Маташов, 1938).

Роль клавишного механизма в формировании музыкальных качеств фортепиано изучалась в 1980—1983 гг. в акустической лаборатории Ленинградской фабрики клавишных музыкальных инструментов "Красный Октябрь". Субъективные эксперименты по специально разработанным методикам дали основание полагать, что при сравнении современных концертных роялей различных изготовителей эксперты-исполнители руководствуются в большей степени динамическими ощущениями, нежели звуковыми, хотя в их оценках чаще фигурирует ссылка на последние (см.: Галемба, 1983). Причины этого недостатка лежат в области помехологии (об этом подробнее будет рассказано в главе VII).

В связи с простотой ролики клавишного механизма в формировании оценок не только игроков, но и звуковых качеств современных фортепиано весьма своевременна и актуальна работа Е.А. Лебедевой (1975), проведенная в Научно-исследовательском и конструкторско-технологическом институте музыкальной промышленности и посвященная анализу конструктивных и технологических факторов, определяющих качества клавишного механизма роялевого. Основанная на изучении современного зарубежного опыта, эта работа имеет большую практическую ценность. Основное ее результаты заслуживает внимательного рассмотрения и внедрения в производство.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КЛАВИШНОГО МЕХАНИЗМА

Функции клавишного механизма в фортепиано очень многообразны. Хороший клавишный механизм прежде всего должен обеспечивать большой динамический диапазон инструмента — от *ppp* до *fff*. А поскольку громкость звука определяется скоростью молоточка при ударе по струне, эта скорость должна быть подвластна музыканту, т.е. зависеть от силы его воздействия на клавишу таким образом, чтобы ее легко было удерживать.

Сопротивление клавишного механизма при игре должно быть не настолько большим, чтобы затруднять легкую игру и утомлять исполнителя. Однако слишком податливая клавиатура мешает pianistу ощутить отзывчивость механизма и равномерно использовать весь

диапазон сил воздействия на клавишу; недостаточное сопротивление клавиатуры нередко вызывает у pianista чувство неуверенности.

Сопротивление клавишного механизма при быстром нажатии клавиши должно быть большее, чем при медленном. Pianist должен чувствовать, что громкость извлекаемого звука однозначно соответствует силе воздействия на клавишу. Однако, если сопротивление механизма имеет не столько инерционную природу, сколько вызвано силами взаимного трения деталей, такой механизм характеризуется как "вязкий", "вялый", т.е. попросту некачественный.

Сопротивление механизма не должно резко изменяться по мере нажатия клавишей из-за последовательного включения в движение деталей механизма — pianist это ощущает как игровое неудобство. Бесшумность механизма при игре должна быть максимальной: стук, скрипы недопустимы.

Механизм должен работать очень быстро, звук после удара по клавише должен возникать почти мгновенно — это залог точкой темповой, ритмической (логической) координации при исполнении музыкального произведения.

Быстрым должен быть и возврат клавишного механизма в исходное положение; инструменту необходимо иметь хорошую релаксацию (способность к быстрому повторению удара по одной и той же струне). Правильно сконструированный, тщательно изготовленный и хорошо отрегулированный клавишный механизм способен выдержать до 8 одинаковых звуков в секунду, а рояльный — до 12 и даже более. Все эти свойства клавишного механизма должны сохраняться долгое время — десятилетиями.

Клавишный механизм является самым сложным узлом фортепиано; он не только определяет степень комфортности, с которой музыкант достигает желаемого результата (в игре удобство), но в зависимости от своего качества позволяет в большей или меньшей степени выявить всевозможные возможности инструмента. Поэтому многие замечания музыкантов-экспертов по качеству звучания фортепиано следует адресовать к качеству клавишного механизма.

Клавишный механизм рояля (рис. 14) состоит из узла клавиши (клавиша, пилот, фанер и вспомогательные детали), узла фигуры (фигура, релакционный рычаг, шпатель, релакционная пружина и вспомогательные детали), узла молоточка (собственно молоточек и тамбуриштил с барабанчиком и калосом) и демпферного узла (демфер, фигура контрклавиатурная с калосом демпферным, демпферная пружина и др.).

Рассмотрим кратко действие клавишного механизма при звукоизвлечении.

При опускании переднего конца клавиши 1 пилот 2 через мягкую прокладку на выступе фигуры 3 поднимает фигуру, заставляя ее вра-

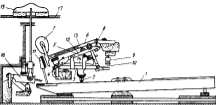


Рис. 14. Рольный клавишный механизм системы Швендера

шататься вокруг оси 4. Вместе с фигурой поднимается шпилькер 5, который толкает барабанчик гаммершталя 6, заставляя гаммершталя с молоточком 7 вращаться вокруг оси 8. Когда фигура поднимается настолько, что маховик шпилькера достигает акустической пушки 9, начинается вращение шпилькера вокруг его оси 10, в результате чего шпилькер выходит из зацепления с барабанчиком. Оставшиеся до струны 3—4 мм пути молоточек летит по инерции.

Молоточек, опущенный от струны, останавливается фенгером 11, который дает инерцию молоточка; при незначительном возврате клавиши молоточковый узел покинет барабанчик на релаксационный рычаг 12, что позволит шпилькеру уже на $1/4$ обратного хода клавиши возвратиться в исходное положение под барабанчиком.

В этом положении механизм готов к восприятию следующего удара по клавише, что обеспечивает его корышью релаксина.

Уровень, на котором релаксационный рычаг подхватывает барабанчик гаммершталя, устанавливается регулировочным винтом 13. Релаксационная пружина 14 должна обладать жесткостью, достаточной для удержания узла молоточка на релаксационном рычаге.

Демпферный узел приводится в движение задним концом клавиши. Примерно на $1/3$ хода нажатой клавиши демпфер 15 начнет подниматься. При опускании клавиши демпфер и фигура контролевателю 16 опускаются под действием собственного веса в исходное положение и демпфер ложится на струну 17, гася ее колебания.

Остальные детали клавишного механизма — опорные бруски, стойка фигур, регулировочные винты, колесики, мягкие прокладки и т.д. — служат для крепления и регулировки положения основных деталей механизма, обесшумливания их контактов в процессе движения и

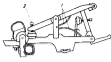


Рис. 15. Фигура клавишного механизма ролей "Штайнер":
1 — двойная релаксационная пружина;
2 — винт регулировки баланса релаксационного рычага

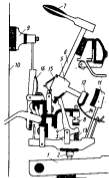


Рис. 16. Клавишный механизм компании (Horsburg Bros Ltd, Англия)

т.д., другими словами, обеспечивают нормальный режим работы клавишного механизма.

Изображенный на рис. 14 рольный клавишный механизм системы Швендера с релаксационной пружиной Эрра, применяемой в современных ролях отечественного производства, несколько отличается от клавишного механизма ролей "Штайнер" и некоторых других фирм, применяющих двойную релаксационную пружину Герда и иной способ регулировки баланса релаксационного рычага (рис. 15).

Сравнивая эти конструкции, нужно отметить, что упругость пружин Эрра легко регулируется винтом, в то время как пружина Герда регулируется только кривокопкой. Поэтому достижение необходимой величины упругости этой пружины требуют достаточно точного ее изготовления, а любые несторонний деформации пружины (например, при установке в механизм) приводит ее в негодность. Пружина Герда при движении механизма скользит по релаксационному рычагу, что создает дополнительные, правда небольшие, силы трения.

С другой стороны, пружина Эрра также обладает недостатками, например способностью "всучиваться" при извлечении громких звуков, что создает дополнительные (и значительные) силы сопротивления и даже шума (см.: Дьяконов, 1964).

Кроме того, короткий конец пружины, находящийся под регулировочным винтом, давит на этот винт с большой силой, что часто приводит к ослаблению винта и разрегулированию механизма.

В клавишных механизмах концертных роялей "Стейнвей" (в отличие от прочих роялей) отношение переднего плеча клавиши к заднему не столько велико, а увеличивается от 1,9 на крайней дистантовой клавише до 2,1 на крайней базовой клавише. Это способствует выравниванию инерционного сопротивления клавишного механизма от баса с относительно тяжелыми молоточками и демпферами до дисканта, где масса молоточков относительно невелика, а демпферы отсутствуют.

По принципу действия клавишный механизм пианино (рис. 16) не отличается от клавишного механизма рояля.

Вертикальное расположение струн в пианино приводит к тому, что силы тяжести не способствуют возвращению молоточка и демпфера после звукозамедления, как в рояле. Поэтому клавишный механизм пианино содержит ряд дополнительных конструктивных элементов, назначение которых состоит в возврате механизма в исходное положение после удара молоточка по струне. Рассмотрим кратко процесс звукозамедления на пианино.

Клавиша 1 (см. рис. 16), будучи нажатой, поднимает пилот 2 и фигуру 3, при этом шпильер 4 толкает шульдер 5, а вместе с ним гаммерштифт 6 с молоточком 7.

Выключение шпильера происходит после того, как его хвостовик достигнет звукозвучной пушки 8. При подъеме фигура отжимает рычаг демпфера 9 и последний отходит от струны 10.

Если после удара молоточка о струну клавиша еще нажата, то отскокивший от струны молоточек останавливается фенгером 11, замыкающим контактенгер 12, входящий в узел молоточка и жестко связанный с шульдером.

Быстрое возвращение шпильера в исходное положение обеспечивается пружиной 13.

Если при сильных ударах по клавише отскок молоточка от струны довольно быстрый, то при звукозамедлении рп др скорость отскока молоточка от струны мала. Ускорению отскока молоточка способствует бентик 14, который при опускании клавиши нагибается и весом фигуры возвращает шульдер в исходное положение. Шульдерная пружина 15, нагибаясь при приближении молоточка к струнам, отталкивает затем молоточек обратно.

Демпфер возвращается в исходное положение (на струне) силой действия демпферной пружины 16.

При правильной регулировке положений узлов механизма и оптимальной упругости пружин такая конструкция обеспечивает ретацию до восьми ударов в секунду.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Конструкция клавишных механизмов различных фирм имеет много общего, тем более что они базируются, как уже говорилось, на одном и том же фундаментальном расчете Э. Ганзига и В. Пфайффера. Изготовители фортепиано редко производят полный расчет клавишного механизма, сохраняя от модели к модели размеры и формы основных узлов и деталей, внося лишь незначительные изменения, которые невозможно избежать.

Многие недостатки конструкции, равно как и достоинства, становятся при этом устойчивыми, перекладываясь из старых разработок в новые. Есть также недостатки и в клавишном механизме отечественного производства. Чтобы выявить эти недостатки, требуется прежде всего проверить соотношения длин рычагов, положений осей вращения и центров тяжести деталей, величин их перемещения. Эти параметры должны соответствовать изложенным ниже рекомендациям.

1. Ход передней кромки белой клавиши (друк клавиши) должен составлять 8,5–10,5 мм. Проверяется специальным шаблоном — друкшпильер, регулируется с высокой точностью надавливанием на передний клавиатурный штифт бумажным шайб под суконную шайбу.

2. Расстояние от вершины ударной части молоточков до струны должно составлять 48–50 мм. Проверяется специальным шаблоном или линейкой: в пианино — со стороны молоточков, в рояле — со стороны струн.

3. При опускании передней кромки клавиши рояля на 5 мм фигура должна занимать горизонтальное положение. Проверяется на глаз.

4. При опускании белой клавиши рояля на 5 мм ось фигуры, точка контакта пилота с фигурой и центр нижнего отверстия клавиши под средний клавиатурный штифт должны лежать на одной прямой. Это можно проверить достаточно точно с помощью натянутой нити или линейки. Удобнее это сделать, обеспечив доступ к механизму разборкой одного из двух соседних механизмов.

5. Клавишное соотношение (отношение длины переднего плеча клавиши к длине заднего плеча) механизма рояля должно составлять 1,8–2,1. Длина переднего плеча клавиши измеряется от центра нижнего отверстия клавиши под средний клавиатурный штифт до передней кромки клавиши. Длина заднего плеча клавиши равна расстоянию от середины нижнего отверстия под средний клавиатурный штифт до вершины пилота.

6. Гаммерштифт рояльного механизма при контакте со струной должен занимать горизонтальное положение, параллельное плоскости струн. Ось молоточного зерна при контакте со струной должна занимать вертикальное положение. Проверить это можно следующим образом: вынуть клавишный механизм, с помощью угольника убедиться

в том, что гаммерштаб перпендикулярен оси карна молоточка; поднять молоточек на высоту, равную его расстоянию до струн (см. л. 2), и убедиться на глаз, что гаммерштаб занимает горизонтальное положение, т.е. составляет одну линию с корпусом гаммерштаба.

В пианино осяевая линия карна молоточка должна быть перпендикулярна струне. Это легко с достаточной точностью проверить на глаз непосредственно в инструменте.

Анализ конструктивных параметров клавишных механизмов современных пианино в связи с их эксплуатационными свойствами (см.: Лебедева, 1990) позволяет дать некоторые дополнительные конструктивные рекомендации.

Так, центр тяжести фигурки должен располагаться на продолжении осевой линии пиалета. Расположение центра тяжести фигуры дальше от плоскости струн, чем осевая линия пиалета, приводит к увеличению усилия, требуемого для подъема фигуры, что в свою очередь увеличивает игровое усилие. Для выполнения этой рекомендации конструирование клавишных механизмов должно предусматривать расположение шпильера ближе к плоскости струн, чем это принято в современных отечественных фортепиано.

Увеличенный угол наклона гаммерштаба к плоскости струн в конструкциях клавишных механизмов пианино обычно связан с намерением компенсировать весом молоточкового узла избыточную силу трения в оси шультерного узла. При этом неизбежно смещается центр тяжести молоточкового узла и увеличивается давление шультера на шпильер, а следовательно, и инерция механизма.

Оптимальным можно считать угол наклона гаммерштаба к плоскости струн, равный $22-23^\circ$. Для выполнения этой рекомендации необходимо обеспечить достаточно низкое трение в осях механизма, что и достигается в лучших моделях пианино.

Намеченными по эксплуатационным свойствам, как показывают исследования Е.А. Лебедевой, оказались клавишные механизмы пианино, в которых угол между шпильером и верхней плоскостью фигуры составляет 76° , а угол между шпильером и гаммерштабом — 37° .

Подчеркнем, что оптимальная конструкция клавишного механизма может быть превращена в качественное изделие только при условии достаточно низкого трения в осях механизма, о чем речь пойдет ниже.

СТАТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ТРЕНИЕ

Современный клавишный механизм фортепиано содержит 4-5 капсюльных соединений, которые должны обеспечивать легкое и точное вращение фигуры, шпильера, релативнойной рычага, гаммерштаба, демпферальтера. Осью капсюльного соединения служит металлический штифт, середина которого плотно забивается во вращающуюся

деталь, а края находятся в отверстиях капсюля, выложенных специальным сукомом. К капсюльному сукону предъявляются очень высокие требования: он должен обладать высокой прочностью, упругостью, износостойкостью, не должно вытягиваться при тарировке капсюлей, должно иметь очень тонкую толщину. Лучшие капсюльные сукны обнаруживают разброс толщины, измеряемый сотыми долями миллиметра.

Малейшее нарушение технологии изготовления капсюльного соединения значительно повышает силы трения в нем. Трение в клавишном механизме бывает также на среднем и переднем штифтах клавиши. Оно зависит от соотношения диаметра отверстия в клавише и диаметра соответствующего штифта.

Трение в клавишном механизме происходит также при скольжении деталей: шпильера по шультеру или барабанчику гаммерштаба, пиалета по фигуре, релативнойной пружины Герца по релативнойной рычагу.

Это трение старается уменьшить оптимальными формами контактных поверхностей, уменьшением их шероховатости, рациональным повышением жесткости мягких прокладок, правильным расположением деталей в механизме, уменьшающим путь скольжения (см.: Pfeiffer, 1940).

Как правило, при любом сравнении хороших и плохих клавишных механизмов (имеют в виду новые, агрегированные механизмы) обнаруживают прежде всего разницу в силах трения; избыточное трение в капсюльных соединениях и на штифтах клавиатуры является типичным недостатком многих клавишных механизмов.

Механизм, в котором избыточные силы трения, оценивается множеством как "вязкий". Ощущено в начале нажатия клавиша вязкость механизма, пианино корректирует усилие, стараясь все же достичь желаемой силы звука. Это отвлекает внимание музыканта, создает определенный дискомфорт. Особенно неприятно играть на "вязком" инструменте с малой громкостью, в этом случае на преодоление сил трения затрачивается большая часть энергии, передаваемой пианино клавиша, а следовательно, крайне затруднительным становится достижение точного управления громкостью.

Проверке капсюльных соединений следует уделять постоянное внимание. Капсюли шультера и контрклавиатуры должны вращаться под действием груза массой 4-8 г, приложенного к лезву капсюля. Для капсюля фигуры вращающее усилие допускается в пределах 8-15 сН. Для испытаний капсюль должен располагаться горизонтально, лезвом вверх.

Шпильер механики пианино и капсюль гаммерштаба роля (принятый в отечественном производстве) должны вращаться на осях под действием собственного веса.

Проверку калюлей шпиллера можно производить и на собранном узле фигуры; для этого нужно снять шпиллерную пружину и свести за движением шпиллера при наклоне фигуры.

Калюля гаммершпиль роллей "Стойкая" имеет меньший вес и размеры, поэтому для проверки его подвижности в отверстие калюли вставляют шуруп, которым гаммершпиль прикрепляется к гаммербенке. Под действием веса этого шурупа калюля должен вращаться. Аналогично проверяется подвижность калюлей фигуры.

При достаточной подвижности калюльными соединениями не должны иметь люфтов и качелей.

Основные причины повышенного трения в калюлях или наличия в них люфтов и качелей следующие:

- применение низкокачественного калюльного сукна (наиболее частые дефекты — несоответствие толщины и разнотолщинность);
- нещадная обрезка калюльного сукна со "щечек" калюли при гарнировке;

- расхождение калюльного сукна при гарнировке из-за применения слишком больших усилий проглаживаемой суконной полоской в отверстии калюли;

- повышенная или пониженная влажность древесины калюли или окружающего воздуха.

Применение калюльного сукна с большим разбросом толщин приводит к неконтролируемому уплотнению сукна при посадке штифта в калюлю, что в свою очередь создает замышенное или заниженное давление сукна на штифт, в следовательно, повышенное трение. Сравнительное изучение этих параметров клавишного механизма рояльных изготовителей, проведенное Е.А. Лебедевой, обнаружало, что в среднем силы трения в осях калюлей роянно, выпускаемых в настоящее время в СССР (14,7 Н) и США (10,3 Н), в 2—3 раза больше, чем у инструментов, выпускаемых в Японии (4,3 Н) и СССР (4,7 Н). Анализ источников повышенного трения в осях калюлей отечественных клавишных механизмов роянно показал, что следует обратить особое внимание на качество калюльного сукна и тщательность гарнировки калюли. Обязательным, но не всегда применяемым средством снижения сил трения в калюльных соединениях является обглаживание фортепиано перед выпуском. Рекомендательный режим обглаживания состоит в 2000 ударах по каждой клавише фортепиано с силой 4—4,5 Н; такой прием позволяет иногда снизить силы трения в калюлях на 25%.

Существенное снижение трения в калюлях, как показывают эксперименты, может быть достигнуто пропиткой суконных прокладок калюлей фторопластовым лаком (например, ФП-525).

Такая пропитка уменьшает силу трения в оси калюли на 30—40%, снижает гигроскопичность сукна (см.: Лебедева, 1980).

Изменение влажности окружающей среды влияет на форму деревянных калюлей, изменяя размеры отверстий; это приводит к увеличению сил трения в калюлях либо к появлению недопустимых люфтов вокруг штифтов.

При ремонте механизмов некоторые фирмы рекомендуют снимать трение в отдельном тугом калюле с помощью спиртового раствора, состоящего из 75% омыленного от мыла древесного спирта и 25% воды. Небольшую каплю такого раствора следует нанести на каждый торцев штифта и подождать полного высыхания. Если результат не достигнут, следует повторить попытку с раствором, содержащим 50% спирта и 50% воды. Сушка должна производиться в теплом помещении. Если и вторая попытка оказалась неудачной, калюлю подлежащую перештифтовке или замене.

Трение клавиши о клавиатурные штифты, на которые она надавливает, также может внести существенный вклад в статическое сопротивление клавишного механизма. Для уменьшения трения на клавиатурных штифтах необходимо точное соблюдение соотношений размеров штифтов и отверстий в клавишах под эти штифты. Большая длина клавиши делает величину силы трения у штифтов чувствительной к изменениям влажности воздуха, что не следует допускать как в производственных помещениях, так и в условиях эксплуатации фортепиано. Влажность древесины, применяемой для изготовления клавиатуры, имеет первостепенное значение: ее занижение или завышение приводит к изменению формы клавиши и значительному повышению ее трения на штифтах.

По данным А.В. Ремеско-Корсикова, суммарная сила трения в шарнирах клавишного механизма не превышает 0,0904 Н. Измерения Е.А. Лебедевой показывают, что наименьшая сила трения по всей клавиатуре роянно составляет 0,107 Н. Такое малое трение отличает клавишные механизмы роянно японской фирмы "Ямаха", выделяющийся среди инструментов других изготовителей высоким игровым качеством.

Сила трения, возникающая в каком-либо узле клавишного механизма, воздействует на палец пианиста через систему рычагов. Поэтому для определения суммарного воздействия всех сил трения необходимо перед их арифметическим сложением каждую "привести к игровому концу клавиши", т.е. пересчитать их величины в соответствии с рычажными соотношениями. Все вышесказанное в этом разделе количественные данные относятся к силе трения, приведенной к игровому концу клавиш.

Чтобы проанализировать трение в клавишном механизме, запаситесь плоскими грузиками, позволяющими в пределах 15—150 г варьировать массу нагрузки с точностью до 0,5—1 г. С помощью линейки или другим доступным способом приспособьтесь измерять вертикальное

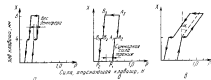


Рис. 17. Диаграммы статического сопротивления клавишного механизма

перемещение передней верхней кромки клавиши с точностью до 0,5 мм.

Постоянно нагружая клавишу (можно начать с грузика массой 10 г), измеряйте опускание клавиши, отмечая результаты измерений на графике, в котором абсциссой является сила воздействия на клавишу (равная весу грузиков), а ординатой — величина опускания клавиши.

Когда опускание клавиши будет полным, т.е. при дальнейшем нагружении клавиша перестанет опускаться, начните постоянно снимать грузики, продолжая измерять перемещение (подъем) клавиши до тех пор, пока клавиша не поднимется в исходное положение.

Графическое отображение результатов измерений дает диаграмму статического сопротивления клавишного механизма, подобную полученной А.В. Римским-Корсаковым (рис. 17). Рассмотрим, как эта диаграмма отражает движение узлов клавишного механизма внешне.

P_1 — минимальный вес грузика, при котором начинается опускание клавиши. Координаты точки A_1 соответствуют перемещению передней кромки клавиши и весу грузиков в момент начала включения демпфера. Точка A_2 соответствует минимальному весу грузиков, при котором начинается деформация демпферной пружины. Точка A_3 соответствует опусканию передней кромки клавиши на величину ее полного хода. Теперь начинается постепенная разгрузка клавиши, но ее обратное движение не начинается до тех пор, пока нагрузка не уменьшится на величину, равную удвоенной силе трения в механизме и соответствующей длине отрезка A_2B_2 . Так происходит потому, что если при опускании клавиши сила трения в механизме противодействовала этому опусканию, то теперь она будет противодействовать подъему игрового конца клавиши; другими словами, в точке A_2 сила трения в механизме меняет направление.

Точка B_2 соответствует началу подъема передней кромки клавиши; этот подъем происходит по тем же законам, по которым происходило

опускание. Точка B_1 соответствует возвращению демпферной пружины в исходное положение. Отрезки A_1A_2 и B_1B_2 соответствуют дополнительному действию сил трения в кассете демпферальтера и приведенного веса демпферного узла. Участок B_1P_2 соответствует подъему передней кромки клавиши в исходное (нулевое) положение после выключения демпферной системы.

Суммарная приведенная сила трения в механизме получается из диаграммы как половина длины отрезка P_1P_2 :

$$F_{\text{тр}} = \frac{P_2 - P_1}{2}.$$

Можно было бы провести определение суммарной силы трения проще: найти значения F_1 (нагрузку при начале опускания клавиши) и F_2 (нагрузку при окончании подъема), а затем вычислить их полусредность. Однако получения диаграммы статического сопротивления позволяет определять и другие важные параметры, например приведенную жесткость демпферной пружины:

$$E_{\text{д}} = \frac{\Delta P}{\Delta x} \text{ г/см}.$$

На приведенных диаграммах изображены результаты измерений на нормальном клавишном механизме (а), на механизме с повышенным трением (б) и на механизме с повышенной жесткостью демпферной пружины (в).

Поскольку штиллерная и шувальтерная пружины в клавишном механизме должны обеспечивать быстрый возврат соответствующих деталей в исходное положение после удара молоточка по струне, их жесткость должна быть для этого достаточной. Повышение трения в составных клавишного механизма приводит к необходимости увеличивать жесткость возвращающих пружин, что неизбежно влечет за собой дополнительное повышение статического сопротивления клавишного механизма. Попытки компенсировать это повышенное сопротивление за счет самозвучания клавиш значительно увеличивают инерцию клавишного механизма, а значит, и его динамическое сопротивление.

Анализ клавишных механизмов различных изготовителей подтверждает, что тем изготовителям, которые производят клавишные механизмы с повышенным трением в осях, свойственно применение более жестких пружин, а повышенное трение на клавиатурных штифтах обычно сопровождается увеличенной из-за дополнительного самозвучания инерцией клавиш.

Поэтому снижение трения в клавишном механизме представляет собой важнейшую задачу производства, имеющего целью повышение качества фортепиано.

Классичный механизм представляет собой систему рычагов, каждый из которых при нажатии клавиши вращается с определенной угловой скоростью. Если рычажная система обладает идеальной жесткостью, определить угловую скорость каждого узла можно, пользуясь параметрами кинематической цепи, т.е. соотношениями плеч рычагов.

В клавишных же механизмах используются рычаги, обладающие заметной гибкостью (клавиша, гаммерштилл). Кроме того, в местах подвижных контактов деталей механизма (между пилотом и фигурой, шпильером и шупльером или барабаником гаммерштилля, хвостовиком шпильера и акустической лункой и т.д.) помещаются мягкие прокладки, служащие для шумоглушения.

Сила взаимодействия пальца пианиста с клавишей при нажатии звуком малой громкости зависит в основном от масс движущихся деталей механизма, расположенных их центров тяжести и сил трения в осевых вращениях.

При быстром и сильном нажатии клавиши узлы клавишного механизма разгоняются не сразу: время достижения ими максимальной угловой скорости зависит от их моментов инерции. При этом силы взаимодействия между узлами снимают мягкие прокладки и вызывают упругие деформации гибких рычагов, что приводит к последовательному запаздыванию начала движения узлов механизма относительно начала движения игрового конца клавиши (рис. 18); запаздывание тем больше, чем больше масса узлов, гибкость рычагов и прокладок, а также сила воздействия пианиста на механизм.

Такое запаздывание, если оно становится слишком большим (что характерно для легких клавишных механизмов), приводит к ухудшению отзывчивости инструмента при игре f и ff за счет увеличения времени задержки звука относительно начала воздействия на клавишу и ограничения динамического диапазона клавишного механизма и фортепиано в целом.



Рис. 18. К изменению сечения гаммерштилля в диссонантовом регистре

Рис. 19. Диаграмма движений отдельных узлов клавишного механизма

Кроме того, чрезмерные деформации мягких прокладок и гибких рычагов требуют дополнительных затрат энергии, что снижает коэффициент полезного действия клавишного механизма.

Задержка движения узла молоточка относительно узла фигуры приводит к предвременному выходу шпильера из-под шупльера в пилотный или из-под барабаника гаммерштилля в ролле. Это уменьшает конечную скорость молоточка, увеличивает силы трения на вершине шпильера, а в критических случаях может привести к срыву срабатывания механизма при нажатии громких звуков.

Эти рассуждения подтверждены теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями клавишных механизмов (см.: Лебедева, 1980; Римский-Корсаков, Дынов, 1953; Pfeiffer, 1921). Отсюда некоторые практические рекомендации.

1. Необходимо по возможности уменьшать гибкость мягких прокладок, оставив ее достаточной для шумоглушения.

Бумажные прокладки под клавишу у среднего штифта, применяемые с целью регулировки, не должны составлять по общей толщине более 1,5 мм (см.: Лебедева, 1980). Если регулировщик вынужден превышать эту толщину, значит механизм сконструирован (или изготовлен) некачественно. Бумажные прокладки должны изготавливаться только из плотной бумаги.

Мягкая прокладка между пилотом и фигурой должна быть по возможности более тонкой и менее ворсистой.

Накладка замки на барабаник гаммерштилля должна быть как можно более тугой. Эта прокладка подвергается большим силам воздействия, приложенным к малой площади, а также сдвигамы усилием при выходе шпильера из зацепления, поэтому недостаточная жесткость выполнения обложки барабаника гаммерштилля вызывает существенное ухудшение действия клавишного механизма, снижение динамического диапазона звучания ролла.

2. Необходимо уменьшать гибкость клавишей и гаммерштиллей. Для этого прежде всего следует тщательно следить за тем, чтобы эти детали не изготавливались из косослойной древесины. При конструировании механизма следует предусматривать по возможности более короткое гаммерштилль. Полезно, как это делается в концертных роллах "Стейнвей", укорачивать клавиатуру в диссонантовом регистре, где вес молоточков меньше, поэтому существует возможность обложить меньшей длиной клавиши. Лучшее место расположения молоточка располагать ближе к гаммерштиллю, так как при этом уменьшается удлиняющая гаммерштилль центробежная сила, возникающая при движении молоточка. Полезно накладки из твердой древесины на клавишу в окрестности среднего штифта — месте наибольшего изгиба клавиши.

3. Необходимо по возможности уменьшать массу деталей механизма. Некоторые фирмы с успехом применяют рациональное уменьше-



Рис. 20. Измерения прогиба галмерштитла



Рис. 21. Измерения прогиба клавишного механизма

ные площади сечении галмерштитла в дисковом регистре (рис. 19). Детали узла фигуры также следует делать менее массивными, чем это принято сейчас в некоторых клавишных механизмах роялей (в том числе и отечественного производства).

Рекомендация уменьшения массы гибких рычагов — клавиш и галмерштитла должна выполняться разумно, так как если уменьшение массы приведет к увеличению глубины детали, то это может не улучшить, а ухудшить динамические свойства клавишного механизма.

Требование уменьшения массы не касается молоточков. Если из энергии, переданной клавишному механизму плавником, исключить непроходимые потери на трение в осях, огибке прокладок, изгиб рычагов и пр., то все оставшееся энергией распределится между движущимися узлами клавишного механизма пропорционально их массам, приведенным к игровому концу клавиш. Поэтому для каждой конкретной конструкции клавишного механизма чем больше доля масс молоточка в общей массе клавишного механизма, тем больше коэффициент полезного действия этого механизма. Сравнение разных конструкций механизмов по этому параметру можно производить только в том случае, если эти конструкции близки друг другу по расположению осей вращения и центров тяжести узлов.

Увеличение массы клавиш путем ее сдвигания должно быть минимальным; излишнее сдвигание клавиш значительно ухудшает динамические свойства клавишного механизма за счет увеличения сил его инерции. Следует помнить, что гибкость рычагов определяет лишь их способность изгибаться, а величина изгиба рычага пропорциональна не только гибкости, но и силе инерции, изгибающим рычаг.

Как измерить гибкость галмерштитла и клавиш? Для измерения гибкости галмерштитла можно рекомендовать приспособление, описанное Н.А. Дилконовым (1964). Для оценки гибкости галмерштитла рояля следует прижать галмерштитл к жесткой горизонтальной опоре таким образом, чтобы барабанчик располагался наверху, а кромка опоры лежала точно под осью симметрии барабанчика (рис. 20). На определенном расстоянии от оси вращения калюля вала конца галмерштитла к нему подвешивается грузик определенной массы (например, 0,2 кг).

Условным критерием при сравнении гибкости галмерштитлей является величина опускания его конца под действием груза.



Рис. 22. К оценке гибкости клавишного механизма в статическом режиме

В качестве аналогичного способа сравнительной оценки гибкости клавиш можно применить измерение опускания x передней кромки клавиш под действием груза определенной массы P (рекомендуется масса груза в пределах 2–3 кг) при плотной фиксации пилота в самом нижнем положении (рис. 21).

Показательным с точки зрения качества является сравнение клавишных механизмов различных изготовителей по суммарной гибкости в статическом режиме.

В этом случае критерием сравнения служит величина опускания передней кромки клавиш под действием массы груза (рекомендуется выбрать массу в пределах 1–2 кг) при фиксированном положении молоточка (рис. 22).

Лучшим следует считать тот механизм, который обнаруживает при одинаковой массе груза меньшую величину опускания клавиш.

Прогибы рычагов в динамическом режиме определяются более сложными способами: например, скоростью прохождения (см.: Лебедева, 1980). Гибкости мягких прокладок могут оцениваться с помощью специальных маятниковых устройств, регистрирующих отскок шарика определенной массы от мягкой прокладки (см.: Римский-Корсаков, Дилконов, 1952).

Глава IV. МОЛОТОЧКИ

Молоточек — в какой-то мере символ фортепиано. Молоточек является одной из действующих масс клавишного механизма и в этой роли определенным образом влияет на коэффициент полезного действия механизма и на игровые свойства фортепиано. В то же время от параметров молоточка, в том числе и от массы, в большой степени зависит эффективность передачи его энергии струне при их соударении, громкость и тембр. Это делает качество молоточка доминирующим в фор-

задании качества звучания фортепиано; неудачительно, что технология изготовления высококачественных молоточков лучшими фирм-изготовителями хранится в секрете. На страницах общедоступных технических руководств по производству фортепиано до сих пор колеблются лишь общезвестные принципы изготовления молоточков, которые уже давно одинаковы для всех изготовителей.

Сударение молоточка со струной — пример типичного импульсного возбуждения колебательной системы — интересовае ученых со времен Гельмгольца (1875); на эту тему опубликовано несколько десятков работ (см.: Галембо, 1966а). Авторы большинства из них имели чисто теоретический интерес к проблеме; не владея отчетливыми представлениями о соотношениях физико-механических параметров молоточков и струн фортепиано, они делали достаточно вольные предположения с целью упрощения расчетов; результаты этих работ малоприменимы для решения инженерных задач при изготовлении фортепиано.

Первыми серьезными акустическими исследованиями процесса возбуждения струны в фортепиано, основанными на экспериментальном изучении действительных параметров молоточков и струн в различных регистрах инструмента, является работа А.В. Римского-Корсакова (1940), выполненная в Научно-исследовательском институте музыкальной промышленности (Ленинград); результаты этих работ впоследствии были уточнены и значительно дополнены А.Н. Ривным (1966а; б). Недавно в печати появились результаты некоторых подробных экспериментов, проведенных в Японии (см.: Yamagisawa, Aiso, Nakatani, 1981; Yamagisawa, Nakatani, 1984).

Технологические изыскания путей направленного улучшения фортепианных молоточков проводились автором в период с 1965 по 1975 г. в акустической лаборатории ленинградской фабрики клавишных инструментов "Красный Октябрь", что позволило обосновать и успешно применить в производстве ряд новых для отрасли технологических приемов (см.: Галембо, 1971; 1980а).

В этой главе делается попытка обобщить в доступной форме известные сведения о процессе сударения молоточка со струной и заполнить информационный пробел по вопросам технологии изготовления молоточков, существующий в современной технической литературе.

ПРОЦЕСС СУДАРИЕНИЯ МОЛОТОЧКА СО СТРУНОЙ

Место удара молоточка по струне располагается не в ее середине, а ближе к верхней (в пиано) или передней (в регле) опоре.

Отношение рабочей длины L струны к расстоянию l от точки начального контакта молоточка со струной до ближайшей опоры конструкторы обычно называют "отношением линии удара":

В практике производства фортепиано для басового регистра традиционно применяется отношение линии удара в пределах $k = 7 \dots 9$, что, по-видимому, соответствует оптимальному для слуха сочетанию громкости и тембра извлекаемых звуков, найденному эмпирически в процессе исторического развития фортепиано.

Гельмгольц (1875) предполагал, что выбор такого отношения линии удара объясняется интуитивным стремлением избавиться от неблагоприятных 7-й и 9-й гармоник. Однако это объяснение не может быть достаточным, так как 7-я и 9-я гармоники, содержащиеся в звуках других музыкальных инструментов, вполне благозвучны; кроме того, эти гармоники присутствуют и в звуках фортепиано.

Г. Берри, изучая на экспериментальной модели реакцию дека при возбуждении струны молоточком, обнаружил, что она включает в себя не только вынужденные колебания, частоты которых задаются струной, но и собственные колебания, которые есть не что иное, как отклик дека на удар молоточка, воспринимаемый слухом благодаря резкому изменению натяжения струны при ударе (см.: Berry, 1910).

Этот отклик обладает низкой высотной определенностью и напоминает глухой удар. Его можно услышать, если наклонить звук на фортепиано, задушившая струну ладонью.

Справедливо предполагая, что наилучший звук получается при наибольшем отношении амплитуды тонального отклика к амплитуде наибольших "немusикальных" колебаний дека, Берри на примере стальной струны длиной $L = 66,5$ см, настроенной на частоту основного тона $f_0 = 261$ Гц (до первой октавы), экспериментально показал, что такое наибольшее отношение получается при $k \approx 9$.

В работах А.В. Римского-Корсакова и А.Н. Ривна на большом экспериментальном материале показано, что объективный критерий выбора расположения места удара на струне связан с находящимся оптимального соотношения спектрального состава звука и его интенсивности. Известно, например, что дека плохо молучает основные частоты басовых звуков, слух также имеет в этой частотной области пониженную чувствительность. Чтобы басы фортепиано были достаточно громкими, их спектр должен быть богатым интенсивными обертонами в зоне достаточно эффектного излучения дека. Можно показать расчетным путем, что, возбуждая басовую струну на субоктаву ($f_0 = 27,5$ Гц) на участке между $\frac{1}{2}l$ и $\frac{1}{3}l$ ее длины, где лежат лучины 11–13-й гармоник, мы создаем условия для повышения их интенсивности в спектре. Частоты этих гармоник лежат в области 300–380 Гц, приближенно соответствующей энергетическому максимуму излучения дека фортепиано (см.: Римский-Корсаков, 1940).



Рис. 23. Деформация струны ударной части молоточка

Этот и многие другие примеры подтверждает правильность предлагаемой различными исследователями трактовки причин исторически сложившегося выбора места удара молоточка по струне. Однако достаточно тонкого количественного обоснования оптимальности и единственности этого выбора пока не существует, хотя решение такой задачи представляет значительный интерес с точки зрения более глубокого познания процесса формирования звуков фортепиано и воспитания качества этих звуков.

Молоточек подлетает к струне, освободившись от резоннующего его механизма за 2–3 мм перед контактом со струной. Взаимодействие молоточка и струны не мгновенно, а продолжается некоторое время, за которое давление молоточка нарастает до максимального значения, а затем падает. Будучи зависимой от других параметров молоточка и струны, форма изменения силы при их взаимодействии в значительной мере влияет на тембр звука Фортепиано.

После начального контакта струна, прогибаясь под давлением молоточка, одновременно сжимает войлочную головку молоточка, вдавливаясь в нее. При этом, поскольку поверхности соприкосновения струны и молоточка являются не плоскими, а цилиндрическими (рис. 23), площадь соприкосновения молоточка и струны не является в процессе удара постоянной, а увеличивается с ростом силы соударения. Длина участка струны, на котором происходит контакт, судя по следам, остающимся на молоточке, достигает в базовом регистре 8–10 мм как за счет деформации струной войлока молоточка, так и из-за изгиба струны по контуру молоточка.

Внешние слои войлочной головки молоточка мягче, чем внутренние. Учитывая это, а также увеличение площади контакта в процессе соударения, А.Н. Ривин доказал теоретически и экспериментально, что сила взаимодействия молоточка и струны сначала нарастает относительно медленно, что является залогом достаточно мягкого тембра фортепиано при таком звукозвучении. При игре *f* и *ff* нарастающие силы удара молоточка ускоряются и звук становится более ярким.

При ударе молоточек возбуждает в струне волны, бегущие от места удара в обе стороны и возвращающиеся к месту удара после отражения от опор струны. Если молоточек к моменту возврата отраженной волны не успеет завершить удар и уйти на достаточное расстояние от струны, волна создаст дополнительные силы взаимодействия молоточка и струны.

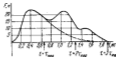
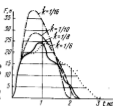


Рис. 24. Форма импульса силы удара молоточка по 35-му хорду фортепиано при $k = 8$

Рис. 25. Зависимость формы импульса силы удара молоточка от величины отношения длины удара



Поэтому важной характеристикой процесса соударения является соотношение длительности контакта молоточка со струной, времени двойного пробега волны по короткому участку струны и времени двойного пробега волны по длинному участку струны.

Пусть L — длина рабочей части струны, l — расстояние от места контакта молоточка до ближайшей опоры, f_0 — частота основного тона. Приведем формулу для подсчета интервалов времени от начала контакта молоточка со струной до прихода в точку удара волны, отраженных от опор струны (эти интервалы являются периодами колебаний короткого и длинного участков струны):

$$t_{\text{кор}} = \frac{1}{f_0 k} = t_{\text{дл}} \left(1 - \frac{1}{k}\right);$$

$$k = L/l$$

На рис. 24 и качестве примера показана осциллограмма сил, возникающих при ударе молоточком по 35-му хорду концертного рояля ($f_0 = 198$ Гц, $k = 8$). Взаимодействие струны и молоточка, как видно из осциллограммы, состоит из трех сплывающихся друг с другом импульсов силы. Первый, до момента времени $t = T_{\text{кор}}$, соответствует силе, действующей на струну до прихода в место удара волны, отраженной от ближайшей опоры. Второй импульс отображает реакцию молоточка на первое отражение волны от ближней опоры. Отраженная волна частично проходит под молоточком в длинную часть струны, а частично, отражаясь от молоточка и затем от ближней опоры, снова возвращается к месту удара и в момент времени $t = 2T_{\text{кор}}$ дает начало третьему импульсу силы. Четвертый импульс силы не возникает потому, что к приходу соответствующей волны от ближней опоры молоточек успевает оторваться от струны, на чем процесс удара заканчивается. Пунктирная линия на рисунке соответствует изменению

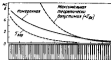
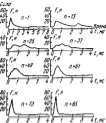


Рис. 27. Длительность контакта молоточка со струной фортпиано в сравнении с периодами колебаний короткого ($T_{кор}$) и длинного ($T_{дл}$) участков струны

Рис. 28. Форма начальной волны удара молоточка о струну для всех звуков от фортпиано

силы в случае, если бы опора струны находилась достаточно далеко от места удара и отражения от нее волны совсем не участвовали в процессе соударения молоточка и струны (см.: Ривин, 1956б).

Изменение отношения линии удара влияет на количество импульсов силы при ударе молоточка о струну. На рис. 29 это кластеризуется изображением изменения силы удара молоточка по 40-му хару кабинетного рояля (261,6 Гц) при различных значениях k .

В работах Т. Янакисовы и др. экспериментально доказано, что в нижнем регистре могут быть такие ситуации, когда первая отраженная от ближней опоры волна приходит к месту удара в тот момент, когда она взаимодействует молоточка и струны уже достигла нулевого значения, но молоточек еще недостаточно отошел от струны. В этом случае струна "догоняет" молоточек и снова вступает с ним в контакт, хотя и более слабый, чем первый (рис. 26).

В крайнем дискантовом регистре (начиная примерно с 70-го хора), где интенсивность обертонов очень мала по сравнению с интенсивностью основного тона, отношение линии удара выбирается исключительно из условия получения струной максимальной энергии колебаний; для его выполнения требуется приблизить линию удара к опоре струны настолько, чтобы длительность соударения была по величине как можно ближе к периоду колебаний струны (см.: Ривин, 1956б). На практике в этом регистре отношение линии удара достигает значений $k = 18 \dots 24$.

Дальнейшее приближение места удара к опоре влечет за собой уменьшение энергии колебаний струн за счет повышения интенсивности шумового привауна (об отклике опорных конструкций на удар молоточка см. в главе VIII), а удаление места удара от опоры приводит к уменьше-

нию энергии колебаний струн из-за демпфирования этих колебаний самим молоточком вследствие того, что длительность соударения значительно превышает период колебаний струны. От басового регистра к дискантовому величина отношения линии удара должна увеличиваться постепенно.

Длительность соударения молоточка со струной, по данным экспериментальных исследований (см. Римский-Корсаков, Дьяконов, 1952; Ривин, 1956а), составляет 5–6 мс в басовом регистре и уменьшается к крайнему дискантовому регистру до 0,3–0,5 мс (рис. 27). К сожалению, опоры этих исследований не указывают, при каких силах воздействия на клавишу получены эти результаты, хотя известно, что длительность соударения в большой степени зависит от скорости молоточка. По данным Е.А. Лебедевой (1975), полученным с помощью скоростной киносъемки, время соударения молоточка со струной piano в середине тенорового регистра зависит от силы нажатия клавишей экспоненциально, уменьшалась от 9,5 мс при силе 2 Н до 4 мс при 40 Н. Такая зависимость делает такое звучание фортпиано неслышим, а громким звуком придает более яркой, богатый обертонами тембр.

Длительность соударения молоточка со струной зависит как от жесткости головки молоточка, так и от изгибной жесткости $E_{изг}$ струны в месте удара:

$$L_{изг} = \frac{7L}{10(L - \delta)} = \frac{7}{7} \frac{k}{k - 1},$$

где L — масса струны.

Увеличение жесткости струны при прочих равных условиях приводит к уменьшению длительности ее контакта с молоточком при ударе.

Длительность удара молоточка о струну уменьшается с увеличением жесткости ударной части молоточка. Направленное изменение этой жесткости является основой процесса интонировки, т.е. регулирования тембра звуков фортпиано на конечном этапе его изготовления.

Увеличение массы молоточка приводит также к увеличению длительности его удара о струну. Увеличение длительности удара влечет за собой ослабление высших обертонов в спектре колебаний струны.

Форма ударной части молоточка также влияет на тембр извлекаемого звука. Уменьшение радиуса ударной части молоточка приводит при прочих равных условиях к увеличению степени нелинейности жесткости ударной части молоточка и к уменьшению площади контакта молоточка со струной, что способствует увеличению содержания высших обертонов в спектре извлекаемого звука.

Молоточковая голова Фортепиано состоит из деревянного зерна *1* и однослойной или двухслойной войлочной головки *2*, связанных собой клеем и металлическими скобками *3* (рис. 28). Акустические свойства молоточка определяются массой молоточковой головки, жесткостью и формой ударной части. Под ударной частью молоточка следует понимать область между двумя радиальными сечениями головки, отстоящими друг от друга по периметру молоточка на 10—15 мм в басовом и на 3—5 мм в дискантовом регистре. Именно в этой области происходит основные деформации при соударении молоточка со струной.

Современные рояли должны обладать ярким и достаточно мощным звуком, способным заполнить большие залы и концертные площадки. Это требует применения большого натяжения струн, высокой жесткости и массы молоточков при оптимальной форме их ударной части.

Как уже говорилось выше, чем меньше радиус ударной части, тем звук ярче, богаче высокими обертонами. Острый молоточек легче поддается интонировке и требует меньше вредных прогибов. Проблема уменьшения площади контакта молоточка со струной особенно актуальна в дискантовом регистре.

Конструкция молоточка с формой ударной части, определенной дугой окружности, пересекающейся с двумя прямыми (рис. 29,а), обладает существенным недостатком: невозможностью добиться значения радиуса ударной части меньше радиуса молоточка. Дальнейшее уменьшение радиуса в такой конструкции связано с уменьше-



Рис. 28. Молоточек Фортепиано и его детали



Рис. 29. Однорядусная (а) и двухрядусная (б) форма ударной части молоточка

Рис. 30. Формы молоточка и острия деревянного зерна молоточка



нием ширины, а значит и массы молоточка, что, как правило, нежелательно.

Этого недостатка лишена конструкция, предлагаемая на рис. 29,б. Здесь форма молоточка образуется большим количеством элементов, что позволяет конструктору предусмотреть малый радиус ударной части при достаточно большой массе молоточка.

Керн в дискантовых молоточках должен иметь острую и клиновидную, а не округленную верхнюю (рис. 30). Это дает возможность получения большей жесткости ударной части, что особенно важно в этом регистре. Однако керн при запрессовке испытывает большие нагрузки и должен быть достаточно прочным. Поэтому его следует конструировать по возможности коротким. Это требование находит свое отражение в рекомендации предусматривать при конструировании клавишного механизма минимально возможное расстояние от точки удара до отверстия под гаммершпиль (улучшение игровых свойств фортепиано).

Существуют довольно сложные, однако лишь приближительные методы расчета основных параметров молоточков на основании известной мензурной инструмента (см.: Виносовой-Корсаков, Дыконов, 1952). Применение прессов с регулируемым и воспроизводимым режимом давления, а также разных по физико-механическим свойствам молоточковых войлоков позволяет достичь оптимальных параметров молоточков наиболее точным, экспериментальным, методом. Для этого конструктор должен иметь в своем арсенале 10—15 образцовых комплектов молоточков, различный по массе и жесткости, т.е. изготовленных с известными технологическими различиями (варьируется масса войлока, толщина заготовки, форма дуг и давление в прессе). Последовательно опробовав все тест-комплекты на новой модели, конструктор обязательно выбирает для массового производства данной модели технологию производства молоточков, соответствующую выбранному комплекту.

Особенно незаменим такой подход при реставрации звуковых свойств ремонтируемых фортепиано, имеющих изношенные, подлежащие замене молоточки. Здесь правильный выбор жесткости войлока и режимов его запрессовки имеет первостепенное значение и может быть осуществлен только экспериментально, тем более что совре-

ный молоточковый войлок отличается по внутренней структуре и физико-механическим свойствам от войлоков, изготовленных деспадацией назад.

Масса молоточков плоско обычно изменяется от 11–14 г в басовом до 4–5 г в дискантовом регистре; в роллях соответственно от 14–17 до 4–8 г. Чем большую долю составляет масса молоточка в общей массе узла клавишного механизма, тем больше коэффициент полезного действия механизма, а значит большая часть энергии удара в клавише передается молоточку и далее струне. С этих позиций массу молоточка полезно увеличивать. Однако это увеличение ограничено; с ростом массы молоточка растет длительность его соударения со струной и, кроме того, растет масса молоточка, т. е. его инерция, увеличивается сила, действующая на мягкие прокладки и нагибающие рычаги клавишного механизма, сужая его динамический диапазон и уменьшая максимальную скорость молоточка. Поэтому, если конструктор добавляет увеличения массы молоточка, он должен обязательно подкреплять это увеличением жесткости ударной части, уменьшением его радиуса, уменьшением гибкости рычагов (клавиши, гаммерштафф) и мягких прокладок клавишного механизма. Таким путем можно достичь увеличения громкости звучания инструмента с сохранением приятного тембра — это самая насущная задача производства фортепиано высокого качества, в особенности концертных роллей.

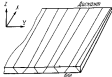
ЖЕСТКОСТЬ

Жесткость молоточковой головки — важнейший параметр молоточка. Самая высокопрофессиональная работа в производстве фортепиано — инвенция — есть не что иное, как тонкая “дзаджа” звука инструмента путем изменения жесткости молоточковой головки. Слишком малая жесткость молоточка делает звук фортепиано глухим, слабым и бедным вырванными обертонами, завышение жесткости приводит к излишней яркости звука — он становится скандным, но звонким, в дисканте — случаются, в басовом регистре — однокор режим, металлическим.

Конструктору и технологу необходимо знать, какие факторы влияют на формирование жесткости ударной части молоточка, как можно в процессе производства управлять этим параметром.

Жесткость ударной части возрастает: а) с увеличением объемной массы войлока и связанного с ней модуля упругости в направлении Z (рис. 31); б) с увеличением коэффициента сжатия (упрессовки) войлока в направлении Z ; в) с увеличением внутренних напряжений в ударной части, созданных с наложением внешних ее слоев при деформации войлочной заготовки в прессе. Эти напряжения тем выше, чем больше модуль упругости войлока в направлении Y ; они резко ослаб-

Рис. 31. Плоский разрез по плоскости Z молоточкового войлока



ляются при грубой механической обработке молоточка, связанной, например, с доведением его формы после прессовки (см.: Галамбо, 1969).

Все упомянутые факторы находятся в сложной взаимосвязи, которая не позволяет изменить только один из них без изменения другого. Поэтому решение практических задач требует эмпирического подхода, при котором знания, опыт и интуиция конструктора, технолога и мастера играют исключительную роль.

Вот пример часто встречающейся в производстве задачи. Замечено, что молоточки определенного регистра или всех регистров требуют значительной инвенции, связанной с необходимостью увеличения жесткости молоточковой головки. Если этот дефект внезапно проинтерпретировать в постоянном действующем производстве и не предпринять никаких конструктивных или технологических мер, то это почти всегда связано с нарушениями технологической дисциплины. Поэтому на первом этапе следует проверить соблюдение технологии в части качества и параметров войлока, толщины войлочной заготовки и симметричности прессовки, устаревшее оборудование заменить грубой механической обработкой молоточковой головки по периметру.

Если же установлено, что дефект постояен и не связан с указанными нарушениями технологии, следует приступить к изменению конструкции или технологии. Изготовители молоточков в таких случаях традиционно требуют увеличения плотности войлока. Как правило, это малоэффективный путь решения проблемы. Ведь если у молоточка недостаточно жестка ударная часть, длительность удара по струне слишком велика. Увеличивая жесткость ударной части за счет применения более тяжелого войлока, мы действительно способствуем уменьшению длительности удара молоточка, но одновременно и увеличению ее за счет увеличения общей массы молоточка. Увеличение толщины заготовки войлока также не всегда разумно, так как по волеизъявлению на параметры молоточка это почти аналогично увеличению объемной массы войлока. Все это не означает, что плотность и толщина заготовки войлока (масса заготовки войлока) могут уменьшаться без ущерба для качества молоточка. Оптимальное значение этих параметров должно выбираться для каждой модели фортепиано экспериментальным путем в процессе конструирования модели.

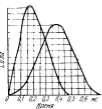


Рис. 32. Форма импульсной силы при ударе о жесткую сторону неупругого молоточка и того же молоточка после пропитки ударной части раствором нитролакса

Более прогрессивный путь решения предложенной задачи увеличения жесткости ударной части молоточка заключается в применении склеивающей пропитки ударной части заготовки войлока, профилировки после предварительного обжима (см. технологический раздел этой главы) или уменьшении радиуса ударной части молоточка.

Жесткость молоточковой головки нелинейна, другими словами, деформация скатия головки при ударе не пропорциональна действующей силе. Нелинейность жесткости имеет большое значение, обеспечивая достаточно широкий динамический диапазон звуковых форм: более громкие звуки становятся более яркими за счет возрастания усредненной жесткости молоточка и, следовательно, уменьшения времени соударения со струной. Доказано (см.: Ривин, 1955б), что у хороших молоточков сила скатия пропорциональна второй или даже третьей степени деформации. Пропитка ударной части молоточка затвердевающими растворами приближает эту зависимость к линейной, чем создает неприятный "сип" при атаке звука — следствие изменения характера удара молоточка (рис. 32).

МОЛОТОЧКОВЫЙ ВОЙЛОК

Современные молоточки фортепиано изготавливаются из специального вида войлока — молоточкового. Требования к этому материалу настолько высоки, что даже в войлочном производстве он требует самой высокой квалификации изготовителей и специального оборудования, а чем свидетельствует опыт ведущих производителей.

Параметры войлока должны определяться конструктором молоточков и могут быть различными у разных изготовителей, оставаясь обычно в следующих пределах:

- длина — 800—1000 мм;
- цвет — белый;
- ширина — около 1000 мм;
- толщина дискантовой кромки — 4—10 мм;

толщина базовой кромки — 16—30 мм;
 плотность у базовой кромки — 0,40—0,50 г/см³;
 плотность у дискантовой кромки — 0,52—0,70 г/см³.
 Толщина и объемная масса войлока плавно уменьшаются от базовой кромки к дискантовой.

Для изготовления молоточков с двухлопной головкой применяется также твердый (средняя плотность 0,6—0,8 г/см³) и тонкий (2—6 мм) молоточковый войлок; он обычно имеет контрастный яркий цвет (красный, зеленый и др.) и называется в производстве внутренним или нижним войлоком.

Исследовательская работа (см.: Галембо, 1955б; Осадная, Маркина-ва, Галембо, 1957), проведенная ЦНИИШирот совместно с Ленинградской фабрикой клавишных инструментов "Красный Октябрь", позволила сформулировать основные требования к технологии молоточкового войлока, соблюдение которых обязательно для получения высокого качества этого уникального по значению и самому дорогостоящего в производстве фортепианного материала.

Основные требования к войлоку связаны с его структурой. Скрытые дефекты структуры не выявляются простыми измерительными параметрами готового войлока, их обнаружение возможно лишь путем сложных исследований. Проявляются же эти дефекты уже в звуке головных инструментов, что, конечно, поздно для принятия контроля.

Поэтому особенно важно знать и применять технологическое приемы, гарантирующие нужную структуру войлока.

Необходима тщательная очистка сырья (шерсти) от примесей и инородных включений, которые могут быть не видны на поверхности листов войлока, но обнаруживаются при его разрезании на заготовки.

Шерсть должна быть тщательно протесана, т.е. следует распрямить волокна практически в одном направлении, не оставляя комков, скруток и т.д. В этой операции завышение производительности чесальных машин (особенно явное на Московской фабрике технического войлока) приводит к ухудшению структуры войлока. Следующая операция, непосредственно связанная с формированием структуры, — укладка протесанной шерсти слоями для получения основы будущего войлока. Долгое время считалось, что соседние слои следует укладывать во взаимно перпендикулярных направлениях X и Y (см. рис. 31); до 1977 г. войлок на отечественных предприятиях изготавливали именно так. Экспериментальные исследования анизотропии упругих свойств молоточкового войлока (см.: Галембо, 1955б) показали, что данное решение ошибочно. Жесткость ударной части молоточка формируется в основном за счет натяжения волокон при обжиме войлока вокруг корня молоточка, для чего войлок должен иметь максимальный модуль упругости в направлении Y. При крестообразной укладке он слишком мал, так как половина слоев не растя-

направлении Y из-за того, что волокна в них уложены в направлении X (известно, что в волокнистом материале модуль упругости вдоль волокон больше, чем модуль упругости поперек волокон). В молоточке при этом появляются слои расеченных коротких волокон, не создающих напряжения и легко разрушающихся при ударе в струну, если такой слой окажется на поверхности молоточка. Поэтому правильной следует считать укладку всех волокон вдоль направления Y . При такой укладке (ее в производстве называют поперечной) увеличивается напряжение войлока при изготовлении молоточка, повышается его жесткость. В настоящее время переход на поперечную укладку в производстве молоточкового войлока полностью осуществлен и утвержден ГОСТ 7175-75 "Войлок технический для музыкальных клавишных инструментов".

Крайне важно правильно производить следующую после укладки операцию свайливания, т.е. прессования полученной основы войлока, которое происходит под давлением тяжелой плиты, совершающей медленные колебательные движения при одновременном проработании основы. В отличие от обыкновенной прессовки свайливание должно способствовать подвижности волокон, их пропихиванию из одного слоя в другой, т.е. большому их ослеплению. Поэтому совершение надпустым пренятий в некоторых производствах упрощенный метод построения нагружения основы большим весом. Многоэтапная плита может войлок в движении в лучшем случае только наружные слои основы, волокна же внутренних слоев под таким весом полностью теряет подвижность. В результате вместо равномерно проработанного по толщине войлока получается подобие бутерброда, в котором проработанная шерсть заключена между двумя войлочными нормами.

Специализированное оборудование должно производить постепенное нагружение основы, повышая давление на нее от нулевого до максимального (массой плиты), чем достигается последовательное вовлечение в движение всех волокон, начиная с периферии и кончая центральными слоями. В этом лежит важный условие равномерной проработки войлока по толщине.

Большое значение в формировании структуры войлока имеет также валка, т.е. химическая и механическая обработка с целью получения заданных геометрических размеров и плотности листов войлока за счет контролируемой усадки волокон. Не следует допускать злоупотребления существующими приемами ускорения усадки, так как при этом нарушается равномерность проработки войлока и он становится неоднородным по физико-механическим свойствам.

Механическая обработка (чистка, фрезерование, обрезка) войлока после валки необходима для получения окончательных геометрических размеров листов. Иногда требуется дополнительное прессование для достижения самых высоких плотностей в дискантовой части листов.

Здесь следует особое внимание уделить тому, чтобы обработке подвергалась вся поверхность листа, а не его часть. Если подпрессовывать только дискант, то на поверхности листа появятся складки и неравномерная объемной массы войлока от баса к дисканту не будет достаточно плавными. Если чисткой или фрезерованием затронута не вся поверхность листа, это означает существование участка с уменьшенной толщиной (завалом), что является скрытым дефектом, так как на большой поверхности листа завал обнаружить трудно.

Перечисленные выше требования по обеспечению равномерности и однородности структуры молоточкового войлока намного проще обеспечивать в производстве, чем проверять их соблюдение в готовом материале; поэтому очень важно изготавливать войлок по технологии, гарантирующей его высокое качество.

Требования к геометрическим размерам листов и плотности войлока, в отличие от структурных, выражаются количественными показателями и контролируются простыми метрологическими способами. Правильный подход к вопросу формы листов и плотности молоточкового войлока требует пересмотра установившегося в нашем производстве положения, когда все виды молоточков изготавливаются из войлока, имеющего единые построиваемые показатели размеров и плотности. Разнообразные модели фортепиано требуют подбора оптимальных по массе и жесткости молоточков; применение одного вида войлока для всех моделей ограничивает возможности конструктора в плане совершенствования звучания фортепиано.

К специализированному производству молоточкового войлока следует предъявлять два основных требования. Первое заключается в стабильности параметров, т.е. уменьшения их допустимого разброса. Допуски на толщину листов должны составлять не более 1 мм в басовой части и 0,5 мм в дискантовой, на плотность — около 5% номинальной величины. При этом необходимы мобильность производства молоточкового войлока, его способность в рабочем порядке перестраиваться на требования заказчика: новые номинальные величины толщины, длины, ширины и плотности листов войлока.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОТОЧКОВ

Войлок раскраивается на полосы переменного треугольного сечения станками с поступательным движением диска или плоско-ножа относительно стола с закрепленным на нем листом войлока либо с движущимся столом при неподвижном ноже. Усовершенствование таких станков идет в направлении сведения к минимуму отходов дорогостоящего войлока, а также получения полос, требующих минимальной последующей профилировки. Это требует от станка возможности плавного изменения угла раскрытия от $20-27^\circ$ в басо-

вой части листа войлока до $10-12^\circ$ в дискante, что принципиально возможно только при использовании прогрессивных методов резки (например, виброномом).

Для профилировки раскрасных войлочных полос в массовом производстве применяются приспособления, в которых полоса вжимается в желоб, имеющий в сечении форму сегмента, а затем та часть войлока, которая не вошла в желоб, срезается ножом или фрезой. Желоб находится в поступательно движущейся лаге или вращающемся барабане. Профилированная полоса войлока после этой операции имеет в сечении уже не трапецию, а сегмент.

В сравнении с ручной профилировкой станочная обработка профиля повышает производительность труда. Однако при этой операции происходит срезание деформированного войлока, поэтому выходящая из станка заготовка, будучи часто несимметричной и нестабильной по размерам, требует ручной доводки.

В молоточках с двойным слоем войлока верхний толстый слой соединяется со заготовкой, имеющей трапециевидное сечение. Учитывая, что современные гидравлические прессы способны создать большие давления, достаточные для приема такой "угловатой" заготовки без появления клеевых рекомбинационных сегментов, войлока можно использовать вместо сегментной для изготовления молоточков двухрамусной конструкции (см. рис. 29,6) с одноосной ударной частью. Это повышает экономичность расхода дорогостоящего молоточкового войлока и позволяет при усложнении раскройных станков получать заготовку, не требующую профилировки, а также способствует формированию острых, но массивных молоточков.

Специальные станки (рис. 33), называемые в производстве "укогами", осуществляют предварительный обжим войлочной заготовки с фиксацией по ее продольной оси канавки зерна. В зависимости от применяемой в дальнейшем технологии прессования "укоги" бывают горячими и холодными. Если молоточный пресс позволяет достичь достаточно высоких давлений (например, общее давление на полный комплект молоточков в гидравлическом прессе "Тиббс" достигает 480 кН), целесообразно применять предварительный обжим, сводящийся в основном к удалению канавки для зернов. Полный горячий обжим влечет наличие влаги в войлоке способствует перераспределению волокон в нем, что снижает внутреннее напряжение в готовой головке молоточка и приводит к потерям в звучности фортельано. Кроме того, при высоких температурах формируются поверхностный "утопа" возрастает риск подгорания войлока.

Для формирования молоточков раньше применялись только ручные и электрические винтовые прессы. Главным их недостатком было отсутствие контроля давления формирующих приемов на вой-

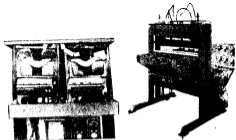


Рис. 33. Станок для предварительной прессовки заготовки молоточкового войлока

Рис. 34. Гидравлический пресс для изготовления молоточков формально

лок, а следовательно, сложность воспроизведения комплектов одной жесткости. Большие давления, необходимые для получения молоточков высокой жесткости, были недостаточны, так как даже небольшие разницы в давлениях на юсти противоположных боковых приемов приводили к поломке зерна.

В настоящее время отечественные производители используют гидравлические молоточные прессы (рис. 34), имеющие 12 цилиндров: 4 для удаления зернов и войлочную заготовку и 8 для двустороннего приема войлока к зернам. Такой пресс имеет электрически нагреваемые приемные лаги, что сокращает цикл заправки молоточков с 2-3 ч до 5-10 мин. Для охлаждения можно использовать как традиционный казиновый, так и современные синтетические терморасширительные клеи.

Пресс может создавать давление до 160 кН с каждой стороны, при этом давление постоянно контролируется. Режим работы - автоматический или ручной. В автоматическом режиме пресс работает следующим образом: верхняя лага с зернами вставляется в лагу в боковых слоях, войлочная заготовка и зерно смещаются к клею, затем нажимается кнопка и пресс автоматически закрывается в определенной последовательности. Сначала опускается верхняя лага с зернами, а затем войлок в нижнюю лагу, причем как скорость движения

верхней лаги, так и окончательное давление керна на войлок можно регулировать независимо в басовом и дискантовом регистрах. Давление верхней лаги можно автоматически останавливать как по максимальному давлению, так и по ограниченно толщине ударной части молоточка (концевыми выключателями). Сразу после остановки верхней лаги начинают обжиматься боковья, давление которых на войлок тоже может быть установлено заранее.

Пресс остается закрытым для выдержки, время которой заранее устанавливается на таймере, после чего автоматически открывается в обратной последовательности.

Затем рабочий вынимает из преса склеенный комплект молоточков, чтобы разрезать его на отдельные молоточки.

Для обработки галтелей молоточков, т.е. заместя края нелесого шва после выемки комплекта молоточков из преса, применяются станки с движущейся наждачной шкуркой. Механическая обработка молоточков по периметру с целью корректировки формы ударной части на таких станках недопустима, так как резко снижает жесткость молоточковых головок.

ТЕХНОЛОГИЯ

Арсенал технологических приемов, которые могут использоваться при изготовлении молоточков, достаточен для того, чтобы изготавливать молоточки в широком диапазоне физико-механических параметров.

Чтобы правильно выбрать комбинацию этих приемов для конкретного технологического процесса, необходим творческий контакт технолога и исполнителя.

Изготовление высококачественных молоточков требует особой тщательности, направленной на сохранение утратив свойства войлока при его механической обработке на всех технологических этапах. В этом отношении очевидным и категоричным является требование не разрушать ударную часть молоточка. Несмотря на это, многие производители применяют грубую обработку контура запрессованного молоточка механической шлифовкой для придания молоточку симметричной формы и требуемых размеров, "маскируя" тем самым недостаточную тщательность выполнения подготовительных операций, низкое качество войлока или плохое состояние оборудования, результатом чего являются:

- несимметричность профилировки заготовки войлока;
- несимметричность предварительного обжима войлочной заготовки;
- образование вступлений и рубцов на поверхности запрессованного молоточка.

Симметрия войлочной заготовки должна соблюдаться на всех этапах ее обработки, для чего требуется тщательный контроль шабло-

нами и ручная доводка при профилировке, а также внимательная корректировка положения заготовки при прессовании.

Продавливание канавки под керн вместо предварительного обжима всей заготовки значительно уменьшает выход несимметричных молоточков. Продавливание может производиться нагретым металлическим профилем, при этом заготовка войлока должна лежать на жестком основании.

Неоднородность войлока, если она выражена в неодинаковой плотности по обе стороны продольной оси заготовки, способствует несимметричному деформированию даже при идеальной симметрии профилировки и давлений в прессах.

Разрегулировка молоточного преса приводит к неправильной установке лаг и приемов. Это может нарушить симметрию молоточка, вызвать искажение его формы вступлением войлока в зазор между лагами и приемами, рубцами на поверхности молоточка и т.д. Если чрезмерно зазоры между формообразующими элементами преса не удается устранить, удалив временным выходом из положения выкатить запрессовку молоточка в латунной "рубашке" (см.: Рубин, 1956г). Из латунного листа толщиной 0,5—0,7 мм вырезает полосу, длина которой равна длине запрессовываемого комплекта молоточков, а ширина уменьшается от баса к дисканту. Будучи на 30—40 мм больше ширины войлочной заготовки. Эта полоса помещается между войлочной заготовкой и нижней лагой преса и при запрессовке молоточков отделяет войлок от формообразующих лаг и приемов, закрывая зазоры между ними. Латунная "рубашка" в значительной степени предохранит поверхность молоточковых головок от рубцов, уплотнит головку, уменьшит возможность микроразрывов войлока при трении о края лаг и приемов, значительно уменьшает необходимость механической обработки молоточков после запрессовки.

Требование недопустимости грубой обработки запрессованного молоточка по периметру не исключает дополнительной подпрессовки ударной части с целью увеличения ее жесткости, а также тонкого ручного шлифования при шлифовке.

Таким условием сохранения утратив свойства молоточка. Средства направленного изменения этих свойств во многих производственных операциях используются корректированным толщиной войлочной заготовки, что не всегда желательно, так как приводит к изменению массы молоточка и динамических соотношений в клавишном механизме.

Для направленного и дозированного изменения жесткости ударной части молоточка можно рекомендовать пропитку ударной части молоточка клеосодержащим раствором. Один из вариантов такого раствора, примененный на фабрике "Красный Октябрь", состоит из шпатель, хромистая (двуххромовословый калий $K_2Cr_2O_7$) и повер-



Рис. 36. Пролитка ударной части молоточка:
 а — выточенная заготовка; б — ванночка с пролиткой; в — зажим для предварительного уплотнения ударной части

носно-активного вещества (типа "Волгонат", "Сульфона"). Для приготовления раствора в 200 г воды насыпают 60 г мелко растертого желатина и 40 г хромлика и тщательно перемешивают. Полученную смесь кипятят в 3 л воды до обильного образования пены, затем доливают 0,2 л "Волгоната". Приготовленный раствор имеет желто-красный цвет. Его сливают в ванночку размером 60 X 100 X 1100 мм до уровня 40—50 мм, постоянно подогревают и по мере раскисания доливают. Полосу войлока окунают боковыми сторонами в течение примерно 3 с в базовую и 1 с в дисковидную части заготовки. Для получения более ровной линии контура пролитки можно использовать зажимное приспособление из двух металлических уголков и струбцины. Войлок должен пропитываться примерно на одну треть ширины заготовки с каждой стороны (рис. 36). Недопустимо промокание пролитки в ударную часть молоточка.

Пропитанная полоска подмешивается базовой частью внахлест в течение 5—7 дней; при этом пропитанная часть померкнотости войлока приобретает зеленовато-серую окраску. Полученные из такой заготовки молоточки можно подвергать грубой механической обработке в окрашенных пролиткой областях, ударную же часть лишь очищают вручную мягкой наждачной шкуркой. Склеивающая пролитка, фиксируя волокна ударной части, увеличивает натяжение волокон в ударной части при запрессовке молоточка.

Управляемо жесткостью молоточка при такой технологии достигается варьированием концентрации пропитывающего раствора: повышение содержания желатина и глубины пропитки повышает жесткость ударной части. Повышение скорости проникания пролитки в войлок достигается увеличением содержания в ней поверхностно-активного вещества. Увеличение содержания хромлика в растворе не влияет на жесткость молоточка, а только повышает контрастность окраски пропитанных частей заготовки. Вместо хромлика можно применять другие красители, растворимые в воде.

Обычно концентрацию пролитки экспериментально подбирают таким образом, чтобы за 3 с глубина проникания пролитки в вой-



Рис. 36. К процессу предварительного уплотнения ударной части молоточка

лок составляла 5—6 мм. Эта глубина определяется пробным осуживанием образцов войлока.

Другая возможность регулирования жесткости ударной части молоточка заключается в применении локального прессования зоны ударной части молоточковой заготовки перед операцией профилировки (рис. 36).

Применение этого приема может быть особо рекомендовано в целях улучшения дисковидных молоточков, жесткость которых, как правило, ниже требуемой, даже если плотность войлока предельно велика (при дальнейшем ее увеличении войлок плохо принимает форму углубления дала пресса и даже становится ломким).

Локальное прессование позволяет значительно уплотнить ударную часть молоточка без уплотнения боковых частей, что способствует более легкому обвалу заготовки вокруг молоточковых кернов и получению меньшего радиуса закругления ударной части молоточков.

Локальное уплотнение ударной части производится давлением нагретого металлического профиля (клинообразного в сечении) по продольной оси (длине кернов) выжженной из войлока заготовки. Заготовка при этой операции должна лежать на плоском жестком основании. После локального уплотнения толщина ударной части заготовки должна превышать требуемую толщину ударной части готового молоточка на 0,5—1 мм в дисковиде и 2—3 мм в бисе. После локального уплотнения заготовка профилируется, как это требуется для наиболее удобной запрессовки молоточков, так как в данном случае жесткость ударной части молоточка практически не зависит от толщины профилированной заготовки. Следует лишь соблюдать симметрию заготовки и не срывать профилировкой канавки под керн.

Полное уплотнение ударной части заготовки позволяет применять молоточковый войлок пониженной плотности (до 0,35 г/см³ в базовой и 0,50 г/см³ в дисковидной части листа) и соответственно повышенной толщины.

Высокая эффективность применения изложенных принципов регулирования жесткости изготовленных молоточков (рис. 37) базируется на тщательном экспериментальном подборе технологических параметров: концентрации и длительности пропитки, толщины и плотности войлока и т.д. на основе требований, предъявляемых к молоточкам в каждом отдельном производстве, для каждой конкретной модели фортепиано.

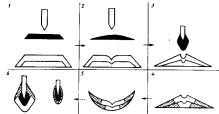


Рис. 37. Последовательность основных операций изготовления высококачественного войлока:

1 — кат и профилирование заготовки войлока; 2 — то же после профилировки заготовки внутреннего войлока и уплотнения ударной части на заготовке внешнего войлока; 3 — то же после оклейки корня внутренним войлоком и профилировки заготовки внешнего войлока; 4 — заготовка внешнего войлока после пропитки ударной части; 5 — то же после предварительного обжима; 6 — молоточная после запрессовки

Изготовление высококачественных двухслойных молоточковых головок требует специального приспособления для предварительной оклейки корня специальным плотным войлоком (см. раздел "Молоточковый войлок").

Существующая на некоторых предприятиях практика замены плотного внутреннего войлока фанерным и другими мягкими войлочками является порочной, так как ведет к понижению качества молоточков и ухудшает звуковые характеристики. Пропитка такого мягкого слоя затвердевающими растворами не слышит поправки, а создает некоторый аналог тупого корня, что тоже отрицательно сказывается на звуке инструмента.

Поскольку изготовление высококачественных молоточков связано с большим давлением на хвостовик корня, фрезеровку профиля хвостовика правильно производить после прессования молоточка, в противном случае велика вероятность поломки корня.

качество молоточкового войлока

Вязкоупругие параметры войлока, определяющие его жесткость и изменение этой жесткости при деформации войлока в молоточном прессе, сложны для прямого измерения из-за анизотропии упругих

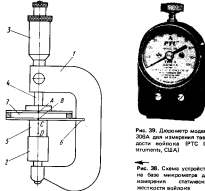


Рис. 38. Дилосметр модели 308А для измерения твердости войлока (PTC Instruments, USA)

Рис. 39. Схема устройства на базе микрометра для измерения модульной жесткости войлока

свойств войлока, а также потому, что деформации войлока в прессе происходят не в одном, а в трех направлениях. Поэтому при одной и той же технологии запрессовки молоточков, т.е. при одинаковых деформациях войлочной заготовки, жесткость молоточковой головки является сложной функцией всех трех составляющих жесткости войлока (в направлениях X , Y , Z) (см. рис. 31). Особенно важными являются модули упругости войлока в направлениях Y и Z , поскольку деформация войлока в направлении X незначительна.

Модуль упругости войлока зависит от скорости его сжатия, которая при сравнении различных образцов войлока должна быть одинаковой.

Статический модуль упругости войлока можно измерять с помощью несложного приспособления на базе микрометра и измерительного микроскопа. На горизонтальном столике микроскопа крепится устройство (рис. 39), которое может вместе со столиком перемещаться в продольном и поперечном направлениях. Образец войлока, имеющий форму куба, устанавливается между неподвижной опорной плоскостью Z скобы микрометра и специальной плоской пружиной P . Последняя изготавливается из двух параллельных бронзовых пластин (размером,

пример, 80 X 19 X 1,5 мм), расположенных на концах вкладываемых. Пружина надета с легким трением на стержень микрометра 4 и удерживается от вращения при помощи вилки 6, охватывающей дужку скобы 7. При вращении микрометрического винта 3 пружина, скользя, перемещается вдоль скобы. На каждой из пластин пружины нанесено по метке (А и В), а на образце нанесены две метки (С и D). По мере закручивания винта микрометра сжимается как пружина 7, так и образец 5. Пружина предварительно калибруется, для чего микрокалоном измеряется расстояние между метками А и В при установке на пластину пружины грузиков определенного веса. Это дает возможность по расстоянию между метками А и В при сжатии образца войлока однозначно определить силу сжатия образца. Продольная деформация сжатия образца измеряется по уменьшению расстояния между метками С и D. Зная силу сжатия и деформацию, легко определить жесткость войлока.

Динамический модуль упругости войлока удобно измерять с помощью виброметрической системы Г.С. Розина (1972).

Не менее важны, но еще более сложны для производственного контроля параметры, определяющие неупругие деформации войлока, связанные не с натяжением, а с перераспределением шерстяных волокон под воздействием внешних сил.

Вязкоупругие параметры изучаются на этапе исследований войлока с целью направленного изменения его структуры, степени упорядоченности и основных направленных расположений в нем шерстяных волокон.

Если же необходимая структура войлока достигнута, то самостоятельное физико-механические свойства различных образцов войлока можно производить по известным, но намного более простым для измерений параметрам. В соответствии со стандартом (ГОСТ 7175—75) таким параметром является плотность.

Важно понимать, что плотность войлока можно считать однозначной соответствующей его жесткости только при одинаковой структуре войлока. Если же сравниваемые образцы войлока изготавливались по различной технологии, волоно в них неодинаковы по качеству, расположены по-разному, прочесаны не с одинаковой тщательностью или различаются по степени взаимного переплетения (различное сжатывание), то равенство объемных масс этих образцов отнюдь не говорит об идентичности их вязкоупругих свойств, а значит и о их равнокачественности.

Одним из немногих применимых неразрушающих экспресс-методов контроля упругих параметров войлока является измерение его твердости. Для этого измерения не требуется вырезать образцы, оно осуществляется непосредственно на листе войлока с помощью твердомера (диаметра) в условных единицах (рис. 38).

Чтобы этот метод мог заменить дорогой и сложный анализ плотности, следует измерять значения твердости войлока при различной его плотности, другими словами, определить зависимость между этими параметрами.

Естественно, что эта зависимость должна быть однозначной, т.е. каждому значению твердости должно соответствовать только одно значение плотности, а каждому значению плотности — только одно значение твердости.

Это соблюдается лишь при следующих условиях: войлоки изготовлены по одной технологии (изменения структуры войлока приводит к изменению характера зависимости между твердостью и плотностью);

войлок однороден, тщательно проработан по толщине (поскольку в измерениях твердости участвует лишь поверхностный слой листа войлока, в то время как плотность характеризует все его тело);

поверхностный слой войлока после валяки и прессовки должен быть тщательно и полностью снят шлифовкой или фрезеровкой (специфическая "корка", образующаяся в результате термобработки войлока, имеет твердость, значительно превышающую твердость внутренних слоев).

Сравня их с изложенными выше требованиями к технологии изготовления молоточного войлока, нетрудно обнаружить интересный факт: замена дорогостоящего и трудоемкого измерения плотности экспресс-методом измерения твердости возможна только на войлоке высокого качества.

ИНТОНИРОВКА

Качество звучания фортепиано во многом зависит от того, насколько внимательно относится техническое руководство предприятий-изготовителей к интонировке инструментов, профессиональному уровню и условиям работы интонаторов.

Наивысшие звуковые возможности фортепиано достигаются только тщательной и высокопрофессиональной интонировкой, причем если первая (фабричная) интонировка проведена грубо, то второй интонировкой на тех же молоточках уже невозможно в полной мере возместить нанесенный качеству звучания ущерб.

Вот почему на ведущих предприятиях, зарубежных и отечественных, инструменты которых пользуются повышенным спросом из-за высокого качества звучания, профессиональное мастерство интонаторов, их обучение и отбор всегда являются предметом пристального внимания руководства.

Хорошим интонатором, как и хорошим музыкантом, может стать не всякий. Для овладения этой профессией нужно иметь острый, чувстви-

ный к малейшим изменениям тембра слух, музыкальность и большое желание вынуждены в тайне этого специфического искусства.

Интонатор должен изначально быть хорошим настройщиком, уметь играть аккорды и беглые пассажи. Выносливость, низкая утомляемость слуха, нескончаемое терпение, умение дифференцировать и анализировать звуковые ощущения, хорошие знание конструкции инструмента, способность определять конструктивные и технологические причины недостатков звуками — лишь краткий перечень тех навыков и способностей, которые должен выработать в себе интонатор. Это делается не только общением с мастером-учителем, но и большой практикой, преодолением неудач и ошибок, изучением вкусов музыкантов-исполнителей высокого класса и в то же время кратчайшим общением и собственным переосмыслением этих вкусов, присутствием в высших классах инструментов, только тогда рождается сопутствующая таланту мастерство и та поразительная интуиция, которая позволяет безошибочно находить самый краткий и эффективный путь к выявлению звуковой палитры и индивидуальных особенностей каждого инструмента.

Лица настоящего мастера-интонатора проявляются не только в специфическом характере звукам созданным им инструментами, но и в личности его учеников.

Интонатор должен интуитивно понимать, как общие качества звукам зависят от тембра каждого отдельного звука. Именно интонатор должен преодолеть ту таинственную грань, которая отделяет фортепиано — физический источник звуков от фортепиано — музыкального инструмента.

Кроме хорошего слуха интонатор должен иметь и верную руку; он должен хорошо представлять себе, как и насколько изменятся свойства звука при тех или иных интонаторских операциях.

Идеальной постановкой вопроса можно считать интонировку высококачественных фортепиано непосредственно в том помещении, где оно будет играть в дальнейшем. Во всяком случае, акустические условия помещения, в котором производится интонировка фортепиано, должны быть характерными для его будущей эксплуатации. Ведущие фирмы содержат даже специальные залы для интонировки.

Интонировка пианино, которая в большинстве своем предназначена для частных владельцев, должна производиться в помещении, идентичном по акустическим условиям (уровню шума, времени реверберации и т.д.) жилой комнате. Известно, что интонировка пианино в условиях повышенного уровня шума кроме большого утомления слуха интонатора приводит к субъективному завышению требуемой яркости звука.

При установке пианино, интонированного таким образом, в нормальную квартиру оно звучит намного резче, чем вызывает нарушения потребностей.

Интересно, что особое внимание к интонутору, выделенное специально помещением для его работы, прекращение интонутором работ при входе посторонних лиц, в сочетании с особыми способностями интонутора, — все это иногда трактуется как стремление к сохранению некоей профессиональной "тайны". Однако это не так. Дело в том, что настоящая интонировка требует максимальной сосредоточенности, огромного напряжения слуха, а потому не терпит внешних помех.

Целью интонировки является красивый тембр фортепиано во всем его динамическом диапазоне, выравнивание резких тембровых перепадов между соседними звуками или регистрами, а также достижение микрогистратового громкостного равновесия. Эта цель достигается регулировкой жесткости ударной части молоточка дозированными механическими воздействиями на войлок.

Высокоскоростная интонировка, как любое искусство, несет на себе отпечаток индивидуальности мастера и не может быть сведена к голым последовательности действий. Тем не менее арсенал приемов, используемых интонуторами, отработаны веками и довольно традиционен.

Перед интонировкой фортепиано должно быть хорошо настроено, а клавишный механизм тщательно отрегулирован, без этого качественного интонировка невозможна.

Ударная часть молоточка после разрыва запрокинутого комплекта имеет волнистую поверхность, так как внутренние скалки слоя войлока приподнимают кромки молоточка. Начиная интонировку, следует обратиться поперек молоточка абразивной шкуркой таким образом, чтобы снять ненатянутые ("мертвые") слои войлока и сделать верхнюю ударную часть прямолинейной. При правильной шлифовке войлок обнимает своими, а оставшийся не разбивается.

Зависит таким образом молоточек, регулирует ровность прилегающей вершины ударной части к струнам хора. Если уровень одной из струн в хора не идеален соседним, следует его отрегулировать путем смещения струны в нужном направлении на колодасте или в аэрафе.

Если точки контакта на струнах лежат на одной линии, то прилегание молоточка к струнам регулируется шлифовкой молоточка. Для проверки следует слегка прижать молоточек к струнам, поднять демпфер правой рукой подальше и провести по струнам медиатором или ногтем. Если молоточек при этом плохо прилегает к одной из струн, ее звук будет более громким и незадемпфированным.

Шлифовка производится мелкой наждачной шкуркой, наклеенной на деревянную планку.

Шлифовка контура головки молоточка производится при вынутой из инструмента механике. Механику пианино рекомендуется удобно положить "на спинку" молоточками вверх.



Рис. 40. Деформация войлока при запуске молоточка



Рис. 41. Интонировочные иглы и утюжок

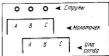


Рис. 42. Способ удерживания молоточка при накаливании

Движение планки с наждачной шкуркой следует направлять от скобок прошивки к ударной части, не трогая ее верхнюю; таким образом, на ней остается небольшой "хохолочек" (см.: Дьяконов, 1964). Недопустима шлифовка поперек отгибающей контура молоточка, так как такая шлифовка перерезает натянутые шерстяные волокна и ослабляет молоточек.

Следующий этап интонировки заключается в корректировке жесткости ударной части молоточка. Форма ударной части молоточка, а также разница в деформации внешних и внутренних слоев войлока при изготовлении молоточка (рис. 40) делают жесткость молоточка неизменной. С увеличением силы звукозвучения деформация ударной части молоточка при ударе о струну охватывает более глубокие и плотные слои войлока.

Чтобы выравнять жесткость молоточков, интонатор прослушивает все звуки фортепиано при сильных ударах по клавишам и отмечает слишком громкие и резкие. На соответствующих молоточках с помощью специальных интонировочных игл (рис. 41) делается глубокое накальвание. Направление накальвания должно быть перпендикулярно слоям войлока, что соответствует рис. 40; говоря проще, утюжки должны быть направлены к острому краю молоточка. Начинать накальвание следует от периферии молоточка (вблизи прошивочных скобок), постепенно приближаясь к ударной части. При накальвании молоточек плотно удерживается левой рукой таким образом, чтобы большой палец твердо лежал на керне молоточка, а средней и указательный пальцы обхватывали гаммерштаб возле молоточка (рис. 42). Накальвание требует иногда значительных усилий, и, если

молоточек не держат достаточно крепко, молоточковая головка может отделиться от гаммерштаба. Иголдодержатель обычно держит подобно карандашу, надвигая на него сверху указательным пальцем. Линия утюжок должна быть параллельной линии вершины молоточка.

Деформация войлока накальванием дает начало явлениям релаксации внутренних напряжений в молоточковой головке, длительность которых достигает иногда нескольких дней. Поэтому некоторые фирмы рекомендуют воздержаться от окончательного суждения о результатах глубокого накальвания молоточков до окончания процесса стабилизации структуры молоточковой головки (см.: GRH, 1977).

Следует внимательно огладить интонировочной кожей тембры и громкости, которые неизбежно возникают на "конструктивных" переходах — от однострунных к двухструнным хорам, от двухструнных к трехструнным, от обвитых к необвитым, от струн базового штега к струнам дискантового.

После того как громкое звучание инструмента стало ровным по тембру во всех регистрах, следует проверить ровность звучания при слабом нажатии на клавиши. В роялях такую проверку необходимо провести также при нажатии левой pedal, сдвигающей молоточек относительно хора струн.

Достижение ровности при тихом звучании обычно производит максимально осторожным, поверхностным накальванием ударной части молоточка. В рояле такое накальвание делают через струны, опустив клавишу в нижнее положение и удерживая молоточек фенгером. Если звук струны хора кажется слишком резким, выделяющимся среди соседних как при ненажатой, так и при нажатой левой pedal,

накалывает следуют те точки вершины ударной части, которые соответствуют струнам А и В (рис. 43); если звук слишком резок при обычном звуковомощении, но удовлетворителен при нажатой левой педали, накалывает вершину ударной части в точке контакта со струной С.

До сих пор речь шла об уменьшении жесткости ударной части молоточков. При недостаточной яркости звуков жесткость молоточка требуется увеличить. Для подроссовывания ударной части молоточков интонаторы используют металлокерамические упорки (см. рис. 41), подогреваемые перед употреблением на спиртовке (известные конструкции интонированных упорок с электроподогревом не очень удобны).

Иногда для некоторого увеличения жесткости достаточно шлифовать с поверхности молоточка слишком рыхлый поверхностный слой "мертвого" войлока и обновить хорошо колпнутый следующий слой.

Дискант требует от интонатора особого внимания. Молоточки этого регистра имеют относительно тонкую ударную часть, поэтому шлифовка молоточка не должна быть значительной. Помимо этого дискантовые звуки более критичны к изменению положения линии удара на струне, поэтому интонатор должен тщательно регулировать это положение. В дискантах, более чем в остальных регистрах, требуется точность регулировки длительности контакта молоточка со струной, а следовательно, и жесткости ударной части.

Для дискантового регистра характерна небольшая масса молоточковых головок. Из-за этого, во-первых, уменьшается необходимость в большой изгибной жесткости гаммерштыля, во-вторых, масса гаммерштыля составляет существенную часть массы молоточкового узла. Поэтому в дисканте иногда удается регулировать длительность удара молоточка о струну, управляя не только жесткостью, но и массой. Для чего интонатор осторожно сплавляет боковые стороны гаммерштыля. Однако это следует делать, постоянно контролируя звуковой результат, ибо если слишком увеличить гибкость гаммерштыля, то при сильных ударах по клавише место удара по струне может заметно смещаться к опоре струны и вызывать увеличение содержания шумового призвука (стук) дискантов, как это случается при установке гаммерштыля, изготовленного из косоокой древесины. Также слишком легкие гаммерштыли интонатор должен обнаруживать и заменять качественными.

Интонировка дисканта весьма сложна и многообразна, она требует от интонатора максимального профессионализма. В дополнение ко всем перечисленным трудностям, с которыми сталкивается интонатор в этом регистре, дискантовые интонированные молоточки часто имеют чрезвычайно заниженную жесткость по сравнению с требуемой, из-за чего интонаторы, не справляясь с задачей повышения жесткости

механическими воздействиями, пропитывают ударную часть молоточков затвердвающими растворами (нитролака, даммарного лака, коллодия и т.п.). Применение такого озвондывающего средства (если оно не вызвано только желанием ускорить работу, непрофессиональным или недобросовестным отношением к интонировке) является верным признаком некачественности молоточков, неправильной их конструкции или изготовления.

Рассмотрим воздействие пропитки ударной части молоточка затвердвающими растворами с акустических позиций. А.Н. Рудиным (1955б) было доказано следующее:

для хороших фортепианных молоточков сила, действующая при ударе, нарастает пропорционально второй или третьей степени деформации ударной части; характер зависимости между силой и деформацией при ударе определяется прежде всего способом изготовления молоточка и качеством войлока;

пропитка ударной части затвердвающими растворами позволяет увеличить жесткость молоточков, однако длит ударную часть молоточка линейно-упругой;

при ударе по струнам пропитанным молоточком в начале удара получается более резок нарастающе сила, чем при ударе молоточком с неинтонированной ударной частью, для которого характерно плавное нарастание силы (см. рис. 32);

изменение силы удара под воздействием волн, проходящих в толщу удара после отражения от брызжовой опоры струны, при ударе пропитанным молоточком резче, чем при ударе неинтонированным, т.е. несинхронизированным молоточком;

пропитка содержимого струны и молоточка в результате прихода от опор отраженных волн в точку удара, в то время как молоточек не успевает выйти от струны достаточно далеко, и в случае пропитанного молоточка становится более резкими и заметными;

уменьшение жесткости пропитанной ударной части молоточка глубоким накалыванием не восстанавливает желанного характера жесткости.

Пропитка ударной части молоточка приводит к появлению в звуке характерного "скала", делает тембр незрительно резким, "стеклянным". Интонировка с применением лака пропитки подолговечна; ударная часть молоточка после затвердевания пропитки становится крупной и быстро выкрашивается под действием ударов о струну.

Мастерство интонатора заключается в умении найти крайнейший путь к нужному звуковому результату, требующий минимального разрушения структуры молоточка. Неправильная интонировка в известной мере непоправима, так как повторно интонирование приводит к дальнейшему разрушению структуры войлочной головки.

Интонатор должен уметь отличать дефекты звука, связанные с молоточковым узлом, от прочих, причина которых также устанавливается интонатором (отклейка штегя, "глухая" струна, неточная настройка, ослабление штифта крепления струны, плохая опечка струны, плохое прилегание струны к штегю, посторонний предмет на деке, косвенной палочкой, дефекты регулировки клавишного механизма и пр.). Только после устранения этих дефектов интонировка может быть проведена полностью.

Интонатор должен давать квалифицированные рекомендации производству, связанные с изменением конструкции и технологии изготовления фортепиано. Высокое мастерство и талант настоящего интонатора делают его одним из ведущих творческих работников в производстве фортепиано.

Интонатор — "последняя рука" в изготовлении фортепиано. Высокое доверие к интонатору в сочетании с его внутренней ответственностью является одним из главных залогов качества звучания выпускаемых инструментов.

ОБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОЛОТОЧКОВ

Поскольку длительность, величина и форма импульса силы взаимодействия между струной и молоточком зависят от свойств как молоточка, так и струны, качество молоточков не является абсолютным понятием. Другими словами, качество молоточка правильно оценивать по отношению к определенной модели фортепиано.

Действительно, многие молоточки старых пианино не дают красивого звука на современных инструментах с тяжелыми и сильно натянутыми струнами, и наоборот, старые пианино, на которых устанавливали современные жесткие молоточки, звучат довольно резко, с дребезгом.

Свойства молоточка готового фортепиано формируются при его изготовлении и интонировке. Поскольку интонировка производится с учетом всего звучащего комплекса фортепиано, оценка собственно молоточков имеет практический смысл только в отношении интонированных молоточков.

Если конструктор имеет возможность выбирать на конкретной модели фортепиано комплекты молоточков, имеющие различные массы, жесткости, форму и т.п., то он выбирает тот комплект, который в интонированном виде дает звуковой результат, наиболее близкий к требуемому от фортепиано этой модели. Это означает, что наилучшим для данной модели фортепиано оказывается комплект молоточков, требующий меньшего объема интонировочных работ. Это вполне понятно, если учесть, что интонировка, будучи необходимой, тем не менее производится разрушающими методами. Качество и надежность

полученного интонировкой звукового результата ниже, чем если бы подобный результат производился интонированными молоточками (см.: Галембо, 1980а; Гунтер, 1968).

Интонационную интонировку следует рассматривать как крайнее средство "спасения" звука; подобное явление встречается в медицине, когда хирург, опасая жизни больного, применяя паллиативную операцию, которая, не искоренив истинных болячек, дает временное облегчение.

Изучение производственного процесса показало, что интонировка обычно имеет две цели: получение равномерия в интенсивности звучания разных регистров и обеспечение плавности тембровых переходов в тех областях звуковода, в которых манура инструмента имеет разные передачи: двойные струны сменяются тройными, навьюты — навьюты и т.д.

И если достичь второй цели без интонировки невозможно, первая должна достигаться в основном на интонировке, а оптимальной технологией изготовления молоточка.

Известно, что чем жестче молоточек, тем выше максимальное значение силы его удара в жесткую опору (см.: Римский-Корсаков, Дилконов, 1952). Поскольку процесс интонировки изменяет жесткость молоточка, оставляя неизменными остальные его параметры, косвенной мерой жесткости может служить максимальное значение силы его удара в жесткую опору; эту силу в свою очередь можно оценивать по электрическому отклику встроенного в эту опору пьезопреобразователя на удар молоточка (см.: Галембо, 1985б; Ривин, 1955б; Новик, 1979).

Принцип оценки качества молоточка (равенство — оценки степени его соответствия данной модели фортепиано), предложенный акустической лабораторией ленинградской фабрики "Красный Октябрь", основан на измерении величины отклика пьезоэлемента на удар по нему испытываемого интонированного молоточка в сравнении с таким же ударом хорошо интонированного молоточка. Чем ближе по амплитуде эти отклики, тем качественнее испытываемый молоточек.

Для практического осуществления этого способа необходимо тщательно протонировать 5—10 фортепиано данной модели в акустических условиях, типичных для их будущей эксплуатации (жилая комната, учебный класс, концертный зал и т.д.). Затем клавишный механизм этих инструментов помещают в специальный стенд (рис. 44), содержащий ложе для установки клавишного механизма и жесткую накладку со встроенным пьезопреобразователем, который может устанавливаться против каждого молоточка на таком же расстоянии, как струна в фортепиано. Ударил по клавише с определенной силой, измерил пиковое значение M_{ij} электрического отклика пьезопреобразователя (i — номер молоточка в комплекте, $j = 1, 2, 3, \dots, 88$). Произо-

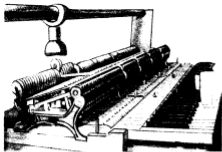


Рис. 44. Стенд для оценки молоточков рояля

ведя такое измерение для всех молоточков всех интонированных комплектов, усредняют эти значения для каждого номера молоточков, получают ряд средних значений \bar{A}_n , который для данной модели фортепиано считают эталонным.

Измерив аналогичным путем ряд ликовых значений \bar{B}_n для откликов производителя при ударах молоточков оцениваемого неинтонированного комплекта, вычисляют для каждого молоточка величину

$$\eta = 1 - \frac{\bar{B}_n}{\bar{A}_n},$$

которая была названа интонировочным дефицитом.

При $\eta_n = 0$ жесткость неинтонированного молоточка соответствует по качеству данной модели фортепиано.

Если $\eta_n > 0$, то ударная часть соответствующего молоточка имеет недостаточную жесткость и интонатор будет вынужден уплотнять ее или пропитывать застывающим раствором и т.п. Если же $\eta_n < 0$, то молоточек слишком жесткий, его необходимо интонировать разрыхлением.

Чем больше абсолютная величина интонировочного дефицита молоточка, тем больший объем интонировочных работ требуется для достижения нужной жесткости ударной части, тем меньше молоточек соответствует по качеству данной модели фортепиано.

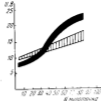


Рис. 45. Величина откликов преобразователя на удар интонированных (замерено) и неинтонированных (загнано) молоточков



Рис. 46. Испытательный набор для сравнительных измерений жесткости молоточка при ударе

Обязательным условием достоверности результатов при таких измерениях является тщательная предварительная регулировка клавишных механизмов.

В тех регистрах, в которых разные комплекты молоточков обладают значительным интонировочным дефицитом, требуется свести его к минимуму направленным изменением технологии изготовления молоточков (см. раздел "Технология" настоящей главы).

На рис. 45 в качестве примера приведен график, на котором зачернена область значений откликов преобразователя на удар интонированных молоточков кабинетного рояля "Мышьяк" (5 комплектов) и заштрихована область аналогичных значений для неинтонированных молоточков (15 комплектов). На участке $n = 1 \dots 30$ всем интонированным молоточкам соответствует увеличенный отклик. Это означает, что $\frac{\bar{B}_n}{\bar{A}_n} > 1$, $\eta_n < 0$. В этой области требуется уменьшить

жесткость молоточковой головки (уменьшением радиуса ударной части, изменением размеров войлочной заготовки или другими мерами, которые окончательно определяются анализом технологического процесса).

Темным для многих производителей является высокий положительный интонировочный дефицит дискантовых молоточков ($n = 45 \dots 88$ на рис. 45), что говорит о необходимости повышения жесткости молоточков (уменьшением радиуса ударной части, применением пропитки неударной части в заготовке клебодерживающими растворами и т.п.)



Рис. 47. Схема приспособления для статических измерений жесткости молоточков:

1 — скоба; 2 — микрометрический винт с максимальным давлением 10 Н; 3 — микрометрический винт с максимальным давлением 50 Н; 4 — держатель молоточка; 5 — молоточек; 6 — опорная пластина

Жесткость соответствия молоточков определенной модели фортепиано на основании описанного метода может быть оценена количественно. Например, для оценки в пятибалльной системе может быть применена формула

$$K = 5 \left(\frac{\delta_{10}}{\delta_{50}} \right) \left| \frac{\bar{A}_{10} - \delta_{10}}{\bar{A}_{50} - \delta_{50}} \right| = 5 \left(1 - \eta_{10} \right) \left| \frac{\eta_{50}}{\eta_{10}} \right|$$

Усредняя эту оценку по регистру или по комплексу молоточков, можно получить соответственно оценку качества молоточков в определенном регистре или полном комплекте.

Представленный способ дает возможность оценивать молоточек, действующий реальным клавишным механизмом, с учетом требований, предъявляемых к звучанию фортепиано данной модели. Но иногда возникает необходимость сравнить жесткость молоточковых головок относительно к модели фортепиано (например, сравнить молоточки различных изготовителей без привязки к отдельному клавишному механизму).

Динамическая жесткость молоточковой головки может быть оценена резонансным методом (см.: Рокин, 1972; Назок, 1979). Керн молоточка жестко связывается со столом вибростенда, колеблющемся с переменной частотой, а вершина ударной части соединяется с пьезопреобразователем. Чем больше жесткость ударной части, тем выше будет частота резонанса, определяемая по максимуму сигнала пьезопреобразователя.

Сравнение жесткости ударной части молоточков может производиться также по отклику пьезопреобразователя на удар молоточка, производимый с помощью испытательного копра (рис. 48). Молоточек при этих измерениях находится в стандартном зажимном приспособлении, а пьезопреобразователь встраивается в станину копра в месте удара.

Жесткость головки может быть измерена в статическом режиме. Для таких измерений применимо приспособление на базе микрометра, описанное выше (см. рис. 38). Схема усовершенствованного устройства для статических измерений жесткости ударной части молоточков изображена на рис. 47. Устройство состоит из скобы 1 с двумя микрометрическими винтами 2 и 3, причем ручка винта 2 рассчитана на предельное усилие 10 Н (при большем усилии она проворачивается), а ручка винта 3 — на предельное усилие 50 Н. С винтом 2 жестко связан держатель 4 молоточка 5. Если предельным усилием винта 2 прижать молоточек к пластине 6, связанной с винтом 3, а затем повернуть ручку винта 3 до проворачивания, то по показаниям на шкале микрометра можно определить деформацию сжатия головки, а зная предельные усилия винтов, — ее жесткость.

Способ сравнения различных молоточков выбирает, исходя из решаемой задачи и имеющихся технологических возможностей.

Глава V. СТРУНЫ

"Струна — тонкая, сильно натянутая гибкая нить с равномерно распределенной по длине плотностью" (ФЭС, 1966). Это определение описывает простейшую колебательную систему, на примере которой удобно демонстрировать и анализировать явления механических колебаний.

Но в музыкальных инструментах нет идеально тонких и гибких струн, стержни струн не обладают абсолютной жесткостью, поэтому и колебания струн в действительности носят достаточно сложный характер.

Идеальные струны, если они имеют одинаковую массу, длину и натяжение, звучат совершенно одинаково. Реальные струны жестки, а значит, большое значение для качества звука приобретают физико-механические свойства материала струны и ее диаметр. Вообще говоря, именно отклонения от идеальности придает звукам струн определенный "характер", делая их на хорошие и плохие, создавая то или иное разнообразие, которое до сих пор служит предметом многочисленных исследований.

В фортепиано струны служат первичным источником звука, в буквальном смысле слова "задает тон", полностью определяя высоту звука и оказывая значительное влияние на его тембр.

СТРУННАЯ ПРОВОЛОКА

В XVIII в. струны фортепиано изготавливались из железа или латуны, обладали ограниченной прочностью, длительной и интенсивной релаксацией, поэтому выдерживали лишь небольшое натяжение и издавали вялый, слабый, дребезжащий звук.

С XIX в. в фортепиано используется струнная проволока из стали. В настоящее время струнная проволока изготавливается по специальной технологии, которая несколько различна у разных изготовителей, но каждому из них соблюдаются с большой точностью, так как к струнной проволоке предъявляются высочайшие требования. Одной из лучших в мире по праву считается продукция фирмы "Resonay" (ФРГ).

В отечественной промышленности требования к струнной проволоке регламентируются ГОСТ 15508-70 "Проволока стальная струнная". Кратко прокомментируем с точки зрения качества звучания фортепиано эти требования.

Овальность — мера нарушения радиальной симметрии сечения струны, определяемое отношением как "Разности между наибольшим и наименьшим диаметром одного сечения", не должна превышать 0,008 мм. Собственные колебания сечения струны имеют не одну основную частоту, а некоторую полосу основных частот, наибольшая и наименьшая из которых определяются наименьшим и наибольшим диаметром сечения. Это приводит к искажению вышней, дающей звук фальшивому. Например, струна длиной 60 мм, диаметром 0,8 мм и основной частотой колебаний 4000 Гц при овальности 0,01 мм создаст биения частотой около 2 Гц; биения такой частоты отчетливо ощущаются слухом. Прочность струны должна быть достаточной, чтобы не допустить разрыва струны при настройке и эксплуатации фортепиано. Этот параметр характеризуется величиной временного сопротивления разрыву, т.е. напряжением в керне струны в момент его разрыва; это напряжение должно составлять не менее 2,3% ГПа для проволоки толщи 1,4 мм, 2,8 ГПа для проволоки толщиной 1 мм и 2,8 ГПа для промежуточных толщин струнной проволоки.

Естественное требование к струне — высокая степень упругости. Она согласно действующему стандарту характеризуется минимальным напряжением, при котором остаточная деформация составляет 0,01% длины напряженного участка струны. Этот так называемый условный предел упругости составляет обычно около 50% напряжений, при котором проволока разрывается. Практически во всех современных фортепиано напряжения в материале струн третьей и четвертой октавы лежат выше условного предела упругости. Таким образом, струны верхней регистры работают в условиях повышенной вероятности появления неупругих деформаций и связанного с ними уменьшения надежности настройки. Учитывая, что напряжения в струнах дополнительно возрастают на местах ее изгибов у опор и под действием ударов молоточка при игре, логично считать, что напряжения струн в современных фортепиано, особенно в верхнем регистре, предельны для применяемого материала струнной проволоки.

Стандартом предусмотрены также требования пластичности струнной проволоки, чистоты поведенности и т.д.

Высокие требования к струнной проволоке связаны также с однородностью физико-механических свойств струны. Если какой-либо участок струны отличается от остальных, это может привести к нерегулярности колебаний струны, появлению дополнительных собственных частот и, если неоднородность достаточно велика, к неблагоприятности инструмента. Особенно заметна неоднородность коротких дискантовых струн. Здесь длина участка струны, содержащего неоднородность, составляет относительно большую долю рабочей части струны, а потому биения, связанные с неоднородностью струнной проволоки, в большей степени ощущаются слухом. Учитывая, что крайние дискантовые звуки отличаются пониженной высотной определенностью, наличие любых дополнительных привуков делает звучание этого регистра особенно дефектным.

Исходя из этого, для достижения единства звучания все струны хора желательно изготавливать из струнной проволоки, взятой из одной бухты, так как это уменьшает вероятную разницу в физико-механических параметрах струн хора, которая, даже находясь в пределах, допустимых стандартом, может повлечь за собой ухудшение чистоты и тембра звука.

Нельзя сказать, что требования к физико-механическим параметрам струны полностью выработаны; не определен и оптимальный спектральный состав колебаний струн, позволяющий получить наилучший звуковой результат.

Потому практически всеми возможными способами струнной проволоки чаще всего ведутся путем сравнительного анализа на базе лучших образцов, зарекомендовавших себя в мировой практике производства фортепиано.

Так, работы акустической лаборатории ленинградской фабрики "Красный Октябрь" совместно с ЦНИИЧормет им. Бардина привели к выявлению некоторых существенных зависимостей акустических параметров струн от технологии их изготовления, в первую очередь термообработки, что позволило дать ряд технологических рекомендаций по достижению акустических параметров, характерных для струнной проволоки фирмы "Resonay" (см.: Гуляев и др., 1972; Писаревский, 1972).

ОБЫЧНЫЕ СТРУНЫ

Известно, что обычные струны применяются для того, чтобы получить низкие звуки, не увеличивая значительно длину струны (габариты фортепиано ограничивают такую возможность) и ее диаметр (в этом случае негармоничность возросла бы до недопустимых пределов), а также не понижая натяжения струны (это означало бы мощность звука и увеличение его негармоничности).

Навивку производят на керн, требования к которому совпадают с требованиями к гладким струнам. Поэтому материалом керна служит, как правило, та же стальная струнная проволока, что и для гладких струн.

Материал навивки в XX в. в основном определился — навивку производят чаще всего медной проволокой. Относительная мягкость и пластичность меди дает наилучшую возможность для ее плотного прилегания к керну, в то время как упругость достаточна для того, чтобы, участвуя в колебаниях керна, навивка не деформировала их в значительной степени.

Требование к обвитым струнам то же, что и к гладким, — однородность по всем физико-механическим параметрам, однако удовлетворить это требование сложнее, поскольку в данном случае большую роль играет технология навивки. Нельзя допускать попадания на струну смазки, посторонних частиц, грязи и т.д. Керн и обвиточная проволока должны быть совершенно чистыми. Навивка должна быть плотной как в радиальном направлении (прилегание к керну), так и вдоль струны (диск к витку). Натяжение обвиточной проволоки в процессе навивки струны должно меняться, составляя примерно 15 Н для тройки обвиточной проволоки и постепенно возрастая к гладкой. Натяжение керна при навивке должно быть несколько большим, чем предусмотренное мензурой для данной струны. При правильной навивке басовая струна работает как единое целое, издает отчетливый, тембрально богатый звук. Неплотная, неоднородная навивка приводит к появлению "глухих", дребезжащих и фальшивых струн.

Существует способ уплотнения навивки на готовой струне при накладке струны: перед тем как вставить вирбаль со струной в вирбальбанк, его прокручивают по направлению навивки на несколько оборотов. Хорошо изготовленная струна, однако, не нуждается в этом дополнительном приеме, а плохую струну не всегда возможно исправить таким способом, тем более что о дефекте обвитой струны узнают, как правило, по звуку, т.е. когда вирбаль уже в вирбальбанке и струна натянута.

Удобны методы объективного контроля качества обвитых струн, с помощью которых можно было бы до установки в пианино исключить из производства дефектные (дребезжащие, фальшивые и "глухие") пока не разработаны. Замена дефектной струны в готовом инструменте требует больше времени, чем ее изготовление. Кроме того, при замене струн неизбежно ослабление посадки вирбали, снижение надежности настройки. Поэтому необходимо с особым вниманием относиться к выполнению вышеописанных (в принципе несложных) требований, чтобы обеспечить выпуск только качественных обвитых струн.

Н.А. Дьяконовым (1964) описан способ оценки жесткости струны,

состоящий в изгибе струны в кольцо определенной длины, фиксации кольца зажимом стыков, склеива кольца постоянным грузом и измерение деформации кольца при склеивании.

Ошибочно считать, что таким методом можно исключить из производства дефектные струны. Метод нагруженного кольца, как показала проверка в акустической лаборатории фабрики "Красный Октябрь", во-первых, несовременен из-за низкой воспроизводимости результатов, а во-вторых, оценивает среднюю жесткость струны, в то время как основные ее дефекты чаще определяются локальными неоднородностями механических параметров. Указанный метод при условии тщательного соблюдения идентичности условий измерения может быть применен, по-видимому, только для сортировки бездефектных струн по их жесткости, чтобы направленно варьировать жесткость струны в экспериментах в области акустики, конструкции и технологии формирования.

Фальшивое звучание отдельной струны в фортепиано может иметь множество причин, в том числе и не связанных с качеством самой струны:

- 1) дефекты проволоки;
- 2) неплотность навивки басовых струн;
- 3) неправильное положение струны на штеге;
- 4) отсутствие положительного давления на штеге;
- 5) неплотность посадки штафта штега;
- 6) плохая приклейка штега;
- 7) неправильная нарезка жорнов на штеге;
- 8) ржавчина на струне;
- 9) отсутствие глушения нерабочей части струны;
- 10) вторичные колебания других предметов или деталей фортепиано;
- 11) неровности на штабке рамы или графа (неправильная установка рабочей части струны);
- 12) ослабление струны по колодестру (мало давление на колодестру)

Поэтому, прежде чем снимать струну для замены, следует убедиться в том, что именно струна является источником дефекта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ

Еще Аристотель знал, что "струна двойной длины дает звук, в котором колебания занимают вдвое большее время"; другими словами, период собственных колебаний струны пропорционален ее длине: $T \sim L$.

М. Мерсенн (1686) экспериментальным путем установил, что период собственных колебаний струны (T) обратно пропорционален квадратному корню из ее натяжения (F), а также, что две струны, различаю-

идется только погонной массой, колеблется с периодами, пропорциональными корню квадратному из их погонных масс (m_L):

$$T = \frac{1}{\sqrt{gT}}, \quad T = \sqrt{m_L}.$$

Высота звука при собственных колебаниях струны впервые была полно исследована в 1715 г. английским математиком Бруком Тейлором. Он использовал для вычисления периода колебания струны формулу, которая называется формулой Тейлора и лежит в основе расчета мензур струнных музыкальных инструментов:

$$T = 2L \sqrt{m_L / T}.$$

Конечно, формула Тейлора не совсем точна, если применять ее к реальным фортепиано. На частоту собственных колебаний струны дополнительно влияют ее жесткость, условия крепления и пр. Однако эти факторы не вносят в формулу Тейлора ошибок, с которыми следовало бы считаться при расчете мензуры фортепиано.

Для гладких струн формула Тейлора может быть упрощена в целях практического применения. Учитывая, что $m_L = \frac{\pi \rho d^2}{4}$, где d – диаметр

струны и ρ – плотность материала струны, получим:

$$T = 2L \sqrt{\frac{\pi \rho}{T}}; \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\pi \rho}};$$

$$T = \pi \rho f^2 d^2 L^2.$$

Подставив в последнюю формулу значение $\rho \approx 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, получим ее упрощенный вариант для расчетов в СИ:

$$T = 2,42 \cdot 10^{-7} f^2 d^2 L^2.$$

Применяя единицы измерения, традиционные для расчетов мензур фортепиано (длина и диаметр, мм), вычисление натяжения (Н) следует производить по формуле

$$T = 2,47 \cdot 10^{-7} f^2 d^2 L^2.$$

Пример расчета для струны ля первой октавы ($f = 440 \text{ Гц}$, $d = 0,95 \text{ мм}$, $L = 415,5 \text{ мм}$):

$$T = 2,47 \cdot 10^{-7} \cdot 440^2 \cdot 0,95^2 \cdot 415,5^2 = 75,8 \text{ Н}.$$

Перейдем к расчету погонной массы струны с одной наливкой. Пусть диаметр ядра равен d_1 , обмоточной проволоки – d_2 , плотность материала ядра – ρ , обмоточной проволоки – ρ_1 . Тогда диаметр кольца наливки будет равен $(d + d_1)$, а длина кольца $\pi(d + d_1)$. Масса одного кольца наливки получится равной

$$m_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \rho (d + d_1) + \frac{\pi^2 d_1^2 \rho_1}{4} (d + d_1).$$

Единица длины струны при плотной наливке содержит $1/d_1$ колец наливки общей массой $\pi^2 \rho_1 d_1 (d + d_1)/4$. Учитывая массу ядра, получим выражение для погонной массы струны:

$$m_L = \frac{\pi}{4} [\rho d^2 + \pi \rho_1 d_1 (d + d_1)].$$

Отсюда натяжение струны с одной наливкой может быть вычислено по формуле

$$T = \pi L^2 f^2 [\rho d^2 + \pi \rho_1 d_1 (d + d_1)].$$

В СИ, учитывая массовые величины $\rho = 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_1 = 8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, после некоторого упрощения получим

$$T = 2,42 \cdot 10^{-7} L^2 f^2 [d^2 + 3,6 d_1 (d + d_1)].$$

При измерениях в традиционных единицах (T , Н, размеры струн, мм)

$$T = 2,47 \cdot 10^{-7} L^2 f^2 [d^2 + 3,6 d_1 (d + d_1)].$$

Приведем без доказательства формулу для вычисления натяжения струны с двойной наливкой:

$$T = \pi L^2 f^2 [d^2 \rho + \pi d_1 \rho_1 (d + d_1) + \pi d_2 \rho_2 (d + d_2)].$$

где d_1 , ρ_1 , d_2 , ρ_2 – соответственно диаметры и плотности первой и второй обмоточной проволоки. Если материал обеих наливок одинаков ($\rho_1 = \rho_2$), то формула упрощается:

$$T = \pi L^2 f^2 [d^2 \rho + \pi \rho_1 (d_1 + d_2) (d + d_1 + d_2)].$$

В СИ с учетом вышеуказанных величин ρ и ρ_1 получим

$$T = 2,42 \cdot 10^{-7} L^2 f^2 [d^2 + 3,24 (d_1 + d_2) (d + d_1 + d_2)].$$

Хотя формула Тейлора довольно проста, полные расчеты мензуры фортепиано достаточно трудоемки; их возможно значительно облегчить, применяя специально градуированные логарифмические линейки (ком.: Plotina, Fenner, 1875) или ЭВМ.

НЕГАРМОНИЧНОСТЬ ФОРТЕПИАННЫХ СТРУН

Мы уже говорили в главе 1, что классические (с математической точки зрения) звуки не обладают истинно музыкальной красотой, а красивейшие звуки фортепиано и других музыкальных инструментов имеют далеко не классическое строение; в этом мы все более убеждаемся по мере их объективного изучения.

Решение дифференциальных уравнений, описывающих поперечные колебания идеально гибкой однородной струны, закрепленной концами

на неподвижных острых опорах, показывает, что такая струна будет совершать гармонические колебания, основная частота которых зависит от физических-механических параметров струны и вычисляется по формуле Тейлора, а частоты остальных элементарных колебаний находятся с основной частотой в отношениях последовательных целых чисел, т.е. составляют гармонический ряд. Таким образом, поперечные колебания идеальной струны состоят из бесконечного набора синусоидальных колебаний с частотами, кратными основной частоте. Эти синусоидальные колебания называются гармониками, и частоты их подчиняются соотношению

$$f_n = n f_1,$$

где f_1 — частота 1-й гармоники (основного тона); n — целое число, номер гармоника.

На практике струны не являются идеально гибкими; изгибая жесткость струны определяется модулем Юнга материала струны и ее конструкцией.

Жесткость реальной струны при ее изгибе больше у краев струны, возле ее опор, нежели в середине. Изгиб коротких участков струны требует больших усилий, нежели изгиб длинных. Это означает, что при колебании на частотах выше гармоник жесткая изгибая жесткость струны играет большую роль, чем при колебаниях на основной частоте. Из-за этого наряду с прочими причинами спектр колебаний коротких дискантовых струн почти не содержит слышимых обертонов.

Расчет главной струны, имеющей модуль упругости материала E , диаметр d , длину L , натяжение T и частоту основного тона f_1 , дает следующую приближенную формулу для вычисления частоты n -го частичного тона собственных колебаний (см.: Young, 1952):

$$f_n = n f_1 (1 + \delta n^2), \text{ где } \delta = \frac{\pi^2 d^2 E}{128 L^3 T}.$$

Таким образом, спектр фортепианного звука не содержит гармоник, а состоит из основного тона и обертонов, обладающих некоторой негармоничностью, определяемой δ основным из вышеприведенной формулы.

Отклонение высоты обертона от гармонического ряда называется негармоничностью обертона. Его удобно измерять в центах.

Если δ — негармоничность в центах, то

$$\frac{f_n'}{n f_1} = 2^{\delta/1200} = e^{\delta/1200 \ln 2} = 1 + \frac{\delta}{1731}.$$

Сравнивая это выражение с предыдущей формулой, получим

$$\frac{\delta}{1731} = \frac{\pi^2 d^2 E}{128 L^3 T}, \text{ или } \delta = 8n^2.$$

$$\text{где } \delta = \frac{1731 \pi^2 E d^2}{128 L^3 T} = \text{коэффициент негармоничности.}$$

Если учесть, что согласно формуле Тейлора

$$T = L^2 \rho \omega^2 a^2,$$

а также подставить в формулу известные значения плотности и модуля Юнга стали

$$\rho = 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad E = 1,9 \cdot 10^{11} \text{ Па},$$

то получим простую формулу для вычисления коэффициента негармоничности в СИ:

$$\delta = 3,3 \cdot 10^5 \frac{d^2}{L^2 f_1^2},$$

или, применяя традиционные для производства фортепиано единицы измерения,

$$\delta = 3,3 \cdot 10^{11} \frac{d^2}{L^2 (\text{мм}) f_1^2},$$

Например, струна 1-й октавы пианино диаметром 0,95 мм, длиной 415,4 мм, частотой основного тона 440 Гц имеет коэффициент негармоничности обертонов

$$\delta = 3,3 \cdot 10^{11} \frac{0,95^2}{415,4^2 \cdot 440^2} = 0,51.$$

Поэтому пятая гармоника для данной струны будет повышена на $\delta = 0,51 \cdot 5^2 = 13$ центов, и, строго говоря, эту составляющую спектра колебаний уже нельзя назвать гармоникой, это — пятый частичный тон собственных колебаний (или четвертый оберток), обладающий негармоничностью 13 центов.

Расчет коэффициента негармоничности басовых струн довольно сложен.

Экспериментами Г. Флетчера установлено, что коэффициент негармоничности обвитых струн с одинарной или двойной навивкой при плотности ядра $\rho = 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и плотности обмоточной проволоки $\rho_1 = 8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ можно с достаточной для практических целей точностью вычислить по приближенной формуле (см.: Fletcher, 1964)

$$\delta = 19,8 \cdot 10^4 \frac{d^2 (\text{мм})}{D^2 (\text{мм}) f_1^2 (\text{Гц}) L^2 (\text{мм})}$$

или в традиционных для промышленности единицах измерения

$$B = 39,8 \cdot 10^4 \frac{v^2 (\text{см}^2/\text{сек})}{D^2 (\text{мм}) f_1^2 (\text{Гц}) L^2 (\text{мм})}$$

В этих формулах L — длина навитой части струны, D — общий диаметр струны.

Для понимания явления негармоничности и управления им при конструировании фортепиано важны некоторые выводы, следующие из приведенных формул:

1. Основной тон ($n = 1$) жесткой струны имеет несколько большую частоту, чем основной тон идеальной гибкой струны, частота которого определяется формулой Тейлора. Это отклонение частоты устраняется настройкой. Поэтому чтобы точнее вычислять частоты негармоничных составляющих собственных колебаний настроенной реальной струны, используется уточненная формула

$$f_n^2 = n^2 f_1^2 (1 + n^2)(1 + \beta)$$

2. Поскольку завывание основного тона составляет β центов, более точный подсчет завывания n -й гармоника в спектре настроенной струны составляет $B(n^2 - 1) = B(n - 1)(n + 1)$ центов. Если учесть, что n -я гармоника соответствует $(n - 1)$ -му обертону, вычисление негармоничности k -го обертона следует производить по формуле

$$k\beta = 8k(k + 2)$$

3. Отклонение частоты частного тона собственных колебаний струны от гармонического ряда растет пропорционально квадрату номера частного тона. Поэтому особое значение имеет негармоничность базовых струн, так как в этом регистре ванду большого количества обертонов их негармоничность с достижением $k = 30-35$ иногда превышает 150-200 центов, т.е. полтора-два тона, а то время как их частотный диапазон соответствует области наилучшей слышимости. Кроме того, основной тон и низшие обертоны в спектрах базовых звуков фортепиано выражены слабо. Высота ощущение в этом регистре базируется в основном на разностных тонах (см. главу II), частоты которых близки к частоте основного тона. Эти разностные тоны в комбинациях низших обертонов имеют меньшую частоту, чем в комбинациях обертонов высоких порядковых номеров. Одновременно прослушивание многочисленных разностных тонов различных частот создает некоторую высотную неопределенность, которая тем больше, чем больше негармоничность. Слишком низкая высотная определенность крайних базовых звуков в особенности свойственна малогармоничным пианино.

4. Отклонение частоты обертона от гармонического ряда уменьшается обратно пропорционально напряжению струны.

5. Отклонение частоты обертона от гармонического ряда растет пропорционально четвертой степени величины диаметра струны.

Предположим, струна с основной частотой f_1 , диаметром d и натяжением T снята с инструмента, а вместо нее установлена струна большего диаметра $d_1 > d$, т.е. $d_1 = \alpha d$, $\alpha > 1$. Если эта струна настроена на precisely частоту, то согласно формуле Тейлора ее напряжение $T_1 = \alpha^2 T$.

Негармоничность обертонов у снятой струны пропорциональна $\frac{d^4}{T}$, у новой струны $\frac{d_1^4}{T_1} = \frac{\alpha^4 d^4}{\alpha^2 T} = \alpha^2 \frac{d^4}{T}$; поскольку $\alpha > 1$, то $\frac{d_1^4}{T_1} > \frac{d^4}{T}$;

это значит, что получение той же высоты звука на струне большего диаметра приводит к росту негармоничности пропорционально квадрату величины диаметра.

Негармоничность обертонов — неотъемлемое свойство фортепианных звуков, и полное ее отсутствие привело бы к заметной для слуха потере естественности, “живости” и “теплоты” звучания фортепиано. Чрезмерная же негармоничность искажает звук, делает его резким, уменьшает его высотную определенность.

Поэтому рояли выгодно отличаются от пианино меньшей негармоничностью в нижнем регистре вследствие большей длины струн. По данным Р. Янга, негармоничность базовых струн пианино примерно в два раза больше, чем у концертного рояля, а для первых единичных басов концертного рояля негармоничность в два раза меньше, чем у концертного рояля (см.: Young, 1954).

В среднем и в верхнем регистрах междуры различных фортепиано отличаются незначительно, поэтому звуки роялей в этих регистрах (выше 4а первой октавы) не очень различны по звукам пианино по степени негармоничности. На рис. 48 приведен график, отражающий значения коэффициентов негармоничности струн пианино “Ноктерн”.

Измерение негармоничности колебаний фортепианных струн, проведенные многими исследователями на разных моделях роялей и пианино (см.: Fletcher, 1964; Young, 1954; 1962), позволяют считать следующее:

- в базовом регистре негармоничность в целом уменьшается с увеличением номера хора;
- наименьшая негармоничность колебаний характерна для тонких обвитых струн в области перехода к гладким струнам;
- наибольшая негармоничность свойственна коротким дискантовым струнам.

Следует упомянуть также и другие факторы, кроме изгибной жесткости струны, влияющие на негармоничность компонент спектра колебаний струны.

Негармоничность колебаний струн фортепиано, вычисленная для условий абсолютно жестких опор струны, может быть понижена опти-

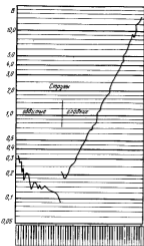


Рис. 48. Коэффициент негармоничности струны пианино "Ноктюрн"

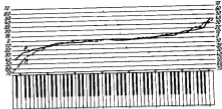


Рис. 49. Усредненные кривые Райлобена для роялей (P) и пианино (П)

молоточка о струну резко увеличивается ее натяжение, что влечет за собой кратковременное повышение всех частотных тонов собственных колебаний, которое исчезает сразу после отрыва молоточка от струны и установления в ней стоячих волн.

Настройка фортепиано производится в равномерно-темперированном строе и начинается с области темперирования, лежащей в средней части звукового диапазона (первая и вторая октавы). После этого настройка производится октавными или двухоктавными интервалами вниз (к басовому регистру) и вверх (к дискантовому). Настройка октавного интервала основана на достижении совпадения основного тона верхнего звука интервала и первого обертона нижнего звука интервала. Однако ввиду негармоничности обертона октава, настроенная без биений, оказывается расширенной, в результате чего основные частоты звуков нижнего регистра получаются ниже, а верхнего регистра — выше расчетных частот равномерно-темперированного строя. График практических отклонений основных частот звуков фортепиано от значений, определенных тонким математическим расчетом (так называемая кривая Райлобена), приведен на рис. 49. Легко увидеть, что строй роялей в нижнем регистре нестраивается ближе к равномерно-темперированному строю, чем у пианино, что объясняется меньшей негармоничностью звуков этого регистра у роялей. На графике сплошная кривая представляет усредненные значения отклонений для 18 концертных роялей, а пунктирная — для 12 пианино (см.: Mc Fargin, 1975).

Поскольку различные фортепиано отличаются друг от друга мензурой, жесткостью деки и т.д., можно сказать, что каждый инструмент характеризуется индивидуальным отклонением основных частот по

мальной конструкции деки (см.: Римский-Корсаков, Делкасов, 1952; Вэйлу, 1969).

Сдвиг частот отдельных обертонов может происходить не только по вине неоднородности струны. Источником дополнительных негармоничных частотных тонов могут быть также продольные колебания струны, отражения изгибных волн от концов навивки. Однако составляющие спектра, вносимые этими источниками, имеют сравнительно малую интенсивность.

Кроме негармоничности колебаниям струн фортепиано свойственна небольшая девиация всего спектра частот в переходном процессе атаке звука. Сущность этого процесса состоит в том, что при ударе

Рейлебаху. Поэтому верен и обратный вывод: если хороший мастер строит настроен фортепиано, то, измерив отклонения частот по Рейлебаху, можно с их помощью охарактеризовать жесткость колебательной системы фортепиано: чем больше отклонения, тем жестче система.

На практике считается правильным при конструировании пианино добиваться уменьшения негармоничности обертонов. Усредняя кривые по Рейлебаху для нескольких хорошо настроенных пианино каждой модели, можно сравнить эти модели по рациональности конструкции: чем ближе полученный строй к равномерной-темперированному (горизонтальная прямая), тем удачнее сконструировано пианино.

Глава VI. ДЕКА

Сложной формы анизотропная неоднородная изогнутая пластина переменного сечения, снабженная различными по механическим свойствам и направленным ребрами жесткости, с неодинаковыми условиями крепления краев, нагруженная неравномерно распределенной, изменяющейся в процессе движения нагрузкой, — вот приблизительный физический "портрет" дека фортепиано. Строгий теоретический расчет колебаний реальной дека фортепиано невозможен; для приблизительных расчетов приходится пользоваться упрощениями — считать дека однородной, имеющей правильную форму, постоянное сечение и т. д. (см.: Остроумов, 1938). Такие эквивалентные математические модели хотя и позволяют выявить некоторые закономерности в колебании дека, все же слишком далеки от реальности, чтобы стать основой для прикладного конструкторского расчета. Последнее слово в поиске лучших технических решений принадлежит производственному эксперименту.

В этой главе излагаются основные представления о функциях, свойствах и режиме работы дека, необходимые для обеспечения логической направленности, корректности постановки, а также и результативности эмпирического поиска при производственных экспериментах. Основное содержание главы состоит в обобщении положительного опыта по изготовлению высококачественных дек, в описании некоторых методов контроля параметров дек, применяемых при производственных экспериментах.

ДЕКА КАК УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ ЗВУКА

При колебаниях струны воздух успевает сгибаться ее и почти не вовлекается в колебательное движение. Поэтому звук отдельной струны обладает низкой интенсивностью и неопределенной направленностью.

Когда колебания струны передается декой, воздух вовлекается в колебания по всей площади дека; колебания большей масс воздуха

создают достаточно сильный звук. Таким образом, дека распределяет создаваемое струной давление по большой площади; в этой функции она скорее согласующий каскад между высоким механическим сопротивлением струны и низким сопротивлением воздуха, нежели усилитель в обычном понимании, известном из электротехники. В фортепиано увеличение мощности звука происходит не путем добавления энергии от внешнего источника, а повышением скорости расхождения энергии струны на излучение звука.

Если споры струны абсолютно жестки, то скорость затухания ее колебаний определяется в основном физико-механическими параметрами струны, а длительность колебаний — количеством энергии, полученной струной от молоточка при их соударении. Если же в колебания вовлекается дополнительный потребитель энергии — дека и связанные с ней относительно большие массы воздуха, процесс расхождения энергии ускорится, затухание колебаний уменьшится. Внесение декаей затухание тем больше, чем она податливее, т. е. чем меньше сопротивление она оказывает воздействию колеблющейся струны.

Уменьшение механического сопротивления дека способствует увеличению амплитуды ее колебаний. Таким образом, если дека оказывается слишком податливой, звук фортепиано получается громким, но коротким, если сопротивление дека слишком велико, звук будет долгим, но тихим.

Поэтому механическое сопротивление дека, которое зависит от ее толщины, материала, внутренних напряжений, конструктивных параметров, должно быть таким, чтобы звуки фортепиано обладали приемлемыми балансом громкости и длительности.

Осуществление процесса затухания звука фортепиано, играющего важную роль в формировании качества звучания инструмента, будут изложены в главе VII.

Поскольку громкость и длительность звука фортепиано определяется единицей затраченной энергии, ее бесконтрольный потерь следует тщательно избегать. Неправильное крепление краев дека, неоднородность ее материала, повышенные внутренние трение в нем, избыточная связь струн с декой, чрезмерный отток энергии в нерабочие части струн и в опорные конструкции уменьшают мощность фортепианных звуков. Конструкции дека, технология ее изготовления и установки в инструмент должны обеспечивать максимальный коэффициент полезного действия дека.

Механическое сопротивление дека сложным образом зависит от частоты ее возбуждения. Однако вопреки привычным представлениям на области электронных усилителей, одной амплитудно-частотной характеристикой невозможно описать преобразование спектра колеблющейся струн в фортепиано. Частотная характеристика дека видоизменяется в зависимости от расположения на ней точки возбуждения.

там ближе расположена эта точка к геометрическому центру деки, тем ярче выражены в ее частотной характеристике высокие частоты.

На основании рассуждений об "идеальной деке" многие авторы сходятся на том, что дека должна иметь равномерную частотную характеристику в максимальном диапазоне частот, так как, если дека в своей частотной характеристике содержит резонансные пики, то спектр колебаний струн будет видоизменяться по-разному для разных звуков, что нарушает тембровое единство инструмента.

На практике дека фортепиано не только не имеет равномерных частотных характеристик, но и не может их иметь по своей конструкции. Более того, особенности частотной характеристики деки, выраженные ее резонансными пиками, способствуют подчеркиванию в звуках определенных спектральных областей, придает инструменту индивидуальность (см.: Володин, 1972). Так, опыт применения "настройки" деки роллой, т.е. формирования заранее заданных собственных резонансов деки, показывает, что роллы с одинаково "настроенными" деками во многом сходны по звучанию.

ДЕЧНАЯ ДРЕВЕСИНА

Известно, что опытные музыкальные мастера издавна отбирают древесину для резонансных дек музыкальных инструментов по тому звуку, который издает дощечка при легком постукивании по ней.

При этом мастер обычно захватывает дощечку между большим и указательным пальцами примерно на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины дощечки от ее верхнего края, а стучит по ней кончиком пальца или суставом согнутого пальца другой руки.

Слушая отклик дощечки, мастер определяет "способность" древесины к резонансу" по отчетливости тонального признака: если тон "звенящий", т.е. ярко выраженный по высоте, то древесина качественная, если постукивание по дощечке вызывает в основном шумовой отклик, обладающий низкой степенью высотной определенности, то такая древесина для изготовления дек музыкальных инструментов качества высокого качества считается непригодной.

На рис. 50 приведены спектры звуков, получаемых ударом пальца по деревянным дощечкам. Одна из них изготовлена из румынской ели и была отобрана опытным мастером для изготовления скрипичной деки, вторая изготовлена из ели неизвестной породы и определена мастером как низкокачественная.

Из рисунка видно, что звуковой отклик дощечки, изготовленной из качественной древесины, отличается наличием в спектре узких и высоких резонансных пиков, превышающих в приведенном случае уровень близлежащих по частоте составляющих шумового отклика примерно на 20 дБ. Это обеспечивает наличие в звуковом отклике до-

щечки ясно выраженного собственного тона. Забравленная мастером еловая дощечка (это очевидно из отгибающей спектра ее отклика) не обладает собственной ярко выраженной частотой, что служит основанием мастеру считать эту дощечку непригодной для изготовления деки (см.: Фирт, 1976).

Отборную древесину, предназначенную для изготовления резонансных деки для музыкальных инструментов, называют дечной, или резонансной. Второе название, вероятно, родилось на основании выше описанного старинного способа отбора дощечек с наиболее явными тональными откликами.

Чтобы обладать наилучшим с точки зрения мастера откликом, древесина должна объективно характеризоваться высоким модулем упругости, малой плотностью и низким внутренним трением. Исследования, проведенные в конце 30-х годов Научно-исследовательским институтом музыкальной промышленности (НИИМП, Ленинград) на упрощенных моделях деки, показали, что коэффициент полезного действия такой деки приблизительно пропорционален величине

$$\frac{1}{E_0} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}$$

где E — модуль упругости материала; ρ — его плотность; E_0 — логарифмический decrement затухания колебаний в деке.

Поэтому критерием акустического отбора дечной древесины при изготовлении высококачественных пианино и роллей считается акустическая константа, или константа излучения: $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

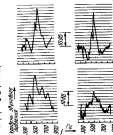


Рис. 50. Отгибающие спектров звуковых откликов отбрана различной древесины на возбуждение ударом: а — для отбрана румынской ели, отобранного мастером для изготовления деки; б — ель — суставом согнутого пальца; в — ель — кончиком пальца; г — для отбрана ели неизвестной породы, забракованного мастером; а — суставом согнутого пальца; б — кончиком пальца

Затухание колебаний деки происходит частично за счет внутреннего трения в древесине. Чтобы учесть это, использует более сложный критерий качества древесины:

$$C^* = C \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

где δ — логарифмический декремент затухания собственных колебаний образца древесины.

Измерение внутреннего трения в древесине обычно производят исследованием параметров свободных или вынужденных колебаний образца древесины. При этом различными исследователями в зависимости от применяемого способа измерений используются разные косвенные меры внутреннего трения:

— $\lg \delta = Q^{-1}$, где δ — сдвиг фазы между напряжением и деформацией при упругих колебаниях образца; Q — величина, аналогичная добротности электрического резонансного контура;

$\Delta f/f$ — ширина резонансной кривой, где Δf — отклонение от резонансной частоты f , при котором амплитуда вынужденных колебаний уменьшается в 2 раза;

$\frac{\Delta W}{W}$ — рассеяние энергии за один период колебаний.

Для сравнения результатов различных исследований следует пользоваться соотношением, связывающим различные меры внутреннего трения:

$$\lg \delta = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta f}{f} \sqrt{T} = Q^{-1}.$$

Измерение акустической константы включает в себя измерения плотности и модуля упругости.

Измерение плотности ρ сводится к измерению объема V и массы m дощечки. При этом

$$\rho = m/V; \quad V = \Delta a b,$$

где l — длина дощечки; a — ширина дощечки; b — толщина дощечки.

Модуль упругости древесины можно измерять резонансным (Ринский-Корсаков, Дьяконов, 1962), ультразвуковым и другими методами, обзор которых дан И.М. Пиццком (1981). Экспериментально доказано, что древесина, отобранная хорошим мастером, оказывается высококачественной и по объективным показателям (Fukada, 1960). Тем не менее нельзя сказать, что акустическая константа является полным и универсальным критерием качества материала деки. В частности, для однонаправленной сортировки деки древесины необходимо принимать во внимание ее реологические свойства, которые примени-

тельно к музыкальным инструментам до сих пор не изучены. Исследования переходных процессов при звукообразовании, активно проводящиеся в последние годы, позволят установить новые, более совершенные критерии оценки качества древесины, применяемой для изготовления деки музыкальных инструментов (см.: Пиццк, 1980).

Остаются желать лучшего и методы измерений акустических параметров резонансной древесины. Сложность и трудоемкость этих методов не позволяют пока применять их в производстве (исключение — индивидуальное, еще реже — серийное изготовление роялей и пианино высшего качества).

Перспектива упрощения методов акустических испытаний древесины лежит, с одной стороны, в создании специализированных станков, а с другой — в исследовании древесины с целью установления количественных соотношений между параметрами E , δ , Δ .

Последнее требует пояснения. Известно, что модуль упругости, плотность и внутреннее трение не являются полностью независимыми величинами. При повышении плотности эла, как правило, увеличивается ее модуль упругости, и существует приближительная формула, отражающая эту взаимосвязь (см.: Ринский-Корсаков, Дьяконов, 1962). Недавно японские исследователи установили новые количественные соотношения между параметрами E , δ в древесине различных пород и для различных направлений — продольного, радиального, тангенциального (см.: ONO, Nogimoto, 1984). Результаты подобных исследований, уточненные применительно к резонансной древесине, могли бы значительно упростить определение качества древесины за счет уменьшения количества измеряемых величин.

Для изготовления деки музыкальных инструментов применяется древесина хвойных пород, обладающая высокой по сравнению с другими породами акустической константой. В табл. 2 указаны плотности, модуль упругости и константы излучения для основных хвойных пород древесины, используемой в настоящее время, а также перспективных для использования в качестве деки (по данным технической литературы).

В настоящее время в нашей стране деки фортепиано изготавливаются исключительно из эли, хотя пихта кавказская, кедр сибирский, отборная ель достаточно близки к эли по акустическим свойствам.

Кавказская пихта, как показали исследования, проведенные Тбилисским НИИ лесной промышленности совместно с ленинградской фабрикой "Красный Октябрь", по акустической константе превосходит обычно применяемую карельскую ель, а рояли с деками из кавказской пихты получают более качественными по звучанию (см.: Аргамашвили, 1979). Кроме того, кавказская пихта достигает в диаметре ствола более одного метра, что обеспечивает высокий полезный выход древесины. Таким образом, пихта кавказская представляет

Название породы древесины	ρ , кг/м ³	$E \cdot 10^{-4}$, Па	$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, м ² /кг·с	Источник данных
Пихта кавказская	330—350	102—180	10—17	Римской-Корсаков, Дельнов, 1952;
Сосна восточная	360—400	85—95	11—14	Аргавалев, 1975;
Сосна кедровая	350—500	70—150	10—14	Римской-Корсаков, Дельнов, 1952;
Сосна сибирская	350—450	70—85	9—13,5	То же
Пихта сибирская	350—450	85—70	8,5—12	"
Сосна (сибирская)	400—500	100—210	8,5—13,5	"

собой ценный материал, рекомендуемый для изготовления дек фортеллиано высшего качества.

Большого внимания заслуживает и древесина сибирского кедра. Сейчас она не применяется для изготовления дек фортеллиано, да и ГОСТ 6900—83, регламентирующий технические условия на деревянные заготовки для дек музыкальных инструментов, ограничивает разрешение к применению породы древесины елью и пихтой кавказской, допуская применение сибирского кедра лишь по согласованию с потребителем.

В свете задан экономного расходования дефицитной ели следует расширить применение кедра сибирского в качестве резонансной древесины для палино массового производства. Заготовки же из ели и кавказской пихты следует полностью подвергать сортировке по внешним признакам и по акустическим параметрам. При этом лучшие заготовки должны идти на изготовление дек фортеллиано высшего класса, остальные же могут использоваться в массовом производстве. Польза такой сортировки несомненна. В массовом производстве отсутствуют многие специальные технологические операции, применяемые в индивидуальном производстве инструментов высшего качества (подбор однородных дек, "настройка" дек, точная регулировка струн и т.д.), поэтому случайное использование в массовом производстве заготовок с высокой акустической константой не дает заметного улучшения качества звучания и является лишь расточительностью по отношению к материалу, нехватка которого остро ощущается в производстве фортеллиано высшего качества.

Поскольку вдоль волокон древесины имеет максимальный модуль упругости, распиловка бревен на доски должна быть радиальной. В правильно выпиленной дощечке годовые слои перпендикулярны плоскости дощечки, а на торце параллельны кромке (рис. 51). Откло-



Рис. 51. Идеальное расположение годовых слоев в распиленной дощечке



Рис. 52. Угол наклона годовых слоев на торце распиленной дощечки

нение от такого расположения (в результате неправильной распиловки или вследствие естественных особенностей структуры древесины) понижает акустическую константу.

ГОСТ 6900—83 допускает некоторые отклонения от идеального расположения годовых слоев в дельных заготовках радиальной распиловки, которые следует хорошо себе представлять при визуальном отборе материала.

Угол, определяемый на торце между касательной к годовым слоям посередине ширины и толщины заготовки и плоскостью (рис. 52), должен составлять не менее 60° (идеально 90°).

Радиальный наклон волокон, вычисляемый как d/b (рис. 53), не должен превышать 1% для концертных роялей и 5% для роялей кабинетных, салонных, а также пианино.

В табл. 3 приведено понижение модуля упругости и акустической константы древесины при различной степени отклонения от идеального радиального наклона волокон.

Из табл. 3 видно, что модуль упругости значительно снижается даже при небольшом отклонении волокон от идеального направления. При наклоне волокон 15° модуль упругости понижается более чем в два раза. Это соответствует понижению акустической константы в 1,44 раза, что аналогично замене дощечки из лучшей ели на плохую сосновую.



Рис. 53. Радиальный наклон волокон в распиленной дощечке

Таблица 3

Радиальный наклон волокон		Показание модуля упругости, %	Показание акустической константы, %
град.	%		
0	0	0	0
3	3,6	2,2	1,1
3	5,2	6,6	2,8
4	7,0	8,3	4,6
5	8,7	11,6	5,9
6	10,5	16,7	8,7
8	14,1	26,0	14,0
10	17,8	36,5	20,3
15	26,8	55,9	34,3
20	36,4	68,7	45,0

Примерно такое же снижение акустической константы наблюдается при возрастании наклона волокон в других направлениях. Поэтому отбор материала для дек высококачественных и дорогих инструментов обычно производится более строго, чем это предусматривает действующий стандарт.

Доказано, что ширина годовых слоев резонансной древесины или, обладающей лучшими акустическими свойствами, составляет 0,5—1 мм. Светлая древесина содержит меньше смол, поэтому считается лучшей, чем темная. Внешним осмотром проверяются также требуемые стандартом равномерность, прямослойность, отсутствие сучков и прочих дефектов структуры.

Опытные мастера всегда старались готовить деку не просто из хорошей резонансной древесины, но и взятой из одного бревна; в этом заключалось их акустическое стремление сделать деку максимально однородной по своим акустическим свойствам. Неоднородности деки вызывают дополнительные отражения волн при их распространении и соответственно дополнительные потери энергии и уменьшение мощности звука, искажают форму волны, ухудшая тембр.

Однородность деки играет не меньшую роль в обеспечении качества звучания, чем качество каждой отдельной дековой дощечки. Поэтому следует рекомендовать — и здесь это оправдано ценой — сохранить комплектность резонансных дощечек, выпиленных из одного кряжа, при поставке их лесозаводами предприятиям, производящим деки музыкальных инструментов. Такой подход к решению вопроса качества дек наиболее полезен именно в массовом производстве, где нет возможности производить подбор однородных дек с помощью трудоемких акустических измерений. Если производится акустический подбор заготовок для дек высшего качества, то комплектная поставка дощечек, выпиленных из одного кряжа, не только значительно снижает

трудоемкость необходимых акустических измерений, но и улучшает результат подбора, так как деки получаются однородной по большому количеству параметров. Легко понять, что деки более однородны, если они подобраны как заготовки, сходных не просто по акустической константе, но и по каждому составляющему ее параметру — модулю упругости и плотности. При этом более важной является однородность по признаку плотности, она входит в акустическую константу в третьей степени, в то время как модуль Юнга — только в первой.

Изготавливать деки из древесины, выдержанной десятилетиями, — привилегия лучших фирм, заботящихся о перспективе. Выдержанная древесина более свободна от смолистых веществ, обладает большей стабильностью физико-механических параметров, меньшей плотностью, деки из нее меньше подвержены воздействию влажности окружающей среды. Выдержанная резонансная древесина в отличие от свежей, по данным исследований, имеет меньшее внутреннее трение на молекулярном и некоторых других специфических особенностях, особенно свидетельствующих о полноте ее применения (см.: Порванков, 1980; Пашек, 1981).

Многие фирмы, изготавливающие фортепиано, в том числе и предприятия нашей страны, в силу различных исторических и технических обстоятельств не имели возможности запасать резонансную древесину на много лет вперед. Не все исследователи считают, что обязательно выдерживать лучшую резонансную древесину по полвека, как это делала, например, фирма "Стейнвейл"; некоторые изготовители ограничивают срок выдержки несколькими годами (см.: Порванков, 1980).

Имеется данные, что некоторые полезные свойства выдержанной древесины можно достичь за более короткий срок специальными видами обработки — влажностным и радиационным. Однако методы искусственного старения древесины пока еще считать полностью разработанными для практического применения.

Рипки выполняют функцию ребер жесткости, деки деки способны выдерживать давление струн. Кроме того, поскольку поперек волокон древесины колебания распространяются медленно, чем вдоль волокон, рипки, которые обычно располагаются под прямым углом к направлению волокон резонансных дощечек, способствуют быстрому распространению колебаний по всей площади деки, повышая тем самым ее акустическую однородность. Поэтому в высококачественных деках рипки изготавливают из такой же древесины, какая идет на изготовление резонансного щита, и отбирают по тем же критериям.

О КОНСТРУКЦИИ

История фортепиано знает немало изобретений в области конструкции деки. Это и дополнительная дека в декантовом регистре для того, чтобы увеличить его звучность, и различного рода объемные резонанс-

Рис. 54. Диск разной толщины на 8-миллиметровой диатризматической деке виолы



ры для увеличения отклика деки в определенных частотных областях, различные рычажные устройства и пр. Деки пытались изготавливать из металлов и пластмасс, покрывать поверхность, изменять способы крепления и пр. Все попытки радикального изменения традиционного решения конструкции деки не имели успеха, и последние сорок лет различия в деках разных изготовителей касаются в основном тонких нюансов конструкции и технологии, которые могут свидетельствовать только о большем или меньшем внимании разработчиков к обеспечению высокого качества звучания фортепиано.

Форма и размеры деки определяются в основных чертах формой и габаритами фортепиано. Толщина щита деки фортепиано в ее центральной части обычно лежит в пределах 8–11 мм. Возвращаясь деки с постоянной толщиной щита по всему полю, некоторые изготовители делают щит деки в базовой части более тонким, компенсируя этим повышенную жесткость участка, на котором сходятся и базовый, и дискантовый штеги.

В 1940 г. были опубликованы результаты исследований, проведенных фирмой "Стейнвей", доказывающие преимущества деки, которую в литературе стали называть диатризматической (рис. 54).

Особенностью этой деки является параболическое уменьшение толщины щита от центра к периферическим областям. Таким способом достигается уменьшение жесткости деки вблизи ее неподвижного контура, что приводит к увеличению эффективной площади деки, к более равномерному вовлечению в колебания всех ее участков. Утончение щита "диатризматической" деки возле ее контура может составлять до 40% (см.: Vithuber, Johnson, 1940). При этом уменьшение массы деки составляет до 7%, а статической жесткости в центре деки — до 20%; такое понижение жесткости делает деку более чувствительной к воздействию статического давления струн и требует очень внимательного отношения к обеспечению правильной величины друкса струн, в котором речь пойдет ниже.

Штег представляет собой брусок из древесины твердых пород, изогнутый соответственно требованиям манеры инструмента и служащий для передачи деке колебаний струн. Базовый и дискантовый штеги могут быть как отдельными, так и соединенными. Поскольку штег колеблется вместе с декой, внутренне трение в нем является не-

тонокром потерь энергии колебаний. Поэтому изготовление штегов из фанеры, практически всегда в массовом производстве пиано, не следует допускать при изготовлении инструментов высокого класса. Верхняя часть штега, соприкасающаяся со струнами, представляет собой деревянную наклепку на твердой древесине с направленным волоком приблизительно по направлению струн. Наклепка служит для предотвращения штега от расслабления штифтами и для обеспечения более надежного контакта со струнами. В дискантовом регистре, где увеличение давления струн на штег и частота колебаний относительно велики, наклепку рекомендуется изготавливать из древесины повышенной твердости, например самшита.

Высота штега у его вершины обычно составляет 32–45 мм, ее уменьшение ограничивается необходимостью обеспечения достаточной прочности штега, подвергнувшегося поперечному воздействию напряженных струнами штифтов. Однако в нижней части, где штег прикладывается к щиту деки, он снимает ее подвижность, особенно на высоких частотах, где дека колеблется малыми участками. Поэтому некоторые изготовители уменьшают площадь контакта щита деки со штегом, сужая штег у основания до 22–24 мм. Повышенную жесткость дискантового участка деки можно несколько компенсировать постепенным уменьшением высоты штега от середины к крайним дискантам; при этом, естественно, требуется соответственное понижение уровня опор струн на чугунной раме.

Расчетами НИИМПа (см.: Остроумов, 1938) установлено, что отклик деки в области частот основных тонов дискантовых звуков может быть увеличен правильным выбором расстояния между рипками, в результате которого возникает подъем амплитудно-частотной характеристики деки на частоте собственных колебаний межрипных участков деки; эта частота увеличивается с уменьшением расстояния между рипками и площадью их поперечного сечения, а также с увеличением толщины щита деки.

Позднее Мюллер теоретически показал возможность корректировки частотных характеристик дек путем изменения высоты и расположения рипок. Эти работы дают интересное направление для производственных экспериментов, которые пока еще не проводились (см.: Müller, 1990; Müller, Klüger, 1980).

ДРУК

Струна фортепиано жестко прикрепляется на чугунной раме. Вблизи от одной из точек крепления струна опирается на штег резанной деки, край которой жестко связан через опорные конструкции с чугунной рамой. Для обеспечения более плотного контакта струны со штегом на нем имеются два металлических штифта. Рабочая часть

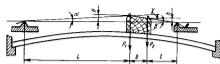


Рис. 55. К вычислению давления струны на деку

струны ограничивается порошком или зграфом на передней части чугунной рамы и передним штифтом штега. Нерабочая часть струны находится между задним штифтом штега и порошком на задней части рамы или рамным штифтом, если порошок отсутствует.

Важно, чтобы колебания рабочей части струны достаточно полно отражались от ее опор: отток энергии в нерабочие части струн должен быть минимальным. Порожки и зграфы дают довольно хорошее отражение, "отсеку", как принято говорить среди производителей. Податливой деревянный штег с тонкими штифтами, способными со временем расшатываться, не гарантирует столь жесткой связи со струной, именно поэтому и нужен на штеге перегиб струны, который создает вертикальные (рассматривается модель с декой, расположенной горизонтально, как в рояле) составляющие силы натяжения струны. Эти вертикальные составляющие P_1 и P_2 приложены к точкам штега у переднего и заднего штифтов соответственно и вычисляются по формулам, которые легко вывести из рассмотрения рис. 55:

$$P_1 = T \left(\frac{H}{L} + \frac{H-h}{b} \right); P_2 = T \left(\frac{h}{L} - \frac{H-h}{b} \right),$$

где T — сила натяжения струны; H — превышение передней кромки штега над линией опор струны; L — длина рабочей участка струны; h — превышение задней кромки штега над линией опор струны; T — длина нерабочего участка струны; b — расстояние между центрами заднего и переднего штифтов на штеге.

Суммарное давление

$$P = P_1 + P_2 = T \left(\frac{H}{L} + \frac{h}{L} \right).$$

С другой стороны, если перейти на угловые величины, получим:

$$P_1 = T \sin \alpha; P_2 = T \sin \beta.$$

Так как углы α и β , как правило, не превышают $3-4^\circ$, с точностью не ниже 0,4% можно считать:

$$P = P_1 + P_2 = T(\sin \alpha + \sin \beta) = T \sin(\alpha + \beta) = T \sin \gamma = T \gamma.$$

Таким образом, каждая струна давит на штег с силой $P = T \gamma$, где T — натяжение струны; γ — вертикальный угол перегиба струны на штеге.

Величины, связанные с давлением струны на деку, в производстве традиционно называют "друком" (нем. "давление"). Употребление этого термина не упорядочено. Поскольку непосредственное измерение давления струн на деку в производственной практике не применяется, друком часто называют линейную величину превышения передней кромки штега над линией, соединяющей струнные опоры (H на рис. 55).

Встречаются и применения термина "друк" к другим величинам, которые связаны с давлением струны (угол вертикального перегиба струны на штеге, превышение воображаемого продолжения рабочей части струны над опорой ее нерабочей части на раме).

Поэтому, встречая в литературе упоминания величины друка, следует правильно представлять себе, о какой конкретной величине идет речь. Авторская информация, опыт мастеров по производству и ремонту фортепиано убедительно доказывает, что вопрос о друке тончайшим образом связан с проблемой качественного звукообразования в фортепиано. Однако конкретные сведения по вопросу установления оптимального друка, содержащиеся в технической литературе, весьма скудны. Конечно, различия в конструкциях моделей фортепиано не позволяют дать однозначные и универсальные количественные рекомендации. И все же необходимо понимать, какими соображениями следует руководствоваться, определяя оптимальные величины друка в каждом конкретном случае.

Давление струн на деку должно быть минимальным, но достаточным для того, чтобы струна при колебаниях сохранила постоянный контакт со штегом. По данным А.Н. Ривина, амплитуда переменного давления на деку колеблющегося хора струн не превышает 40–50 Н. Цель установки друка — не допустить, чтобы эта сила превышала силу, притягивающую струны к штегу, в противном случае контакт струн со штегом может нарушиться. Это значит, что угол вертикального перегиба струны на штеге для хора струн, натянутого, например, с силой 2200 Н, не должен в готовом инструменте быть меньше величины

$$\frac{40 \dots 50}{2200} = 0,018 \dots 0,023 \text{ радian} = 1 \dots 1,3^\circ.$$

Такой подход к выбору оптимальной величины друка согласуется с наблюдениями американских мастеров (см.: Stokes, 1955), свидетельствующим, что наиболее часто встречающимся на практике давлением струн на деку в пересчете на одну струну оставляет для разных моделей фортепиано от 18 до 35 Н.

А.Н. Ривин (1951) рассчитал, что при среднем натяжении хоры $T = 2200$ Н и расстоянии между задней и передней штафами $b = 18$ мм превышение передней кромки штага над задней ($M - N$) в среднем регистре пианино должно составлять примерно 0,4 мм, а в дискантовом 0,25–0,3 мм. В этом случае струна при колебаниях не будет отрываться от передней кромки штага. Превышение задней кромки штага над линией струнных опор следует выбирать так, чтобы угол наклона верхней поверхности штага не превышал угла наклона нерабочей части струны, так как в противном случае струна не будет прилегать к штагу по всей его поверхности. Поэтому в басовом и среднем регистрах пианино превышение над линией струнных опор для задней кромки штага должно составлять приблизительно 1,25–1,5 мм, а для передней соответственно 1,5–2 мм. В дисканте из-за уменьшения длины струны эти превышения также уменьшаются, достигая в крайнем дисканте величины 0,5–0,7 мм для задней кромки и 0,8–1 мм для передней.

Вышесказанные рекомендации соответствуют оптимальному давлению струн на деку в готовом фортепиано. Каким же должно быть начальное, установочное значение превышения штага над линией струнных опор, чтобы после натяжения струн, штаг, спустившись, занял рекомендуемое положение?

Прежде всего начальное превышение должно быть таким, чтобы при натяжении струн не получалось передекаливание одних участков дека при слабом давлении на другие. Следует учесть, что в среднем регистре, где дека более податлива, давление струнной одежды на деку должно быть меньше, чем в дискантовом регистре, где дека менее податлива.

Резкие скачки давления между соседними участками штага, как показано в работе Биллубера и Джонсона, способствуют неравномерному распространению колебаний по полю дека, уменьшая мощность ее излучения (см.: Billuber, Johnson, 1940).

А.Н. Ривин рекомендовал начальное превышение штага над линией струнных опор в пианино выбирать таким образом, чтобы вертикальная составляющая давления струн для всех хоров была приблизительно одинакова (тогда в среднем регистре, где интервалы между хорам на штаге увеличены, давление струнной одежды получится меньше, чем в дискантовом регистре).

Для этого, по расчетам Ривина, необходимо, чтобы угол вертикального перегиба струны на штаге был одинаковым для всех хоров (имеется в виду струна еще не натягивая, так как речь идет о начальном, задаваемом фрезерованием превышении штага над линией опор струны). Практически при расчете начальную величину угла γ принимают (по Ривину) равной Z' ; больший угол может привести к "паровалу" дека, к созданию обратного кювола.

Учтя, что $Z' = 0,062$ рад, получим формулу для вычисления начального превышения H_0 передней и K_0 задней кромки штага над линией струнных опор:

$$H_0 = \frac{\Delta (0,032 + K)}{L + T}; \quad K_0 = H_0 + K,$$

где K — превышение передней кромки штага над задней, которое согласно вышесказанным рекомендациям равно приблизительно 0,4 мм для басового и среднего регистра 0,25–0,3 мм для дискантового регистра.

Если следовать контролю установки джука по Дилкёнову (1954) превышениями линейки, установленной на штаг, над струнным штапиком и струнной пластиной ($H_{ш}$ и $K_{ш}$), то эти параметры получаются из H_0 следующими вычислениями:

$$H_{ш} = H_0 + \frac{K}{b} L; \quad K_{ш} = K_0 - \frac{K}{b} (b + L).$$

Определив H_0 и K_0 либо $H_{ш}$ и $K_{ш}$, можно задать профиль фрезерования штага при выполнении резонансных работ.

Однако вышесказанные расчетные величины являются лишь приближенными. Изготовив по ним опытный инструмент, следует измерить окончательно величины джука λ , если какие-то участки штага окажутся выше или ниже, чем требуется, внести коррективы в высоту заготовки штага.

Только такая кропотливая работа дает в результате надежный резонансный узел, отвечающий предъявленным к нему требованиям. Трудность таких экспериментов вызвана тем, что опускание любой точки штага сложным образом зависит от давления всех струн и статической жесткости дека на всех ее участках. Поэтому, например, излишнее опускание какой-либо участка штага вызовет еще всего не ошибки в фрезеровании именно этого участка, а завышением других участков штага и связанной с этим неравномерностью нагружения дека. В одной из работ акустической лаборатории Ленинградской фабрики "Красный Октябрь" показаны примеры анализа деформации штагов при натяжении струн (см.: Галимбо, 1980б). Подобный методика анализа может быть рекомендована разработчикам новых моделей фортепиано для направленного изменения джука с целью достижения его оптимальных значений.

Высоту фрезерования штага в массовом производстве обычно контролируют относительно уровня струнных опор чугунной рамы, принятой и принятой струбиднами к футору с декой. По специальному шаблону в контрольных точках штага, имеющего достаточный припуск по высоте, делаются пропилы, после чего раму снимают и штаг фрезеруют на глубину пропилов. При такой технологии следует быть уверенным, что в готовом инструменте чугунная рама, уже принятая

струбцинами, а штургами и болтами, займет точно такое же положение относительно штега, как при его фрезеровании. Анализ производства показывает, что пренебрежение этим правилом является основной и типичной причиной получения неравномерно нагруженных дек и отрицательного друк струн. Особенно немедленными, как правило, оказываются при фрезеровании штега на готовом инструменте условия пружина центральных участков рамы. Такая серьезная ошибка в производстве может свести на нет любые старания разработчиков по оптимизации давления струн на дек.

Тщательная обработка величини друк невозможна без методов и средств его измерения. Отечественная промышленность, к сожалению, до сих пор не оснащена специальными приборами для измерения линейных или угловых величин, характеризующих давление струн на дек фортепиано. С другой стороны, автору неоднократно приходилось встречать более или менее остроумно сконструированные приборы, изготовленные мастерами или исследователями для собственных нужд и называемые "друкмерами", в то время как учебник по производству фортепиано рекомендует несовершенные методы измерения друк, например с помощью обыкновенных линеек (см.: Дьяконов, 1954), что не дает достаточной точности.

Американская фирма "Pacific Piano Supply Co" в числе прочих приспособлений и инструментов для фортепианных мастеров предлагает потребителям и друкмер конструкции Дж. Каттла (рис. 58). Прибор сконструирован на базе индикатора часового типа, имеет среднюю подвижную ножку, алюминиевый или стальной корпус. Цена дублика индикатора 0,0005, что приблизительно соответствует 0,01 мм. Друкмер маркирует как положительное, так и отрицательное значение превышения средней ножки, устанавливаемой на струне над штегом, над уровнем крайних ножек, устанавливаемых на той же струне по обе стороны штега.

Исследователи фирмы "Стейнвей" (см.: Виллбер, Джонсон, 1946) применяли прибор, принцип работы которого основан на оптическом измерении отклонения направления рабочей и нерабочей частей струны от горизонтали.

Фирма "Болдуин" (CIBA) использует для измерения степени перегиба струны на штеге простой друкмер, который содержит с каждой стороны по три опоры, расположенные на одной прямой. Одна сторона, средняя опора которой равно удалена от крайних, служит для измерений на гладких струнах, другая, с несимметричным расположением опор, — для измерений на обмотках струнок. Друкмер устанавливается на струну таким образом, чтобы средняя ножка находилась на штеге, а крайние — на рабочей и нерабочей частях струны. Принцип оценки перегиба струны заключается в изменении зазора между одной из ножек друкмера и струной. Если друк положительный, то измерится



Рис. 57. Друкмер В. Разумова

Рис. 58. Друкмер Дж. Каттла

величина зазора над нерабочей частью струны, если же друк отрицательный, то измерится зазор над штегом. Измерение производится стандартным набором шупов от 0,001 до 0,05" (приблизительно 0,25—1,25 мм). На стороне друкмера, служащей для измерений на гладких струнах, опоры стоят друг от друга на 1" (25,4 мм). На другой стороне расстояние между опорами составляет 1 и 0,75" (25,4 и 19 мм).

В акустической лаборатории фабрики "Красный Октябрь" также были разработаны и изготовлены друкмеры (см. Галембо, 1978б; 1980а), принцип действия которых ясен из фотографий и схематических изображений. На рис. 57 приведена фотография друкмера, сконструированного В. Разумовым на базе механического угломера. На рис. 58 и 59 изображены друкмеры на основе индикаторов часового типа, имеющие постоянную и переменную базы измерителя.

В НИКТИМПе в последние годы для исследований друк разработан друкмер на основе двух индикаторов часового типа, позволяющий одновременно оценивать перегиб струн на передней и задней кромках штега.

Несмотря на общее назначение (измерение косвенных характеристик давления струны на дек), все перечисленные приборы измеряют различные величины: углы (оптический прибор П. Виллбера, друкмер В. Разумова), превышение штега над близлежащими точками струны (друкмер "Пасифик"), величину зазора между ножкой друкмера и струной (друкмер "Болдуин") и т.д. Все эти приборы достаточно удобны при сравнительных измерениях (чаще всего необходимых в производственной практике), однако для определения абсолютных значений давления струны на дек, превышения штега над линией струнных опор или углов перегиба струн на штеге эти приборы пре-

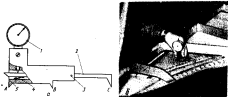


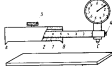
Рис. 59. Друкмер с vernиной базой измерения на основе индикатора часового типа:
 1 — устройство друкмера; 2 — рычаг; 3 — ось вращения рычага; 4 — грузик; 5 — корпус; А, В — опоры; С — подвижной конец рычага; 6 — измерение друкмером

гонами, если пользоваться формулами пересчета или номограммами, которые индивидуальны для каждого типа друкмера.

Самым удобным и точным из приборов, используемых в настоящее время в производстве для непосредственного измерения превышения штага над линией струнных опор, является универсальный куполомер, описание которого приводится в следующем разделе. Куполомер обладает большей точностью, чем малогабаритные друкмеры, однако в функции друкмера он может успешно использоваться только при открытом доступе к струне по всей ее длине. Поэтому измерения в готовом плане проводится малогабаритными друкмерами, а то время как до сборки корпуса куполомер, а также на ролях удобно пользоваться куполомерами. Каждый из описанных выше приборов имеет свои преимущества и недостатки (см.: Галенко, 1978б), анализ которых позволит творческим работникам выбрать наилучший вариант или разработать еще более совершенные друкмеры, необходимость в которых существует в промышленности.

Когда Фортелиано изготовлено, изменить друк струн перефретированным штагом уже невозможно. На головке фортелиано существует возможность регулирования друк резонансными болтами; к сожалению, этот прием крайне редко используется нашими массовыми производствами. Причиной тому — сложность этой операции, связанной с большими затратами времени, и отсутствие четкой и последовательной методики такой регулировки. Н.А. Дьячкова (1964, с. 79) лишь упоминает, что, регулируя положение болта, можно в известных пределах изменить высоту рамы в средней части. Эти болты зна-

Рис. 60. Схема друкмера с переменной базой измерения на основе индикатора часового типа:
 1 — корпус; 2 — датчик с микрометрической шкалой; 3 — фиксатор датчика; 4 — фиксатор индикатора; А, В — опоры; С — окончание индикатора; винту — контрольный пластина



чительно облегчают регулировку так называемого друк — угла наклона струн на штагах".

Выясвет, что регулировка положения чугунной рамы — единственный шанс устранить дефекты друк; рассмотрим эту операцию более подробно (рис. 60).

Если определено, что на некотором участке штага вблизи резонансового болта друк отрицателен, то резонансовый болт вворачивают в шпильку, если давление струн слишком велико, — выворачивают. При этом надо не забывать перед передвижением рамы ослабить винт крепления рамы к резонансовому болту, а перед каждым контролем друк снова затянуть этот винт. При проведении такой регулировки может быть рекомендован элементарный и операльный способ контроля друк, применявшийся ленинградским фортепианным мастером А.И. Смирновым. Средством контроля служит "шаблон" — деревянная пластинка, оббитая несколькими слоями плотной бумаги; количеством слоев можно легко регулировать толщину "шаблона".

На рис. 60,б схематично изображено взаимное расположение опор нерабочей части струны. При положении 1 рамы друк отрицателен. Когда вликает резонансовый болтом рама переходит в положение 2, то дека начинает испытывать давление со стороны струны лишь тог-



Рис. 60. К регулировке друк деформированной чугунной рамы:
 а — крепление рамы резонансным болтом; б — схема контроля друк с помощью "шаблона"

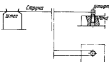


Рис. 81. К прищету крепления струны роleta "Болдуин"

да, когда друк станет положительным. Поэтому перед вращением резонансового болта следует между ближайшей к регулируемому участку штепа рейкой и шпирделем футора поместить с небольшим натягом описанный "шаблон", подобрав соответствующую его толщину. Затем с помощью резонансового болта, как описано выше, рама перемещается от положения I к положению II с контролем натяга после каждого полуоборота болта до тех пор, пока "шаблон" станет выниматься с трудом. Это означает, что, выравняв языком мастеров, "струна легла на штеп". Расставив "шаблон", вынимают его, подстраивают инструмент и после этого оценивают изменение звука.

Наряду с традиционным способом регулировки друка изменением положения центральных участков чугунной рамы существует множество изобретений по регулировке друка с помощью перемещения деки, штепа, установки специальных пружинок и т.д. Эти изобретения не получили применения, за исключением новшества, введенного в 1966 г. фирмой "Болдуин" и используемого в ролетах этой фирмы (см.: ВВГ, 1975). Техническое решение проблемы друка фирмой "Болдуин" отличается оригинальностью и имеет ряд несомненных преимуществ, а потому требует внимательного изучения специалистами-производителями, особенно исследователями.

Традиционные конструкции предусматривают крепление струны на раме с помощью сплошного металлического штифта, впрессованного в чугунную раму под острым углом или впрессованного под прямым углом, а затем изогнутого. Остаток нерабочей части струны производится специальным порожком, который либо оплавляется вместе с рамой, либо накладывается на нее. Обычно эти порошки требуют очень тщательной обработки, особенно если конструктор стремится к определенной настройке нерабочей части струны (пример — диакантовый "колокольчик").

В отличие от этого на фирме "Болдуин" изготавливают из закаленной стали цилиндрические полые штифты (рис. 81) с внешним диаметром около 5 мм. Такой штифт впрессовывается в раму перпендикулярно плоскости струн. Струна закрепляется на таком ролике штифта либо путем перегибания струны через штифт, либо при помощи лезла. Независимо от способа крепления лезвие струны на штифт

те можно изменить в пределах свободной части штифта, находящейся над рамой. Изменение друка струны производится следующим способом. Для уменьшения друка на раму возле штифта кладется предохраняющая прокладка, и струна передвигается вверх по штифту каким-либо неострым (во избежание повреждения струны) инструментом.

Чтобы увеличить друк, струну "поднимают" сверху либо логиком ударом по тупой отвертке, либо с помощью цилиндрической полый насадки с внутренним диаметром, немного большим внешнего диаметра штифта.

Отверстия в раме под эти штифты сверлятся на расстояниях от штепа, соответствующих заранее заданным конструктором длинам нерабочих частей струн. Ролевой порожок в такой конструкции отсутствует. Для удобства расчета и измерения друка в ролетах "Болдуин" точка отсчета рабочей части струны у вертебанка (на графике или порошке) находится над декой на высоте, равной высоте штепа. Это позволяет контролировать друк только одним параметром — положением на ролике штепа. Штифт имеет продольный разрез, служащий для того, чтобы надежно впрессовывать этот штифт в отверстие чугунной рамы, которое по диаметру несколько меньше, чем штифт.

Регулировка друка в ролетах "Болдуин" производится по специальной технологической процедуре. Необходимость в перемещении рамы при этом отпадает. Если при эксплуатации фортепиано порвался струна, то инструкция по ремонту объясняет мастерам просто измерить высоту струны на штифтах для соседних гордов и взять для вновь поставленной струны среднее значение.

Описанное техническое решение проблемы установки друка позволяет добиваться необходимого распределения давления струн на деку в головном инструменте независимо от индивидуальных особенностей резонансного узла, значительно упрощая все операции по установке друка.

Регулировка друка в головном инструменте — важный резерв повышения качества и надежности звучания фортепиано.

Купол

Обычно шты деки в фортепиано придает форму сферы, или, как говорят производственники, купола, обращенного вершиной к струнам. Части опоры среди специалистов, нажим должен быть этот купол и как его величина влияет на качество фортепиано.

Выпуклая форма по сравнению с плоской делает деку более прочной, создает дополнительные условия, приемляющие деку к ее опорам, является более устойчивой при воздействиях изменений влажности и температуры воздуха или при деформациях, связанных со старением древесины.

Таким образом, купол деки прежде всего служит обеспечению надежности и долговечности резонансного узла фортепиано.

Нельзя допустить, чтобы дека под давлением струн прогнулась в сторону рипок ("отрицательный купол"). Такая дека из-за изгибов вблизи параметра имеет меньшую эффективную площадь излучения, что ухудшает звучание фортепиано. Кроме того, дека с "отрицательным куполом" менее надежна, так как подвергается постоянным (из-за давления струн) и переменным (при колебаниях струн) усилиям, направленным на срыв ее от опор на футоре.

Выпуклость деки в конструкторских расчетах характеризуется радиусом кривизны, а при прикладных измерениях — величиной, примерно равной отклонению вершины купола от плоскости опор деки ("высота купола").

Купол деки уменьшается после натяжения струн. Поэтому высота купола до натяжения струн должна быть больше, чем требуемая в готовом фортепиано, примерно на столько, на сколько опускается штег в области геометрического центра деки под давлением струнной одежды.

Существует два различных способа формирования купола деки. Первый из них состоит в одновременном выгибании до нужного радиуса кривизны штега, штегов и рипок при прикладывании их друг к другу. Дека, полученная таким образом, удерживается от распрямления только прочностью клеевых швов. Второй способ состоит во фрезеровании сопрягаемых со шитом деки поверхностей штегов и рипок до достижения кривизны, определяемой радиусом задаваемого купола, и последующей склейки деки. В этом случае купол получается более устойчивым, так как распрямлению штега деки дополнительно противодействуют силы упругости штега и рипок. Этот способ с точки зрения надежности резонансного узла фортепиано представляется более целесообразным (см.: Макарева, Бутовская, 1978).

Существуют и более "утонченные" способы формирования купола деки. Например, рипки и штег могут застрагиваться в соответствии с желаемым радиусом кривизны купола готового инструмента, а изгибание и склейка происходит в прижимных формах с радиусом, соответствующим величине купола деки до натяжения струн. В литературе отсутствуют достоверные данные о преимуществах таких утонченных методов, хотя каждый из них может быть оправдан соображениями, связанными с конкретной конструкцией, так как при различных способах формирования купола различной оказывается деки и жесткость деки.

Вряд ли можно рекомендовать какую-либо оптимальную величину купола деки фортепиано. Важно, что этот купол должен быть положительным и оставаться таким многие годы эксплуатации фортепиано.

Обычно высота купола хороших фортепиано колеблется от 1 до 6 мм; Н.А. Дьяконов рекомендует радиус кривизны задаваемого прессом (начального) купола в пределах 28—34 мм, что соответствует примерно центру деки над ее краями на величину порядка 8—12 мм.

Нельзя дать более точных рекомендаций по величине задаваемого купола деки без учета конкретной мануры, конструкции, резонансного узла, технологии его изготовления и крепления на футоре, величины превышения штега над линией струнных опор.

Изучение качественных образцов фортепиано различных изготовителей дает основание считать, что как купол, так и друк струн не должны быть чрезмерно большими (это привело бы к жесткости деки), однако величина этих параметров должна гарантировать сохранение их положительного знака в процессе эксплуатации инструмента.

Купол деки измеряется с помощью куполомера. Один из наиболее удачных вариантов этого прибора создан в акустической лаборатории фабрики "Красный Октябрь" в 1975 г. и с тех пор успешно используется в производстве. Этот куполомер (рис. 62) состоит из двух направляющих 1, двух датчиков 2 и двух щечек 3. Один из датчиков и одна из щечек снабжены иглами 4, на втором датчике закреплена индикатор часового типа 5. Датчики фиксируются на направляющих стопорными винтами 6. Направляющие выполнены из калиброванной нержавеющей стали диаметром 10 мм. Датчики изготовлены из бронзы, иглы — из нержавеющей стали. Иглы имеют кончик 7 с контрольной 8 к часовому индикатору служит для точной юстировки прибора по любой достаточно ровной поверхности. Важным условием изготовления куполомера является одновременность сверления отверстий под направляющие во всех щечках и датчиках. Индикатор должен иметь цену деления 0,1 мм и рабочий ход порядка 30 мм (такие индикаторы обычно используются в толщиномерх). Диаметр плоской вершины игл и кончике индикатора 2—3 мм. Основные размеры куполомера, применяемого на фабрике "Красный Октябрь", показаны на рис. 62.

Измерение купола деки готового пианино производится со стороны футоре (рис. 63). На фабрике "Красный Октябрь" приняты две основные методики измерения. Первая применяется при акустико-технологических исследованиях и состоит в том, что купол измеряется по всем рипкам и фиксируется графиком зависимости величины купола от номера рипки. Этот график дает наглядное представление о равномерности деформации деки под воздействием струн.

Вторая методика применяется для производственного контроля и заключается в измерении величины купола по рипке, проходящей приблизительно через геометрический центр деки. Измерение занимает 3—5 с на инструмент и может успешно использоваться в массовом производстве. Чтобы измерить величину купола, необходимо:

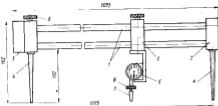


Рис. 62. Куполомер для измерения

установить базу прибора перемещением подвижной ножки таким образом, чтобы крайние ножки прибора касались щита деки по одну сторону линии вале в ее конце;

установить ножку с индикатором таким образом, чтобы она находилась возле середины длины рейки;

наибольшим углом прижать прибор всеми ножками к щиту деки и по показанию индикатора определить высоту купола деки.

Практически погрешность однократного измерения величины купола куполомером не превышает 0,3 мм. Измерение превышения штага над линией струнных опор производится аналогично измерению купола, но крайние ножки куполомера при этом устанавливаются на штабный рамы, а ножка индикатора — на штаг лизинго. Это измерение возможно на фуре с декой, но не на готовом тманино. Можно установить ножки куполомера не на опорные поверхности струн, а на саму струну. Операция измерения друка точнее и быстрее выполняется вдвоем.



Рис. 63. Измерение купола деки тманино

Для измерения на рейках базу куполомера следует увеличить до 1500—1800 мм в зависимости от модели рейки. При такой большой базе возникает опасность прогиба куполомера под собственным весом, поэтому следует снабдить его ребром жесткости и закрепить стальные направляющие титановыми трубками; длина их также должна быть увеличена в соответствии с толщиной шпирейцев рейкового фюра.

Куполомер позволяет также измерять толщину центральных участков щита деки, что другими способами осуществить довольно сложно.

Если толщина деки в двух точках, лежащих на ее краях, известна (ее можно определить, например, штангенциркулем), то толщина деки в любой точке, лежащей на прямой, соединяющей первые две точки, вычисляется по формуле

$$h = \frac{h_1 l_2 + h_2 l_1}{l_1 + l_2} + H_1 + H_2,$$

где l_1 — расстояние от более толстого края деки до точки измерения; l_2 — расстояние от более тонкого края деки до точки измерения; h_1 — толщина деки на тонком крае; h_2 — толщина деки на толстом крае; H_1 — величина кривизны деки, измеренной с ее выпуклой стороны; H_2 — величина купола деки, измеренной с ее вогнутой стороны (отрицательная величина).

Измерять величины H_1 и H_2 следует, поместив боковые ножки куполомера в точки, толщина деки в которых известна, а ножку индикатора — в точку измерения.

Описанный универсальный куполомер может быть рекомендован производителям фортепиано для технического контроля инструментов, а также для применения в конструкторских и технологических учреждениях.

КРЕПЛЕНИЕ КРАЕВ ДЕКИ

Максимальный отклик деки достигается жестким закреплением ее краев. Исследования показывают, что наиболее эффективно излучает звук часть деки, ограниченная плавным контуром, близким к эллипсу или овалу с большей полуосью, направленной приблизительно вдоль дискового штага (см.: Дьяконов, 1964, с. 160). Угловые участки прямоугольной деки, лежащие по обе стороны эллипса, неравномерно расходуется энергию колебаний и ухудшают условия образования стоячих волн в центре деки, поэтому в конструкциях фортепиано их принято изолировать жесткими брусками — заглушками. Надполнение роли заглушек, формальный подход к их конструированию является одной из причин ограничения звуковых возможностей фортепиано. Типичными ошибками многих производителей является уменьшение сечения заглушек (обычно для экономии материала) и размещение их на основании только технологических соображений (например, чтобы

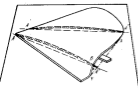


Рис. 64. К условиям закрепления деки по диаметру: линии AA' проведены для иллюстрации вытекания деки и ее утоньшения в время; участок XU соответствует наибольшему необходимому завышению опоры деки

обе заглушки в плане были одинаковыми). Это приводит к снижению жесткости заглушек и неоптимальности границ рабочей площади деки. Отток колебательной энергии через недостаточно жесткую заглушку в нерабочую часть деки или смещение границ ее рабочей площади ухудшает энергетический баланс деки, уменьшает ее полезное излучение. Заглушки являются также опорными рессор, и в этой роли оказывают значительное влияние на устойчивость формы купола деки под воздействием давления струн.

Поэтому высококачественный инструмент должен быть снабжен достаточно массивными жесткими и правильно расположенными заглушками. Расположение заглушек определяется либо расчетным путем (см.: Дьяконов, 1964, с. 160–161), либо экспериментально — по расположению хладнивых фигур на горизонтальном поле шита деки при ее искусственном возбуждении. В последнем случае заглушки должны располагаться преимущественно по узловым линиям хладнивых фигур.

Границы куполообразного шита деки не находятся в одной плоскости, так как из-за сложной формы контура расположены на различном расстоянии от геометрического центра деки (рис. 64). Если приклеить такой шит к обкладкам, расположенным в одной плоскости, то края шита, более близкие к центру деки, придется деформировать, прижимая к футору; искажение купола деки и гибкими деформациями ухудшает распространение колебаний и понижает эффективность звукоизлучения. Поэтому для достижения высокого качества звучания необходимо соблюдать правила застройки обкладок "под купол".

Зная радиус R кривизны сферической деки и измерив расстояние a_0 от вершины купола (примерного геометрического центра деки) до дальней точки ее периметра, можно вычислить необходимое превышение любой точки обкладки над дальней по формуле

$$h = \frac{a_0^2 - a^2}{2R}$$

где a — расстояние от вершины купола деки до точки обкладки, в которой определяется превышение.

Точная корректировка высоты обкладок под деку в свое время позволила знаменитой фирме "Стейнвей" повысить качество звучания концертных роялей. Здесь путем расчетного завышения участка обкладок, лежащего ближе всего к центру деки (отрезок XU на рис. 67), был ликвидирован значительный прогиб деки, изолировавший ее дискантовую часть и ухудшавший звучание в верхнем регистре.

Угол застройки обкладок должен быть таким, чтобы край куполообразной деки прижимался к обкладкам, не изгибаясь. Этот угол определяется по формуле

$$\alpha = \arcsin \frac{a}{R}$$

Если радиус R кривизны купола деки неизвестен, его определяют следующим образом:

- определяют приблизительно наивысшую точку шита деки;
- уточняют расположение этой точки, вписав окружность в контур деки;
- измеряют радиус r полученной окружности. При помощи куполомера измеряют превышение H центра окружности над ее контуром.

Превышение может оказаться разным при измерениях в различных направлениях. В этом случае искомым превышением есть арифметическое среднее результатов измерений; вычисляют радиус кривизны купола по формуле

$$R = \frac{r^2}{2H}$$

Уменьшение потерь энергии на границах деки способствует плотнее прилеганию ее торцов к корпусу, для чего требуется точная обработка деки по периметру. Кроме того, плотный контакт деки с корпусом по периметру дополнительно поддерживает ее куполообразную форму, уменьшая проседание деки под действием нагрузок.

Пренебрежение правилами закрепления краев деки (так же, как и обеспечение положительного купола и дрокки) мешает производством изготавливать фортепиано с высоким качеством звучания.

НАСТРОЙКА ДЕКИ

Если ударить по деке войлочным молоточком, каждый ее участок будет откликаться звуком низкой частоты, имеющим некоторую высотную определенность.

Рис. 65. Первое расположение центров участков настройки ровной деки



Резонансы отдельных участков деки — основа ее формантной характеристики, той характеристики, которая придает фортепиано индивидуальность звучания (см.: Володин, 1972).

Частоты этих резонансов можно регулировать, меняя толщину участков деки. Такая направленная регулировка называется "настройкой деки".

Настройка деки и контроль ее собственных тонов, извлекаемых ударом палиса или мягким молоточком, издавна знакомы музыкальным мастерам и используется в производстве щипковых инструментов высокого качества. Методика такой настройки в приложениях к концертным роялям разрабатывалась и испытывалась на ленинградской фабрике "Красный Октябрь".

Далее деки на участках и пример диаграмма собственных тонов участков, давшего устойчивый попеременный результат в качестве звучания готового рояля, представлены на рис. 65 и в нижеприведенном выводе.

Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высота тона	фа ⁺ соль	фа ⁻ соль	фа ⁻ фа ⁺	ми ⁺ ми	ми ⁻ ми	фа ⁺ фа	фа ⁻ фа	соль ⁺ фа	соль ⁻ фа

Повышение собственного тона участка деки производится уменьшением толщины середины участка строганием. Незначительное понижение собственного тона достигается утоньшением деки по ориентированному границе участка.

Звуковой отклик участков деки на ударное возбуждение воспринимается микрофоном и оценивается по высоте или высоте основного тона. Для этого удобнее всего использовать приборы, градуированные в единицах равномерно темперированной музыкальной шкалы, например прибор для настройки деки ПНД-1 (разработан МФМНИ, "Страбкоком" (США), РТ-4 (Япония)).

Приведенный пример не универсален и не может быть перенесен на любую модель рояля; он лишь иллюстрирует метод. Исследователь сам выбирает удобную для данной модели разбивку деки на участки и отыскивает оптимальные высоты настройки этих участков. Даже деки роялей одной и той же модели имеют различия в параметрах древесины, толщине цинга, штега и др. Настройка деки по образцу

позволяет значительно уменьшить влияние этих различий на жесткость участков готовой деки.

Изучение методов и результатов настройки деки роялей показало следующее:

1) настройка деки имеет смысл только тогда, когда дека подобрана из акустически однородного материала. Если дека неоднородна, то звуковые отклики ее участков на ударное возбуждение имеют низкую высотную определенность, недостаточную для тонкого контроля тонов настройки;

2) при нагрузке деки рояля струнами собственные тоны участков деки изменяют свою высоту незначительно (в пределах одного тона);

3) измерение высоты тонов настройки участков деки является удобным средством объективного контроля, позволяющим направленное изменить акустические характеристики деки и воспроизводить полученные положительные результаты.

Глава VII НЕКОТОРЫЕ ОБЪЕКТИВНЫЕ И СУБЪЕКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА ЗВУЧАНИЯ ФОРТЕПИАНО

В этой главе обобщены наиболее интересные результаты работ различных исследователей, рассматривающие отдельные объективные закономерности формирования фортепианных звуков, объясняющие специфические свойства фортепианного звука, а также обобщаются рекомендации по улучшению объективных условий работы музыкантов-исполнителей, направленные на повышение достоверности и информативности оценок при субъективных экспертных качествах.

ОСОБЕННОСТИ ЗВУЧАНИЯ СТРУННЫХ ХОРОВ

Наряду с прочими особенностями конструкции фортепиано отличается от своих предшественников и тем, что в большей части звукоряды одной клавише соответствуют две или три струны, образующие хор. Акустическая значимость этого факта долгое время ускользала от внимания исследователей, пожалуй, до тех пор, пока Д. Мартин, анализируя в 1947 г. звуки роялей, не обнаружил, что эти звуки звучат неравномерно: быстрый спад звукового давления на начальной стадии звука сменяется, как правило, значительно более медленным (см.: Martin, 1947). Это способствует новому выделению каждого последующего звука на фоне предыдущего в самых быстрых пассажах при сохранении для исполнителя возможности мажорить звуки достаточно большой длительности.

Дальнейшие исследования этого явления показали, что оно особенно на неудачной согласованности колебаний струн в хоре (рис. 66)

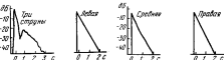


Рис. 66. Затухание колебаний корпуса струн фортепиано по сравнению с затуханием колебаний каждой струны хоры

и менее характерно для одиночных струн (см.: Benade, 1976; Weingach, 1977; Hundley, Benioff, Martin, 1978).

Представим себе, что три идеально настроенные в унисон фортепианные струны колеблются синфазно. Смещение штега окажется тогда вдвое большим, нежели при колебаниях одной струны, поэтому угроженной будет и скорость убывания энергии каждой струны (см.: Benade, 1976).

Может случиться, что фазы колебаний струн в хоры сложатся таким образом, что одна струна будет толкать штег в одну сторону, а другая — в другую и т.д.; это вызовет уменьшение амплитуды смещения штега и соответственно замедлит отток энергии от струн в деку.

Учитывая, что молоточек бьет по всем струнам хоры практически одновременно и в одном направлении, можно считать каждую их колебаний синфазным. Однако эта синфазность не сохраняется по многим объективным причинам.

Как показали исследования, унисоны не бывают идеальными. Во-первых, никакая настройка не бывает идеальной, в то время как отклонение от точности настройки унисонов даже на 1 цент приводит к заметным изменениям в форме огибающей уровня звукового давления. Во-вторых, струны хоры, даже будучи идеально настроены в унисон по основному тону, имеют незначительные различия в длине, натяжении и т.д., что приводит к несовпадению частот обертонов, обладающих негармоничностью, зависящей от жесткости струны. В-третьих, струна фортепиано колеблется не только в направлении, перпендикулярном деке, но и в параллельном ей направлении: "параллельные" колебания слабые "перпендикулярных", но затухают медленнее, так как их энергия не расходуется на "раскачивание" деки (рис. 67). В процессе звучания "параллельные" колебания могут переходить в "перпендикулярные" и наоборот, что может вызвать флуктуацию скорости затухания звука даже при колебаниях одиночной струны. В-четвертых, податливость штега связывает струны хоры в единую динамическую систему, результирующее воздействие которой на штег в точном физическом

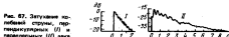


Рис. 67. Затухание колебаний струны, перпендикулярных (I) и параллельных (II) деке

рассмотрении нельзя считать простой суммой воздействий отдельных струн (см.: Weingach, 1977). В-пятых, сила удара молоточка по разным струнам хоры в действительности неодинакова, что вносит некоторую асимметрию в воздействие струнного хора на штег.

Эти, а также и другие причины ненадежной точности унисонов создают многочисленные (как быстрые, так и медленные) флуктуации фазовых и амплитудных соотношений между воздействиями на штег отдельных струн хоры. Только в начале звука эти воздействия практически синфазны, что способствует быстрому начальному затуханию звука, затем эта синфазность нарушается, и средняя скорость затухания становится сравнимой со скоростью затухания звука при одной колеблющейся струне.

Таким образом, звук фортепиано проходит две стадии: первая характеризуется быстрым затуханием, вторая — медленным. Длительность первой стадии, а следовательно, и уровень интенсивности звука, при котором происходит изменение скорости затухания, зависит от того, насколько быстро происходит рассогласование фаз колебаний струн хоры.

Первая стадия звука, образно говоря, определяет его яркость, ударный характер, а вторая как бы несет "лирическую" нагрузку.

В свете этих рассуждений объяснимо специфическое воздействие на тембр фортепиано левой (или правой) педали режиса, с помощью которой пианист может вывести одну струну хоры из зоны действия молоточка. Эта струна начинает колебаться под воздействием колеблющегося штега, причем с самого начала она колеблется в противофазе с остальными струнами хоры. Более раннее повороте противофазного воздействия на штег уменьшает длительность и относительную интенсивность начальной стадии звука, характеризующую быстрым затуханием, что приводит к субъективному эффекту уменьшения яркости, мягкости звука, придает ему более "лирическую" окраску. Это подтверждается вербальными характеристиками звучания или *crescendo*: пианисты называют его "затухающим", "завуалированным", "мягким", "лиричным" и пр. (см.: Шаленников, 1934). Традиционное мнение акустиков, согласно которому эффект левой педали сводится в основном к уменьшению интенсивности звуков, верно только для пианино, где введение этой педали ограничивает динамический диапазон инструмента, приближал молоточки к струнам. Измерения, проведенные автором для звуков кабинетного рояля "Стейнвей", в частности,

показали, что уменьшение интенсивности звуков введенным падением *legato* составляет в среднем всего 2 дБ, причем варьируется от 0 до 6 дБ для разных звуков, т.е. для некоторых звуков отсутствует совсем.

Изменчивость параметров звука в результате флуктуирующей фазовой и амплитудной соотношений в воздействии на деку отдельных струн хора в определенных пределах благоприятно влияет на тембр, придавая фортепианным звукам специфическую "живость", "теплоту" за счет многочисленных беганий, частоты которых не обуславливаются только неточностью настройки унисона.

Более того, идеально точная подстройка основных частот струн хора, как оказалось, не является идеальной с точки зрения качества звука [см.: Kirk, 1959]. Во-первых, при точной настройке звук быстрее затухает, его длительность кажется недостаточной. Во-вторых, небольшая расстройка струн в хора (порядка 2 центов), будучи слышимой малой для ощущения фальши, придает звуку ту "живость", которую музыканты часто называют "бриллиантностью" (по ассоциации с неупорядоченными, но красивыми переливами граничных алмазари).

Из зоны природы слуха следует, что существует небольшие зоны частот, внутри которых неуловимость звуков не ощущается. Два звука с частотами, лежащими в этой зоне, будут восприниматься как унисон, в то же время относительная расстройка звуков, входящих в зону такого "физиологического унисона", будет воздействовать на тембр звуков. Таким образом, в сравнении с физиологическим унисоном, предусматривающим точное совпадение частот, физиологический унисон допускает изменение тембровой окраски унисонного звучания за счет некоторой расстройки частот, если при этом сохраняется субъективный признак унисона.

Если расстройка унисона увеличивать, получаемый звуковой эффект будет средни "разливу" в звуках аккордового, которому в среднем регистре соответствует расстройка язычков примерно на 20 центов.

Расстройка такого порядка применяется в роялях для получения специфического тембра; таким приемом пользуются современные исполнители джазовой музыки в стиле рэгтайм — музыки, стоявшей у истоков джаза.

Большая акустическая значимость неидеальности унисонного звучания фортепиано особенно ярко вылилась с развитием способов электронного синтеза музыкальных звуков, выдвинувшего на первый план проблему достижения "живости" звуков. В какой-то мере это удается достичь применением фазовых, частотных и амплитудных модуляций, а также других эффектов, вызывающих появление в слышимом звуке многочисленных нерегулярностей и беганий.

ОСОБЕННОСТИ ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ И КАЧЕСТВО ЗВУКОВ ДИСКАНТОВОГО РЕГИСТРА

Дискантовый регистр является слабым звеном многих фортепиано. Высокое качество звучания дискантов, как правило, бывает признаком фортепиано высокого класса, ибо в этом регистре фортепиано, образно говоря, работает на пределе возможностей; поэтому добиться красивых дискантов можно только использованием всех конструкторских и технологических резервов, соблюдением всех рекомендаций, изложенных в предыдущих главах.

Объективно дискантовые звуки в сравнении с другими звуками фортепиано характеризуются высокой степенью нестационарности; они содержат наиболее быстрые и многочисленные переходные процессы; объективно — атака дискантового звука сопровождается ясно слышимым шумом, который может повлиять качество звуковых регистров и даже затруднить его настройку.

Тщательное временное развитие спектральной структуры дискантового звука поясняется синграммой (рис. 68, в). Его можно разделить на три характерных этапа. АБ — многочастотный шум малой интенсивности, предшествующий удару молоточка о струну и проводящий от стука пальца о клавишу к звукам соударения деталей клавишного механизма. БВ — начинается с удара молоточка по струне и состоит из шума, интенсивность и ширина полосы которого резко нарастает в начале и падает в конце этапа. На фоне этого маскирующего шума возникают тональные составляющие — основной тон и небольшое количество обертонов. На участке ВГ тональные составляющие почти свободны от шумового окружения, однако медленно ослабевающий низкочастотный шум небольшой интенсивности продолжается почти до полного прекращения звука.

Если с помощью электронных модуляторов (например, Гауссова умножителя типа 5823 фирмы "Броль и Кьер") выделить и слушать отдельно начало звука, соответствующее участку АБ,

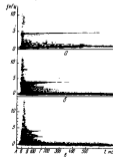


Рис. 68. Синграммы звуков до 64 октавы фортепиано, расположенные в порядке повышения качества

по этой фрагмент будет восприниматься как щелчок. Фрагмент звука, соответствующий участку ВВ, напоминает звук ксилофона. Звучание фрагмента ВГ, отделенного от остальных этапов звука, ассоциируется с флейтой и имеет четкую высокую определенность.

Музыканты-эксперты, говоря о высоком качестве дискантового регистра фортепиано, чаще всего отмечают крайнюю остроту и высокую высокую определенность, особенно ощущаемую при исполнении быстрых пассажей.

Плоские дисканты называют "оплывшими", "стучащими" и т.д. Замечено, что крайняя острота и низкая высокая определенность проявляются, как правило, совместно.

В основе этих дефектов лежит, как показывают исследования, неоптимальное распределение энергии, сообщаемой молоточком струне (см.: Галембо, 1978а). Часть энергии молоточка в виде широкополосного импульса передается через короткий участок струны опорным конструкциям, формируя шумовой призывок; другая часть превращается в энергию стоячих волн в струне, определяющих tonальный, высокий характер звука. Пока молоточек не отскокнет от струны, его энергия, передаваемая струне, тратится в основном на шумовой ударок опорных конструкций. Чем больше время контакта молоточка со струной, тем дольше демпфирующее действие молоточка, препятствующее формированию стоячих волн в струне, и тем меньшая доля энергии молоточка приходится на периодические колебания струны, а значит кроме начального шум в звуке и коротко его заключительная, tonальная стадия.

Поэтому жесткость молоточка, его форма, вес, место удара по струне играют главную роль в формировании качества дискантовых звуков фортепиано. О том, каким должен быть дискантовый молоточек фортепиано, рассказано в главе IV.

Рассмотрим объективные параметры дискантовых звуков, определяющие его качество. На рис. 68 приведены сонограммы звуков трех фортепиано в порядке понижения их качества. Анализируя спектрально-временную структуру этих звуков, легко увидеть следующие: разнокачественные дискантовые звуки различаются параметрами начального шумового импульса, длительностью tonальных компонент;

в более качественных звуках шумовой импульс имеет меньшую длительность, интонационность и ширину спектра;

в более качественных звуках маскирующее действие шумового импульса по отношению к tonальным компонентам, в частности к основному тону, меньше, чем в звуках низкого качества;

в спектрах более качественных звуков tonальные компоненты содержатся в большем количестве и имеют большую длительность.

Таким образом, tonальный признак дискантового звука ощущается слушателем не мгновенно, а через некоторое время после удара молоточка о струну, увеличиваясь по мере ослабления маскирующего шума. Чем слабее шумовой призывок, чем быстрее он уменьшается по интенсивности и ширине спектра, тем качественнее оказывается дискантовый звук фортепиано.

На этом принципе базируется методика количественной оценки качества звука фортепиано, применяемая для сравнения дискантовых звуков одной и той же высоты по их интонационной ясности. По аналогии с измерением отношения "сигнал/шум" в электронных устройствах интонационную ясность дискантового звука можно характеризовать мощностью звучания tonального сигнала (основной тон и обертоны), отнесенной к мощности шумового призывка. Это отношение по мере развития звука увеличивается, и мерой интонационной ясности звука может служить, например, скорость этого увеличения или время, за которое отношение достигает определенного значения.

Технически осуществление такой оценки сложно; для многих практических задач могут применяться упрощенные методики (см.: Галембо, 1981). Например, звук с помощью Гауссова умножителя или другого модулирующего устройства может быть разделен на последовательные короткие временные фрагменты, для каждого фрагмента определен минимальный спектр, в каждом полученном спектре вычислено отношение суммы интенсивностей tonальных компонент к сумме интенсивностей шумовых компонент. Звук оценивается по скорости роста полученного коэффициента с увеличением номера звукового фрагмента (см.: Галембо, 1979).

Шумовой призывок можно услышать отдельно от tonальной части звука, если сместить точку удара молоточка таким образом, чтобы молоточек бил непосредственно по штабике рамы. Установлено, что если рама piano изготовлена из чугуна, то максимальный спектр шумового призывка по форме облегающей и по расположению энергетических максимумов будет определено отличаться от соответствующего спектра в звуке piano с рамой, изготовленной, например, из алюминиевого сплава (рис. 69). Субъективная экспертиза, проведенная с настройщиками фабрики "Красный Октябрь", подтвердила, что звук, получаемый ударом молоточка непосредственно по штабик рамы, легко идентифицируется с шумовым призывком при обычном ударе молоточка о струну, а также что стук молоточка о штабик чугунной рамы легко отличается слухом от стука по штабик алюминиевой рамы, что и лежит в основе сравнения тембра дискантовых звуков piano с алюминиевой и чугунной рамами (см.: Галембо, Ивановская, 1977).

Таким образом, опорные конструкции в дискантовом регистре являются важным источником, во многом определяющим спектр

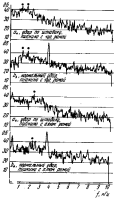


Рис. 85. Максимальные спектры звуков 6-й системы плавки с рамкой из чугуна и из алюминированного сплава при ударе молотком по стальной раме и по струне

шумового призвука, от которого зависит степень маскировки шумом гортального признака дискантового звука. Этот факт следует учитывать при исследовании возможности применения различных металлов и сплавов для изготовления металлической рамы вместо традиционного чугуна. Поскольку дефицит энергии собственных колебаний струны в дискантовом регистре является насущной проблемой, необходимо соблюдать рекомендации, связанные с условиями сохранения формы деки при ее закреплении по периметру (см. главу VI), что, как показывает опыт фирмы "Стойная", позволяет сделать дискантовые звуки

более длительными за счет уменьшения потерь энергии в самой деке. Естественно, при этом должно быть соблюдено и требование положительного дрифта струн во избежание оттока энергии колеблющейся струны в опорные конструкции через шпек.

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Появление в начале века первых несовершенных электромузыкальных инструментов породило такие крайние суждения о возможностях техники в музыке, что дало повод к крикливо "несовершенства" классических музыкальных инструментов. Звучание рояля или скрипки объявлялось примитивным, несовершенным, отживающим свой век. "Скоро то время, — писал А. Аббад-Григорьев (1925), — когда современная скрипка займет то же место среди музыкальных приборов будущего, какое деревянная талого занимает среди автомобилей и автомобилей".

Сейчас это воспринимается как курьез, и на фоне модного увлечения синтезированными тембрами красота звучания натуральных

музыкальных инструментов остается непреодолимой; пучками электромузыкальными инструментами считается та, которые успешно имитируют фортепиано, струнные, человеческий голос и т.д.

Несовершенство познания структуры музыкального звука, сводящее его параметры к интенсивности и частоте обертонов, и еще большие недоработанные сложные процессы музыкального восприятия способствовали также преувеличению возможностей техники в оценке качества звучания инструментов, каким его понимает музыкант.

До сих пор бытует мнение, что органолептическая оценка качества музыкальных звуков, букетов цветов или художественных произведений есть лишь временное явление на пути к полному объективному метрологическому анализу. Действительно, исследование музыкальных звуков приводит к познанию некоторых объективных закономерностей в суждениях о том или ином свойстве звука, но одновременно с этим перед исследователем возникает множество новых нерешенных проблем, о существовании которых он не подозревал. Поскольку качество — понятие в основном субъективное, поиски исчерпывающих объективных его критериев есть попытка познания человеком самого себя, процесса столь же полезного, сколь и бесконечного. Познание потому, что знание физических закономерностей, связанных с восприятием качества звучания и игровых свойств музыкальных инструментов, помогает инженерам конструировать лучшие инструменты и контролировать отдельные акустические параметры, влияющие на качество звучания, а психологам — познать проблемы музыкального восприятия. Бесконечного же потому, что оценка сложного качества музыкального инструмента есть творческий процесс, в котором используется ассоциация, навыки, воображение и т.д., процесс во многом индивидуальный и не имеющий всегда однозначного алгоритма.

Поэтому, несмотря на то что объективные методы применяются при оценке качества упор музыкальных инструментов и даже отдельных признаков музыкальных звуков, не следует слишком уповать на полную замену субъективных суждений физическими измерениями при оценке готовых музыкальных инструментов.

Субъективная экспертиза, особенно если речь идет об оценке музыкальных инструментов, претендующих на высокое качество, весьма сложна и требует тщательной, продуманной организации. Оценки, полученные экспертными методами, должны минимально зависеть от индивидуальных особенностей экспертов (если речь не идет об инструментах, изготовленных по их индивидуальным заказам), а также от факторов, не связанных с качеством музыкального инструмента, но влияющих на восприятие этого качества (см.: Reports ... 1977).

Оценка музыкального инструмента в том объеме, в котором это требуется для промышленности — сложная и объемная задача.

малой степени связанная с обычной исполнительской деятельностью музыкантов. Вопрос психистов, имеющих большой исполнительский опыт, но не обладающих опытом экспертизы, показывает, что они считают себя способными различать или идентифицировать фортепиано по таким элементам качества, по которым опытные эксперты не берутся решать аналогичные задачи.

Эксперт должен хорошо знать вопросы организации экспертизы, понимать, какие факторы могут повлиять на правильность его суждений об инструменте, знать устройство инструмента и функции его узлов, а также уметь анализировать свои впечатления. Последнему способствует опыт, а также специальные тренировки. Интересны в этом смысле эксперименты по преподаванию "тембрового сольфеджио" — искусства различения тембров — звукорежиссером, дирижером и музыкантам в Варшавской консерватории (см.: Lętowski, 1985).

Музыканты как профессиональная группа характеризуются высокоразвитым и активным воображением, склонностью к ярко эмоциональному восприятию музыкального материала. С нарастанием же интенсивности эмоционального переживания процесс восторженного и гибкого познания действительности ограничивается и даже нарушается. В обычной исполнительской деятельности инструмент — на основной источник эмоций музыканта, важнее исполняемое музыкальное произведение. Поэтому чувство комфорта или дискомфорта, связанное с легкостью достижения звукового результата, — именно эти впечатления в основном формируют образ инструмента. Веской инструмент обычно сравнивается с другими по этим эмоциональным факторам. Значительное участие в формировании "образа инструмента" эмоциональной памяти музыканта дает основание отнести это формирование к "эмоциональным синтезам", а именно к "познавательным объединениям, которые объединяют в себе некоторую совокупность явлений не по общему для них объективному признаку, а по сходному с ним субъективному эмоциональному признаку" (см.: Викленас, 1976).

Производительная же задача оценки качества требует от музыканта такой перцептивной активности, которая определяется главным образом природой музыкального инструмента. Поэтому понятно, что эмоции и воображение, столь необходимые музыканту-исполнителю, могут стать если не прямой помехой в выполнении им задач экспертизы, то своеобразным катализатором, усиливающим действие других психологических помех. Некоторое снижение эмоциональности восприятия звукового материала экспертом может быть достигнуто, если оценивать звучание не по исполняемым отрывкам из музыкальных произведений, а гаммам, аккордам и звуковым последовательностям, исполняемым с различной техникой звукоизвлечения, позволяющей раскрыть возможности инструмента.

В оценке фортепиано психистом-экспертом одновременно участвуют по меньшей мере четыре сенсорных канала:

- а) зрительное впечатление музыкант получает от внешнего вида инструмента;
- б) тактильное впечатление — в результате взаимодействия кожи с клавишами фортепиано;
- в) слуховое впечатление определяется спектральными и временными характеристиками звуков инструмента;
- г) двигательное-моторное впечатление — основа оценки музыкантом удобства игры на инструменте (исполнитель руководствуется не только динамическим сопротивлением клавишного механизма при игре, но и достигаемым звуковым эффектом, т.е. в формировании данного впечатления принимает участие обратная связь по двигательному и слуховому каналам в системе музыкант — инструмент).

Хотя исполнитель уверенно судит о звуке фортепиано и его игровых свойствах, более строгие экспертизы показали, что он не в состоянии достаточно достоверно дифференцировать свое общее впечатление на более элементарные. Причина этого наряду с эмоциональностью восприятия усматривается в наличии кросс-модальной маскировки. Суть ее заключается в том, что при одновременном возбуждении рецепторов разной модальности ощущения, получаемые через каждый рецептор, изменяются. Из обычной жизни известны примеры взаимодействия органов чувств: скрип стекла о стекло у многих людей вызывает тактильное ощущение (мурашки по спине), громкие звуки нередко обостряют зубную боль и т.д. Существование такого взаимодействия не позволяет рассматривать сложный комплекс впечатлений как простую их сумму, затрудняя и решение этого комплекса на более элементарные впечатления. Поэтому эксперту трудно дифференцировать в своей оценке игровые и звуковые свойства фортепиано, воспринимаемые одновременно по двигательному-моторному и слуховому каналам.

Следующая важная помеха — психологическая установка, т.е. готовая система реакций, приобретаемая с опытом. Так, исполнительский опыт (иногда опыт нескольких поколений) выработывает определенный вкус, привычки, в результате которых музыканты отдают устойчивое предпочтение инструментам определенных изготовителей. На основании известных эксперту сведений о содержании конструктивных или технологических изменений в предлагаемом инструменте (или предварительно зная мнение коллег) эксперт ожидает определенных особенностей звука, и эта установка, подкрепленная воображением, может восполнить недостаток ожидаемого и исказить оценку. Внешний вид и другие неакустические параметры также предопределяют "доверие" (или "недоверие") музыканта к инструменту. Таким

образом, психологическая установка, приемная самые разнообразные формы, может значительно снизить достоверность результатов экспериментов.

Акустические особенности помещения могут привести к удлинению коротких звуков, асимметричным компонентам, появлению эха и т.д. На основании принципов объективных изменений в звуке, эксперт применяет их инструменту.

Например, одно и то же пианино может "глуховатым" при оценке в большом концертном помещении с повышенным уровнем шума, "звенящим" в маленькой жилой комнате, "гудющим" в маленькой комнате без мягкой мебели, "короткозвучным" в заглушенной акустической камере.

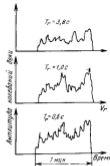
В практике фабрики "Красный Октябрь" были случаи, когда эксперты при выпуске пианино указывали на их слишком глухой звук, в то время как потребители жаловались на чрезмерно звонкий, яркое звучание. Причина, как выяснилось, заключалась в том, что экспертиза звучания этих инструментов проводилась в большом концертном помещении с повышенным уровнем шума.

Часто утверждают, что в памяти музыканта хранится некий собирательный "звуковой и игровой образ" музыкального инструмента, который он считает эталоном, обладающим наилучшим качеством, и с которым он сравнивает предъявляемый для оценки инструмент. Такая предвзятость, часто лежащая в основе слепого доверия к оценке музыкантом качества инструмента, приводит к ошибкам. Мало сказать, что изображаемый эталон неоднороден у разных экспертов; его свойства зависят от индивидуального опыта, привычек и профессиональных предпочтений.

Если говорить о концертном тембральном образе-эталоны, то для формирования такого образа память человека слишком несовершенна. Об этом говорят настоятельные просьбы экспертов сблизить во времени сравниваемые звуковые стимулы, даже если они не очень сложны (отдельные звуки, аккорды и т.д.). Ссылки, проведенные польскими исследователями, показали, например, что при субъективном сравнении яркости звуков ошибки, связанные с длительностью временного интервала между сравниваемыми звуками (так называемая "ошибка времени"), становятся недопустимо большими при предъявлении этих звуков испытуемым с интервалом более двух секунд (см.: Ląbowski, Smurziński, 1980).

Формирование образа эталона и оценка предъявляемого эксперту инструмента происходят в неидентичных акустических и психологических условиях. Лучшие инструменты, принимаемые обычно за эталон, например рояли "Стейнвей" или "Бехштейн", обычно находятся в более выгодных акустических условиях (концертные залы, студии и т.д.), чем рояли, которые прослушиваются на фабрике. Оценка

Рис. 70. Величина времени реверберации (T_R) помещений на манеру игры пианиста



инструмента, сопоставляющая исполнительской деятельности, происходит в совершенноном психологическом состоянии музыканта, нежели при решении им конкретной экспертной задачи.

Г. Беккер, измеряя амплитуду колебаний деки рояля при игре пианиста в помещениях, имеющих разные акустические характеристики, установил, что в помещении с чрезмерным временем реверберации музыкант принимает меньше усилий при нажатии на клавиши и ему трудно акцентировать forte. Если же, наоборот, помещение слишком заглушено, то игра рояля затрудняется, так как требует применения более интенсивного звукозвучения, чем в помещении с нормальными акустическими условиями (рис. 70).

Из этого следует очень важный вывод о том, что сравнение качества фортепиано, находящегося в неидентичных акустических условиях, может значительно повлиять на суждение музыканта об игровых свойствах оцениваемого инструмента.

Известный современный немецкий исследователь Ю. Майер, докладывая на 14-й Акустической конференции, проходившей в ЧССР, результаты оценки качества звучания роялей путем прослушивания инструментов в малой залке, отметил, что если запись звучания сравниваемых роялей производится в помещениях с неидентичными акустическими условиями, уровень ошибки в оценках может быть настолько высок, что музыкант предпочтет не тот инструмент, который предпочел бы при идентичности акустических условий залки.

Приведенные доводы не позволяют чрезмерно доверять эфемерному сравнению, ожидая от него высокой достоверности результатов. Основой субъективных экспертиз должно быть прямое сравнение с эталоном.

В качестве экспертизы с повышенной достоверностью результатов иногда применяется сравнительная оценка музыкальных инструментов

за закрытым занавесом". При такой экспертизе инструмент и исполнитель изолированы от эксперта-слушателя непрозрачным звуко-прозрачным занавесом, а оценка производится путем прямого сравнения двух или нескольких инструментов. Уменьшая воздействие на мнение эксперта психофизиологической установки, кросс-модальной маскировки и акустических условий помещения, такая методика, однако, вводит в оценочный комплекс дополнительный элемент – исполнителя, воздействие которого на инструмент также представляет собой помеху для достоверного различения его качества. Этим, по-видимому, объясняется тот факт, что эксперты-слушатели зачастую легче узнают за занавесом знакомого исполнителя, чем знакомый инструмент.

Играл на музыкальном инструменте, опытный исполнитель интуитивно приспосабливается к особенностям акустических условий и самого инструмента, корректируя свое воздействие на инструмент для получения требуемого звукового результата (см.: Simpson, 1985; Taylor, 1985). Пламяст, не связанный непосредственно ни с первичным вибратором (струной), ни со звукоизлучателем (декой), имеет меньше возможностей воздействовать на характер извлекаемых из инструмента звуков, чем, например, гитарист или трубач. Тем не менее он может влиять на звучание фортепиано в достаточной степени, чтобы значительно затруднить различение инструментов экспертами-слушателями. Частичным выходом из положения здесь может быть правильный выбор исполнителя – им должен быть не музыкант высокого класса, а такой, который владеет техникой в достаточной мере, чтобы играть ровно, без срывов и оmissions, но еще не настолько опытный, чтобы корректировать звучание плохих инструментов искусной исполнительской техникой.

Существует традиционная методика описания тембра с помощью так называемых семантических шкал. Каждая из таких шкал характеризуются парой определений, соответствующих минимальному и максимальному содержанию того или иного признака звука (например, тусклый – яркий, плоский – объемный и т.д.). В главе I уже говорилось о несовершенстве такого способа ввиду индивидуальных различий в интерпретации экспертами словесных определений тембра, а также из-за отсутствия полного набора независимых шкал для описания сложных тембров звуков музыкальных инструментов. В вышеупомянутом докладе Ю.Майера, а также в некоторых других работах применены семантических шкал для полной оценки качества звучания музыкальных инструментов признается недостоверным из-за недостоверности получаемых оценок. Применением этого метода, с другой стороны, может быть успешным при решении узких экспериментальных задач направленного изменения того или иного признака тембра.

Многие проблемы получения достоверных оценок качества музыкальных инструментов пока не решены, поиск в этом направлении ведется как в СССР, так и за рубежом. Ряд экспериментов, направленных на повышение достоверности оценок психистами-экспертами игровых и звуковых свойств фортепиано, проводился акустической лабораторией фабрики "Красный Октябрь" при прямом сравнении концертных роялей производства этой фабрики с роялями других изготовителей (см.: Галимбо, 1983).

В этих экспериментах были применены четыре методики предъявления сравниваемых инструментов:

- открытое предъявление, когда эксперт видит инструменты, играет на них и дает сравнительную оценку их игровым и звуковым качествам;

- предъявление с изоляцией эксперта от инструмента по зрительному каналу непрозрачными (изготовленными из матового войлока) экранами, эксперт при этом оценивает звуковые и игровые свойства инструмента в их взаимосвязи, удобство управления звуками;

- предъявление с изоляцией эксперта от инструмента по зрительному и слуховому (с помощью изолирующих наушников) сенсорным каналам, при этом эксперт оценивает работу клавишного механизма на основании двигательного-моторного впечатления;

- предъявление "за занавесом" для сравнения оценок с результатами предыдущих тестов.

Задачи экспертов в этих экспериментах ограничивались предпочтением одного из двух предъявляемых стимулов (звуковых, двигательных или смешанных) либо идентификацией инструмента по предъявляемому стимулу.

Было выявлено, что сравниваемые рояли легче и достовернее различались экспертами по двигательному-моторному, нежели слуховому впечатлению. Учетывая, что при "открытой" предъявлении основным различие между сравниваемыми роялями была усмотрена экспертами в их звуковых, а не игровых особенностях, можно сделать вывод, что при "открытой" оценке эксперты зачастую ошибаются, приписывая звучению недостатки игровых свойств. Этому кроме кросс-модальной маскировки способствует, по-видимому, и психофизиологическая установка, связанная с привычным представлением исполнителем о звуковом материале как основном результате деятельности и игровым впечатлением как вспомогательном, имеющем значение только для музыканта, но не для слушателя. Поэтому подобная ошибка может быть типичной при экспертизе качества фортепиано, как, впрочем, и других музыкальных инструментов.

Интересно отметить, что недооценка музыкантами, в частности певцами, двигательного-моторного впечатления отмечалась исследователями и ранее. "О важности слуха говорят всегда много и вполне обоснован-

но, — писал В.Л. Морозов. — Вместе с тем приходится иногда слышать, как музыканты ..., с большим уважением говорящие о слухе, нередко пренебрежительно относятся к мышечному чувству, которое в их представлении является более низким органом чувств, чем слух. Но, как мы видим, никаких оснований для такого пренебрежения нет" (см.: Морозов, 1967).

Рациональное изменение традиционных методов оценки качества музыкальных инструментов может иметь множество вариантов в зависимости от вида инструмента и цели экспертизы. Тем не менее, обобщая сказанное, назовем ряд рекомендаций общего характера, выполнение которых позволяет повысить достоверность экспертных оценок (см.: Галамбо, 1962):

применять только прямое сравнение инструментов; задавать эксперту только простые, не вызывающие смысловых разночтений вопросы, сводящиеся в основном к предложению одного из двух предельных стимулов (метод парных сравнений) либо идентификации стимулов; технической информативности результатов экспертизы правильно достигают рациональным подбором предельных стимулов, а не усложнением задачи эксперта;

по возможности изолировать эксперта от инструмента по сенсорным каналам, не участвующим в адекватной оценке стимула; максимально сблизить по времени сравниваемые стимулы; использовать в качестве звуковых стимулов гаммы, аккорды, отдельные звуки и последовательности звуков, не обладающие эмоциональным воздействием, ограничивать применение отрывков из музыкальных произведений;

ограничить внешние помехи — влияние акустических условий; разъяснить экспертам роль психофизиологических помех в их работе, повысить тем самым их экспертную компетентность, а следовательно, обоснованность суждений в конкретных условиях экспертизы.

Развитие науки и техники, расширяя границы познания физической природы фортепиано, создает возможности дополнения экспертных оценок данными измерения объективных параметров инструмента и придает необходимую направленность технологическому и конструкторскому совершенствованию инструмента.

Технические достижения способствуют и совершенствованию субъективной экспертизы. Например, современная техника делает возможным предельное сближение звуков музыкальных инструментов в магнитной записи; это значительно снижает организационные и экономические трудности проведения сложных экспертиз. Разработка объективных методов оценки отдельных тембральных признаков также облегчает задачи экспертизы и способствует повышению достоверности и технической информативности оценки звуковых и игровых качеств музыкальных инструментов.

ТИМБР

Немаловажен вопрос, какими свойствами звучащий фортепиано музыкальный инструмент, а какими он изменять не может. От этого во многом зависит роль музыканта в оценке качества фортепиано, организации субъективной экспертизы, постановка вопросов эксперту.

Способ воздействия пианиста на клавишу музыканты называют "туше" (фр. *toucher* — трогать, прикасаться) и определяют его как характер взаимодействия подушечки пальца с клавишей фортепиано, определяемый положением пальца относительно клавиши, скоростью и глубиной нажатия и другими факторами. "По мнению большинства пианистов, от индивидуальных особенностей туше зависит качество и характер звучания инструмента ("суховат", "жестковат", "мягковат", "тепловат") ... Однако некоторые теоретики пианизма считают эту зависимость иллюзией, утверждая, что звучание фортепиано не поддается тембровым изменениям и зависит только от силы удара" (МЗ, 1981).

Возможность воздействия на тембр отдельного звука фортепиано изменением туше неоднократно утверждали физики (и, как мы видим, некоторыми музыкантами) на том основании, что на всех физико-механических факторов, определяющих воздействие молоточка на струну, только скорость молоточка зависит от пианиста. Это означает, что невозможно, неже дважды одну и ту же клавишу, извлечь два звука одинаковой громкости, но разного тембра.

Некоторый компромисс в этом вопросе возможен, если принять во внимание, что пианист до некоторой степени может управлять шумовым прозвуком, присутствующим в акте фортепианного звука и влияющим на его тембр.

Если использовать объективные категории, то туше определяет зависимость силы, действующей на молоточек при его разгоне, от времени. Рассмотрим два простейших вида такой зависимости, установленные А.В. Ремондом-Корсаковым при анализе игры *forte* и *ritato*. В первом случае сила, действующая на молоточек, постоянна, во втором — линейно увеличивается со временем.

Если F — сила, действующая на молоточек, φ — коэффициент пропорциональности, m — конечная скорость молоточка, m — масса молоточка, T — время разгона молоточка, S — длина пути разгона молоточка, то, производя элементарные математические вычисления, получим, что при одинаковой конечной скорости молоточка максимальная сила, действующая на него, будет неодинакова при различных видах туше.

Staccato

Legato

$$F = const,$$

$$F = at,$$

$$mv = F \cdot T,$$

$$F_{\max} = \frac{mv}{T}.$$

$$mv = \int_0^T a dt = v \frac{T}{2},$$

$$F_{\max} = \frac{2mv}{T}.$$

Расчет, приведенный для двух частных случаев туше, показывает, что, вообще говоря, пианист имеет возможность управлять практически независимо двумя параметрами динамики системы гаммерштайл — молоточек: конечной скоростью молоточка и максимальной силой, действующей на него через клавишный механизм, а следовательно, и силами взаимодействия частей движущегося клавишного механизма, которые определяют интенсивность шумов клавишного механизма. Таким образом, пианист может при одинаковой конечной скорости молоточка уменьшать или увеличивать предел, создаваемый шумом клавишного механизма.

Второй возможностью изменить соотношение тональной и шумовой частей звука связана с инерцией головки молоточка, приводящей к изгибу гаммерштайла при резком ударе по клавише и смещению по этой причине места удара молоточка с струны в сторону штабеля ремы. В крайнем диссонансовом регистре, где положение точки контакта со струной должно соблюдаться с точностью до долей миллиметра, такое смещение, достигающее полумиллиметра и более (см.: Глазубо, 1873), может вызвать ощущение изменения тембра за счет увеличения доли шумового привкуса.

Итак, пианист действительно имеет некоторую возможность вносить изменения в тембр извлекаемого звука. Однако оправдано сомневаться в том, что пианист может пользоваться этой возможностью сознательно.

Скорее всего, дискуссия по поводу значимости туше в научной литературе начала нашего века, была вызвана разногласиями в понятиях "туше", "тембр", "характер звучания".

Если говорить об извлечении отдельного звука, то вряд ли воздействие пианиста на тембр достойно серьезного обсуждения. Заблуждения на этот счет могут возникнуть по причинам, о которых говорилось в предыдущем разделе, а именно из-за неразделимости двигательного и слухового впечатлений при извлечении звука на фортепиано и связанного с этим применением игровых ощущений в субъективную характеристику звука.

Если же иметь в виду не тембр отдельного звука, а характер звучания всего инструмента, то здесь возможности пианиста очень велики, и туше имеет действительно большое значение (см.: Ivanov, 1964).

Тембром аккорда можно управлять в широких пределах посредством изменения соотношения громкостей составляющих аккорда звуков.

В звуковых последовательностях большое влияние туше проявляется в переходах от звука к звуку: пианист может управлять характером звучания пассажей, контролируя спускание демпферов на струны и изменение временной интервал между демпфированным одним звуком и извлечением следующего. Игра *trasto* и *trasto* — лишь два простейших примера такого управления.

Педальзация — еще один важный способ управления тембром. Даже отдельный звук при нажатой правой педали звучит не так, как без педали, из-за многочисленных резонансных откликов струн, संबоданных от демпферов. Выше уже говорилось о роли левой педали рояля. Дополнительные возможности управления звучанием дает педаль sostenuto, используемая в ролях "Стейнвей" и позволяющая осуществлять выборочное освобождение струн от демпферов.

Если под искусством туше понимать умение управлять характером звучания различных фортепиано в разных по акустическим условиям помещениях, исходя из конкретной музыкальной задачи, решаемой исполнителем, то становится понятно, почему Д. Фигд и А. Рубинштейн славятся бархатистым, "сонным" туше; Ф. Лист и Ф. Визони — разнообразным по краскам туше и т.д., в то время как вряд ли кто-либо сможет бы различить великие пианистов по извлеченным ими отдельным звукам.

Итак, приспособление музыканта к инструменту и акустике помещения производится изменением туше. Если туше оказывается неудачным и неприглядным, инструмент оценивается пианистом как "неотзывчивый", плохо звучащий, в то время как слушатель может оценить звучание фортепиано достаточно высоко, если на нем играет хороший исполнитель. В этом примере многих парадоксов эстетика "за закрытым занавесом", и это следует учитывать при составлении методик оценки качества фортепиано и других музыкальных инструментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ СОВЕТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАТОРУ

1. Практика показывает, что повышение качества музыкального инструмента всегда связано со значительной дополнительной трудоемкостью, обусловленной не только введением дополнительных технологических операций, но также и повышением точности и тщательности выполнения работ, введением дополнительного пространственного контроля. Производствo должно быть готово к этому.

2. Рассматривая результаты исследований и экспериментов, опубликованные в технической литературе, следует понимать, что эти результаты могут быть полностью применимы лишь в тех условиях, в которых они получены. Расширение области их применения допустимо лишь как гипотеза, которую необходимо проверить. Например, критерии оценки звуков диссонансового регистра фортепиано неприменимы к басовым звукам, требования к скрипичной деке существенно отли-

кается от требований к деки рояля и т.д. Однако методы исследования различных инструментов, постановки экспериментов качества, способы обработки результатов, логика их обсуждения во многом сходны при изучении разных инструментов. Поэтому научная и техническая информация требует внимательного и критичного к себе отношения.

3. Специфика музыкального инструмента такова, что звуковые качества всегда оцениваются с учетом игровых. Поэтому для правильной оценки качества звучания инструмента, претендующего на высокий класс, следует обеспечить соответствующий уровень игровых удобств. В фортепиано — это статическое и динамическое сопротивление, а также динамический диапазон игрового механизма. Плохой клавишный механизм не позволит выявить все достоинства или недостатки резонансного узла, а значит и звучания фортепиано.

4. Эксперименты с улучшением звучания массовых музыкальных инструментов, как правило, дают положительные результаты на опытных образцах. Эти результаты часто бывают обманчивы, они не подтверждают массовым производством и происходят только от повышенного тщательности изготовления опытных образцов, свойственной скорей индивидуальному производству.

Поэтому вывод о необходимости внедрения того или иного предложенного новшества (в результате научных исследований или в порядке рационализации), могущего повлиять на качество звучания музыкального инструмента, следует делать только по результатам изготовления промышленной партии инструментов.

Отступление от этого правила приводит к производственным ошибкам: внедрению "экономичных" упрощенной конструкции и технологии, акустическая "безразность" которых подтверждена на одном-двух специально изготовленных образцах, или, наоборот, введением дорогостоящих усложнений технологии и конструкции, не дающих потом улучшения качества массовой продукции, хотя и блестяще представленных в опытных образцах.

5. Подобно тому как малое электрическое сопротивление шунтирует параллельно с ним включенные большие сопротивления, так наличие одного плохо изготовленного акустически важного узла музыкального инструмента может свести качество звучания целого инструмента к качеству этого узла. Усовершенствование остальных узлов становится в этом случае бесполезным.

Этим объясняется тот факт, что попытки улучшения звучания фортепиано за счет только усовершенствования деки или струн зачастую не дают заметного успеха и приводят к неправильным выводам о полной бесполезности этих нововведений, в то время как в данном случае следует говорить о неправильной постановке эксперимента. Поэтому необходимо, чтобы все акустически важные узлы соответствовали требованию высокому качеству.

Продолжение

Таблица соответствия частот основного тона вышележающей и вышележающей октавы

Октава	Центов	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ми	ми	320,00	321,27	322,56	323,85	325,14	326,43	327,76	329,06	330,40	331,74
ре	ре	330,06	331,43	332,79	334,16	335,53	336,91	338,29	340,70	342,11	343,52
до	до	340,04	341,57	343,01	344,45	345,87	347,30	348,75	351,13	352,62	354,12
1	до	350,03	351,74	353,47	355,20	356,93	358,66	360,40	363,18	365,00	366,82
си	си	360,02	361,84	363,67	365,50	367,34	369,17	371,02	373,87	375,74	377,60
ля	ля	370,00	371,93	373,86	375,80	377,74	379,68	381,63	384,58	386,54	388,49
фа	фа	380,00	381,94	383,88	385,83	387,78	389,73	391,68	394,64	396,61	398,57
ми	ми	390,00	391,94	393,88	395,83	397,78	399,73	401,68	404,64	406,61	408,57
ре	ре	400,00	401,94	403,88	405,83	407,78	409,73	411,68	414,64	416,61	418,57
до	до	410,00	411,94	413,88	415,83	417,78	419,73	421,68	424,64	426,61	428,57
си	си	420,00	421,94	423,88	425,83	427,78	429,73	431,68	434,64	436,61	438,57
ля	ля	430,00	431,94	433,88	435,83	437,78	439,73	441,68	444,64	446,61	448,57
фа	фа	440,00	441,94	443,88	445,83	447,78	449,73	451,68	454,64	456,61	458,57
ми	ми	450,00	451,94	453,88	455,83	457,78	459,73	461,68	464,64	466,61	468,57
ре	ре	460,00	461,94	463,88	465,83	467,78	469,73	471,68	474,64	476,61	478,57
до	до	470,00	471,94	473,88	475,83	477,78	479,73	481,68	484,64	486,61	488,57
си	си	480,00	481,94	483,88	485,83	487,78	489,73	491,68	494,64	496,61	498,57
ля	ля	490,00	491,94	493,88	495,83	497,78	499,73	501,68	504,64	506,61	508,57
фа	фа	500,00	501,94	503,88	505,83	507,78	509,73	511,68	514,64	516,61	518,57
ми	ми	510,00	511,94	513,88	515,83	517,78	519,73	521,68	524,64	526,61	528,57
ре	ре	520,00	521,94	523,88	525,83	527,78	529,73	531,68	534,64	536,61	538,57
до	до	530,00	531,94	533,88	535,83	537,78	539,73	541,68	544,64	546,61	548,57
си	си	540,00	541,94	543,88	545,83	547,78	549,73	551,68	554,64	556,61	558,57
ля	ля	550,00	551,94	553,88	555,83	557,78	559,73	561,68	564,64	566,61	568,57
фа	фа	560,00	561,94	563,88	565,83	567,78	569,73	571,68	574,64	576,61	578,57
ми	ми	570,00	571,94	573,88	575,83	577,78	579,73	581,68	584,64	586,61	588,57
ре	ре	580,00	581,94	583,88	585,83	587,78	589,73	591,68	594,64	596,61	598,57
до	до	590,00	591,94	593,88	595,83	597,78	599,73	601,68	604,64	606,61	608,57
си	си	600,00	601,94	603,88	605,83	607,78	609,73	611,68	614,64	616,61	618,57
ля	ля	610,00	611,94	613,88	615,83	617,78	619,73	621,68	624,64	626,61	628,57
фа	фа	620,00	621,94	623,88	625,83	627,78	629,73	631,68	634,64	636,61	638,57
ми	ми	630,00	631,94	633,88	635,83	637,78	639,73	641,68	644,64	646,61	648,57
ре	ре	640,00	641,94	643,88	645,83	647,78	649,73	651,68	654,64	656,61	658,57
до	до	650,00	651,94	653,88	655,83	657,78	659,73	661,68	664,64	666,61	668,57
си	си	660,00	661,94	663,88	665,83	667,78	669,73	671,68	674,64	676,61	678,57
ля	ля	670,00	671,94	673,88	675,83	677,78	679,73	681,68	684,64	686,61	688,57
фа	фа	680,00	681,94	683,88	685,83	687,78	689,73	691,68	694,64	696,61	698,57
ми	ми	690,00	691,94	693,88	695,83	697,78	699,73	701,68	704,64	706,61	708,57
ре	ре	700,00	701,94	703,88	705,83	707,78	709,73	711,68	714,64	716,61	718,57
до	до	710,00	711,94	713,88	715,83	717,78	719,73	721,68	724,64	726,61	728,57
си	си	720,00	721,94	723,88	725,83	727,78	729,73	731,68	734,64	736,61	738,57
ля	ля	730,00	731,94	733,88	735,83	737,78	739,73	741,68	744,64	746,61	748,57
фа	фа	740,00	741,94	743,88	745,83	747,78	749,73	751,68	754,64	756,61	758,57
ми	ми	750,00	751,94	753,88	755,83	757,78	759,73	761,68	764,64	766,61	768,57
ре	ре	760,00	761,94	763,88	765,83	767,78	769,73	771,68	774,64	776,61	778,57
до	до	770,00	771,94	773,88	775,83	777,78	779,73	781,68	784,64	786,61	788,57
си	си	780,00	781,94	783,88	785,83	787,78	789,73	791,68	794,64	796,61	798,57
ля	ля	790,00	791,94	793,88	795,83	797,78	799,73	801,68	804,64	806,61	808,57
фа	фа	800,00	801,94	803,88	805,83	807,78	809,73	811,68	814,64	816,61	818,57
ми	ми	810,00	811,94	813,88	815,83	817,78	819,73	821,68	824,64	826,61	828,57
ре	ре	820,00	821,94	823,88	825,83	827,78	829,73	831,68	834,64	836,61	838,57
до	до	830,00	831,94	833,88	835,83	837,78	839,73	841,68	844,64	846,61	848,57
си	си	840,00	841,94	843,88	845,83	847,78	849,73	851,68	854,64	856,61	858,57
ля	ля	850,00	851,94	853,88	855,83	857,78	859,73	861,68	864,64	866,61	868,57
фа	фа	860,00	861,94	863,88	865,83	867,78	869,73	871,68	874,64	876,61	878,57
ми	ми	870,00	871,94	873,88	875,83	877,78	879,73	881,68	884,64	886,61	888,57
ре	ре	880,00	881,94	883,88	885,83	887,78	889,73	891,68	894,64	896,61	898,57
до	до	890,00	891,94	893,88	895,83	897,78	899,73	901,68	904,64	906,61	908,57
си	си	900,00	901,94	903,88	905,83	907,78	909,73	911,68	914,64	916,61	918,57
ля	ля	910,00	911,94	913,88	915,83	917,78	919,73	921,68	924,64	926,61	928,57
фа	фа	920,00	921,94	923,88	925,83	927,78	929,73	931,68	934,64	936,61	938,57
ми	ми	930,00	931,94	933,88	935,83	937,78	939,73	941,68	944,64	946,61	948,57
ре	ре	940,00	941,94	943,88	945,83	947,78	949,73	951,68	954,64	956,61	958,57
до	до	950,00	951,94	953,88	955,83	957,78	959,73	961,68	964,64	966,61	968,57
си	си	960,00	961,94	963,88	965,83	967,78	969,73	971,68	974,64	976,61	978,57
ля	ля	970,00	971,94	973,88	975,83	977,78	979,73	981,68	984,64	986,61	988,57
фа	фа	980,00	981,94	983,88	985,83	987,78	989,73	991,68	994,64	996,61	998,57
ми	ми	990,00	991,94	993,88	995,83	997,78	999,73	1001,68	1004,64	1006,61	1008,57

Октомб	Усредн	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
2	pa	622,25	625,86	629,48	633,13	636,80	640,49	644,20	647,93	651,68	655,46
	su	629,26	663,06	696,92	730,78	764,66	798,57	832,50	866,46	899,43	934,43
	fa	698,48	702,50	706,67	710,93	714,78	718,52	722,09	727,28	731,49	736,62
	fa	729,08	744,28	748,58	752,92	757,29	761,67	766,08	770,52	774,99	779,46
	con	763,99	768,53	793,10	797,68	802,32	806,96	811,64	816,34	821,07	825,23
	con	820,61	825,42	840,26	845,12	850,02	854,95	859,90	864,88	869,89	874,93
	ze	880,00	885,10	890,23	895,38	900,57	905,79	911,03	916,31	921,62	926,96

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- AA — Archives of Acoustics;
 AL — Acoustical Letters;
 BKTR — Bruel and Kjaer Technical Review;
 JAES — Journal Audio Engineering Society;
 JASA — Journal of Acoustical Society of America;
 JSV — Journal of Sound and Vibration;
 MG — Musik und Gesellschaft;
 NS — New Scientist;
 PhM — Philosophical Magazine;
 PTJ — Piano Technician's Journal;
 RA — Rheological Acta;
 SJP — Scandinavian Journal of Psychology.

- Равен, 1955а: Raven A.M. Experimental investigation of the influence of the damper on string and decay rate of the forte piano. — В кн.: *Труды комиссии по акустике*, т. 8, М., 1955.
- Равен, 1955б: Raven A.M. Investigation of the process of undamped excitation of the lower strings of the forte piano. (англ. докл.) М., 1955 (Акустический институт АН СССР).
- Римский-Корсаков, 1940: Римский-Корсаков А.В. Некоторые вопросы творческого и экспериментального овладения ударом фортепианного молотка по струне (англ. докл.) М., 1940 (ВИАКосский институт АН СССР).
- Римский-Корсаков, 1949: Римский-Корсаков А.В. Исследования струнных музыкальных инструментов (англ. докл.) Л., 1949.
- Римский-Корсаков, 1973: Римский-Корсаков А.В. Электрoакустика. М., 1973.
- Римский-Корсаков, Дьяконов, 1952: Римский-Корсаков А.В., Дьяконов Н.А. Музыкальные инструменты. М., 1952.
- Римский-Корсаков, Матвеев, 1939: Римский-Корсаков А.В., Матвеев Л.А. Исследование динамических свойств клавишных механизмов фортепиано. — В кн.: *Труды НИИМП*, вып. 1, П., 1939.
- РМ, 1993: *Андрейко* методика объективного контроля качества основных элементов конструкции рояля: Отчет акустической лаборатории ф-ки "Кристалл Октябрь" П., 1993.
- РФ, 1970: *Лекции* о звуковом образе. М., 1970.
- Роэн, 1973: Роэн Г.С. Измерение динамических свойств акустических механизмов. М., 1973.
- Соловьев, 1973: Соловьев А.И. Основы психологии слуха. Л., 1973.
- Тейлор, 1978: Taylor C. Физика музыкального звука. М., 1978.
- ФЭС, 1966: *Физический энциклопедический словарь*. М., 1966.
- Харьяин, 1952: Харьяин А.А. Сленг и анализ. М., 1952.
- Цейлер, Фельдман, 1971: Цейлер Э., Фельдман Р. Ухо как приемник информации. М., 1971.
- Шлянинов, 1984: Шлянинов В.А. Об использовании плавкой пластики фортепиано в педагогической и исполнительской практике. — *Информкультура*, 1984, № 583.
- Шредер, 1978: Шредер М.Р. Модерн слух. Труды института инженеров по электротехнике и электронике. Пер. с англ. СИА, т. 63, 1978, № 9, с. 78—104, Ярославль, 1978; *Александр Л.* О роли переходных процессов в оценке тембра арpegгионых инструментов: Доклад на VI Всесоюзной акустической конференции. М., 1968.
- WBC, 1978: Baldwin Bearing Case. — Baldwin Piano and Organ Co., 1978 (Руководство для мастеров).
- Wohlf, 1933: Wohlf G. v. m. Über die Hörsensibilität der Ein- und Auswchwingvorgänge mit Berücksichtigung der Resonanzkurve. — *Annalen der Physik*, Leipzig, Band 16, 1933.
- Woods, 1978: Woods A. Fundamentals of Musical Acoustics. — Oxford, 1978.
- Worner, 1964: Worner K. Some factors in the Perception of Timbre. — *JASA*, 1964, vol. 36.
- Wray, 1910: Wray G. The Pianoforte Sounding Board. — *PfM*, 1910, ser. 6, vol. 20.
- Wright, Johnson, 1940: Wright R., Johnson C. Influence of the Sounding Board on Piano Tone quality. — *JASA*, 1940, vol. 11, № 1.
- De Luca, 1972: De Luca L. Le qualità caratteristiche del suono. — *Armonia*, 1972, № 2, 3, 10.
- Wright, 1999: Wright K. Tonal Properties of the Pianoforte in Relation to Bass Bridge mechanical Impedance. — *ISV*, 1999, vol. 9, № 3.
- Yirth, 1976: Yirth A. The Nature of the Tap Tone in Stringed Instruments. — *Acustica*, 1976, vol. 36, № 1.
- Yletcher, 1964: Fletcher H. Normal Vibration Frequencies of a Stiff Piano String. — *JASA*, 1964, vol. 36, № 1.
- Yutaka, 1950: Yutaka E. Vibrational Study of the Wood Used for the Soundboards of Pianos. — *Nature*, 1950, № 165.
- Zanzig, 1900: Zanzig S. Das Pianoforte in seinen akustischen Anlagen. — Leipzig, 1900.
- George, 1962: George W. Musical Acoustics Today. — NS, 1962, № 311.
- GRH, 1977: Grand Piano Hammers. — Baldwin Piano and Organ, CO., 1977 (инструкция для мастеров).
- Grey, 1977: Grey J. Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbre. — *JASA*, 1977, vol. 61.
- Günter, 1959: Günter PhDr. Neue Hammerköpfe in Klavierbau. — *MG*, 1959, № 10.
- Hendley, Benloff, Martin, 1938: Hendley T., Benloff H., Martin D. Factors Contributing to the Multiple Rate of Piano Tone Decay. — *JASA*, 1938, vol. 64, № 5.
- Hendley, Martin, Benloff, 1937: Hendley T., Martin D., Benloff H. Factors Contributing to the Multiple Decrement of Piano Tone Envelope. — In.: *Proceedings 2th Congress Acoustical*, Cambridge, N.Y., 1937.
- Janzon, Sundberg, 1975: Janzon C., Sundberg F. Long-time-average spectra Applied to Analysis of Music. — *Acustica*, 1975, vol. 34.
- Jungens, 1952: Jungens M. Der piano und Flügelpiano. — Berlin, 1952.
- Janson, 1964: Janson P. An Investigation of all the Variable Mechanical Factors Which Produce the Various Pianoforte Tonal Effects. — *AL*, 1964, vol. 7, № 12.
- Kirk, 1959: Kirk R. Investigation in tuning preferences for Piano string unison groups. — *JASA*, 1959, vol. 31.
- Kuriyagawa, Yabino, Kashwayi, 1978: Kuriyagawa M., Yabino M., Kashwayi S. Seven Attributes in Tone Quality Evaluation. — *Hexon Onki Research*, 1978, т. 34, № 9.
- Lepowity, 1965: Lepowity J. Development of Technical Listening Skills: Timbre Scotaggio. — *JAES*, 1965, vol. 33, № 4.
- Lepowity, Smorzynsky, 1960: Lepowity J., Smorzynsky J. Wyrzoznaczenie bigdru ciaru pływ ocenie materiału ioceny dźwięku. AA, 1960, vol. 15, № 2.
- Lucas, Clark, 1965: Lucas D., Clark M. Duration of Attack Transients of Nonpercussive Orchestral Instruments. — *Journal of the Audio Engineering Society*, 1965, vol. 13, № 3.
- Martin, 1947: Martin D. Decay Rates of Piano Tones. — *JASA*, 1947, vol. 19.
- Mc Ferrin, 1978: Mc Ferrin W. The Piano — It's Acoustics. — Frankfurt/Main, 1978.
- Merriens, 1938: Merriens M. Harmonia universale. — Paris, 1938.
- Müller, 1948: Müller F. A proposed Loading of Piano Strings for Improved Tone. — *JASA*, 1948, vol. 21, № 4.
- Müller, 1960: Müller U. Influence of Ribs on the Acoustic Behaviour of Piano Resonant Plates. — *AA*, 1960, vol. 5, № 3.
- Müller, Krüger, 1980: Müller U., Krüger W. Wplyw łebów na problemie akustyczne mechanicznych płyt pianinie. — *A.A.*, 1980, vol. 15, № 2.
- Moil, 1967: Moil A. Capetrum Pitch Determination. — *JACA*, 1967, vol. 41, № 3.
- Moil, 1973: Moil A. Capetrum and Some Close Relatives. — In: *Signal Processing: Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Signal Processing*. — N.Y., 1973.
- Novak, 1979: Novak J. História možnosti měření mechanických kladkových plát. — В кн.: *Труды 18-й Акустической конференции СССР*. — Прага, 1979.
- Owa, Norimoto, 1984: Owa T., Norimoto M. On Physical Criteria for the Selection of Wood for soundboard of Musical Instruments. — *IAA*, 1984, vol. 23, № 6.

Pfeiffer, 1921: Pfeiffer W. Taste und Hahelgabel da Klaviers. — Leipzig, 1921.
 Pfeiffer, 1940: Pfeiffer W. Flügel oder Klavier. — Stuttgart, 1940.
 Pincusov, 1959: Pincusov L. La détermination de la qualité des instruments de musique à la mesure du spectre sonore transitoire. In: Acoustique Musicale. — Paris, 1959.
 Plomp, 1978: Plomp R. Aspects of Tone Sensation. — London, 1978.
 Pollard, Jensen, 1982: Pollard H., Jensen E. A Tristimulus Method for the Specification of Musical Timbre. — Acustica, 1982, vol. 51, N 3.
 Randall, 1981: Randall R. Capstrum Analysis. — BCTR, 1981, N 3.
 Reports, 1977: Reports on the 3th Workshop on Physical and Neuropsychological Foundations of Music, Götting, 1977 (Inv.). — Acustica, 1978, vol. 39, N 2.
 Rightli, 1969: Rightli F. Transitori di attacco ed estinzione del suono e loro effetto sul timbro. — Electonica, 1969, vol. 14, N 2.
 Saldaña, Corso, 1964: Saldaña E., Corso J. Timbre Cues for the Recognition of Musical Instruments. JASA, 1964, vol. 36.
 Schaffer, Rabiner, 1970: Schaffer R., Rabiner L. System for Automatic Formant Analysis of Voiced Speech. — JACA, 1970, vol. 47.
 Simpson, 1969: Simpson R. How players adapt psychologically to their acoustic environment. Proc. of Inst. Acoust, 1969.
 Sondhi, 1968: Sondhi M. New Methods of Pitch Extraction. — IEEE Trans. Audio, Electroacoustics, AU-16, 1968.
 Stokes, 1955: Stokes A. Bridge Tension in Pianos. — FTJ, 1955, N 4.
 Tomascy, 1960: Tomascy T. A hangrén. — Kép és hangok, 1960, N 3.
 Taylor, 1965: Taylor G. The Physics of the Interaction Between the Maudles, his Instrument, and his Acoustic Environment. Proc. of Inst. Acoust, 1965.
 Thomas, Fenner, 1975: Thomas L., Fenner K. Duplex Slide Rule 65. — Frankfurt/Main, 1975.
 Yanagisawa, Aiko, Nakamura, 1981: Yanagisawa T., Aiko H., Nakamura K. Experimental Study of Force-time Curve During the Contact Between Hammer and Piano String. — Нисон оной гаккайос, 1981, T. 37, № 12.
 Yanagisawa, Nakamura, 1984: Yanagisawa T., Nakamura K. Dynamic Compression Characteristics of Piano Hammer Felt. — Нисон оной гаккайос, 1984, T. 40, № 11.
 Young, 1964: Young R. Inharmonicity of Piano Bass Strings. — JASA, 1964, vol. 36, N 1.
 Young, 1962: Young R. Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings. — JASA, 1962, vol. 34, N 5.
 Madin, Good, 1972: Madin L., Good G. Dimension Analysis of the Perception of Instrumental Timbre. SLP, 1972, vol. 13, p. 228-240.
 Weirnich, 1977: Weirnich G. Coupled Piano Strings. — JASA, 1977, vol. 62, N 6.
 Weyer, 1976: Weyer R. Time-frequency Structures in the Attack Transients of Piano and Harpsichord Sounds. — Acustica, 1976, N 4.
 Winkler, 1960: Winkler F. Phänomene des musikalischen Hörens. — Berlin, 1960.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Музыкальный звук	5
Гармоническая колеблел 6. Распространение звука 8. Шум 9. Миллиметровость, частота, спектр 10. Громкость, высота, тембр 18. Форманты 24. Переходные процессы 26. Неправильность 30. Комбинированные тоны, белины 30. Субсонорные звуки	31
Глава II. Алгоритмы для анализа звука	33
Преобразование параметров движения 33. Анализ временных параметров 36. Измерение спектральных параметров	36
Глава III. Звукообразование. Классификация звуков	49
Функциональное образование и пределы действия клавишного механизма 44. Ламельные и угловые соотношения 48. Спонтанное колебательное. Трапеце 60. Инерция и гибкость	66
Глава IV. Молоточки	69
Процесс ударения молоточка об струну 69. Конструкция 66. Жесткость 68. Молоточковый валок 70. Оборудование для придания молоточков 73. Технология 76. Качество молоточкового валока 80. Иллюминация 83. Объемная оценка качества молоточков	90
Глава V. Струны	95
Струнная проволока 95. Объемы струны 97. Основная частота колеблелл струны 99. Неправильность фортепьянных струн	101
Глава VI. Деки	108
Дека как усилитель мощности звука 108. Деки дравесона 110. О конструкции 117. Друк 119. Купол 129. Крепление крепл деки 133. Настройка деки	136
Глава VII. Некоторые объективные и субъективные аспекты качества звуков фортепьяно	137
Особенности звучания струнных хорв 137. Особенности звукообразования и качества звуков дискретного регистра 141. Психологические аспекты оценки качества 144. Туман	153
Закончение. Несколько слов об экспериментатору	155
Предисловие	157
Список литературы	160



А. С. ГАЛЕМБО

ФОРТЕПИАНО

КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ

Александр Самуилович Галембо

ФОРТЕПИАНО. КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ

Редактор Г. Ю. Шестаков

Художественный редактор Н. В. Гурова

Технический редактор Н. В. Черанкова

Корректор А. И. Гурьяева

ИБ № 276

Сдано в набор 24.11.86 г. Подписано в печать 08.07.87 г. Т — 12478.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Уникод. Репро-
дукция. Объем 10,5 п.л. Усл. п.л. 9,77. Усл. нр.-отт. 9,89. Уч.-изд. л.
11,26. Тираж 5000 экз. Заказ 2457. Цена 55 коп.

Издательство "Легкая промышленность и бытовая обслуживание",
113038, Москва, 1-й Кадашевский пер., д. 12.

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государст-
венном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книж-
ной торговли.

109030, Москва, Ж-33, Волочаевская ул., д. 40.



МОСКВА

ПЕТРОМЫШЛИЗДАТ

1987