

Из истории техники *From the History of Technology*

DOI: 10.31857/S020596060023009-1

ИСТОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЖУКОВ Александр Сергеевич — Южно-Уральский государственный университет;
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, д. 76; эл. почта: zhukovas@susu.ru

АРДАШЕВ Дмитрий Валерьевич — Южно-Уральский государственный университет;
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, д. 76; эл. почта: ardashevdy@susu.ru

© А. С. Жуков, Д. В. Ардашев

В статье рассматриваются история акустики и история применения ее методов и достижений в области машиностроения. Акустические методы контроля по праву занимают значительное место среди методов исследования физических объектов и процессов на производстве. Основными их задачами при этом являются выявление разного рода дефектов (ультразвуковой контроль), мониторинг каких-либо параметров производственных процессов, установление физико-механических свойств объектов производства, а также их геометрических характеристик. Отличительная особенность акустических методов, способствующая их широкому распространению, состоит в возможности так называемого неразрушающего контроля, т. е. сохранения целостности исследуемого объекта. Другим не менее важным достоинством этих методов является возможность осуществления процедуры исследования без прерывания процесса производства.

Ключевые слова: акустика, техническая акустика, акустические методы контроля, история техники.

Статья поступила в редакцию 31 августа 2022 г.

THE HISTORY OF THE USE OF ACOUSTICS IN MECHANICAL ENGINEERING

ZHUKOV Alexander Sergeevich — South Ural State University; Prospekt Lenina, 76, Chelyabinsk, 454080, Russia; E-mail: zhukovas@susu.ru

ARDASHEV Dmitry Valerievich — South Ural State University; Prospekt Lenina, 76, Chelyabinsk, 454080, Russia; E-mail: ardashevdy@susu.ru

© A. S. Zhukov, D. V. Ardashev

Abstract: The article reviews the history of acoustics and the history of the use of its methods and achievements in mechanical engineering. Acoustic monitoring methods justly hold a significant place among the methods for studying physical objects and industrial processes. These methods are mainly intended for detecting various defects (ultrasound control), monitoring parameters of industrial processes, and determining physical and mechanical properties of products as well as their geometric characteristics. The distinctive feature of the acoustic methods, which helped their spread, is the possibility for non-destructive testing, i. e. causing no damage to the object under study. Another, no less important merit of these methods is a possibility for testing without disrupting industrial processes.

Keywords: acoustics, applied acoustics, acoustic monitoring methods, history of technology.

For citation: Zhukov, A. S., and Ardashev, D. V. (2023) Istoriiia primeneniia akustiki v mashinostroenii [The History of the Use of Acoustics in Mechanical Engineering], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 44, no. 2, pp. 254–268, DOI: 10.31857/S020596060023009-1.

Введение

Человеческое восприятие окружающего мира является в первую очередь визуальным, поэтому применение звука для оценки состояния той или иной системы в машиностроении может показаться неожиданным. Кажется, что слух — менее важный сенсорный инструмент, а информация, получаемая при изучении вибраций, возникающих в результате определенного воздействия и распространяющихся в определенной среде, недостаточно ценна, однако это далеко не так. Использование звуковых откликов при исследовании работы механизмов началось одновременно с их появлением. Оператор машины прислушивался к звуку, исходящему от машины во время ее работы, и, имея достаточный опыт и высокую квалификацию, мог некоторым образом оценить ее работоспособность, диагностировать отклонения. В машиностроении существует класс исследовательских методов, основанных на интерпретировании звуковых сигналов, исходящих от объекта изучения. Эти методы, называемые акустическими, имеют достоверное научное обоснование и применяются на производстве и в лабораториях. При этом машиностроительной сферой они не ограничены и их применение выходит далеко за пределы технических наук и инженерной деятельности. Рассмотрение истории развития акустики и ряда акустических методов исследования, применяемых в технике, и является задачей данной статьи.

Становление и основные этапы развития акустики

Термин «акустика» происходит от древнегреческого ἀκούω — «слышу», т. е. первоначально акустика являлась учением о слышимых явлениях, звуке, распространяющемся в различных средах: газах, жидкостях и твердых телах.

Частотный диапазон, доступный человеческому уху, составляет от 16 Гц до 20 кГц, что значительно ограничивало область применения акустики. При этом в зависимости от физиологических особенностей каждого человека данный диапазон может варьироваться. В частности, известно, что с возрастом слух имеет тенденцию к ухудшению, что выражается в значительном сужении диапазона частот, который человек может воспринимать без дополнительных технических приспособлений (например слуховых аппаратов и усилителей звука). Позже акустика развилась в полноценный и довольно значимый раздел физики — физическую акустику, в рамках которой изучаются свойства упругих колебаний в гораздо более широком спектре: от низких частот — инфразвука (0–16 Гц) — до предельно высоких частот — ультразвука (20^3 – 10^9 Гц) и гиперзвука (10^9 – 10^{13} Гц). Здесь исследуются характеристики упругих волн как при их свободном распространении, так и при их взаимодействии с различными телами, их переходе из одной среды в другую на макро- и микроуровне, а также практическое применение результатов таких исследований для широкого круга инженерных задач.

В истории развития акустики можно выделить различные периоды, Владимир Александрович Красильников, например, насчитывает их три ¹. По его мнению, первый период включает в себя наиболее обширный отрезок времени от Античности до рубежа XVII–XVIII вв. В это время были открыты основные физические свойства звука. Пифагор увязал между собой высоту звука (тона) с длиной струны (струнный музыкальный инструмент) или трубки (духовой музыкальный инструмент). Аристотель изучал эхо как явление, при котором звук отражается от твердых массивных препятствий; он объяснил физику этого явления, полагая, что звучащий объект распространяет вокруг себя области разрежения и сжатия в воздухе. В античную эпоху был создан известный трактат древнеримского архитектора Марка Витрувия Поллиона «Десять книг об архитектуре» (*De architectura libri decem*) ² (около 13 г. до н. э.). В своей работе Витрувий предлагает перечень наук, которыми должен владеть архитектор, и обосновывает его соответствующими аргументами. Среди прочего в разделе «Акустика театра» рассматриваются вопросы архитектурной акустики: «...театральное строительство немислимо без знания акустики и законов музыкальной теории» ³.

На рубеже Античности и Средних веков римский государственный деятель, философ-неоплатоник и теоретик музыки Аниций Манлий Торкват Северин Боэций создает трактат «Основы музыки» (*De institutione musica*) ⁴. Данный труд является одной из наиболее известных работ, посвященных музыке и обобщающих имеющиеся на тот момент времени знания о ней. Музыкальная акустика, согласно воззрениям Боэция, — это математически

¹ Красильников В. А. Введение в акустику: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992.

² Рус. пер.: Витрувий. Десять книг об архитектуре. М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1936.

³ Витрувий. Десять книг об архитектуре. М.: Архитектура-С, 2006 (репринтное издание 1936 г.).

⁴ Рус. пер.: Боэций Аниций Манлий Северин. Основы музыки. М.: Научно-издательский центр «Московская консерватория», 2012.

обоснованная теоретическая наука, а не искусство. И наука эта требует от музыканта обширных и подробных теоретических знаний о законах возникновения и распространения звука, о природе и проявлениях мировой гармонии в звуках. В своем труде Бозций ссылается на Пифагора, отдавая ему должное за его идею исследования музыкальной акустики.

В Средние века акустическое знание не получило заметного развития, однако с приходом Возрождения Леонардо да Винчи установил, что вне зависимости от природы источника звука принципиально распространение звуковой волны в пространстве происходит одинаково. Галилео Галилей обнаружил взаимосвязь между частотой вибраций звучащего объекта и высотой звука, амплитудой вибраций и громкостью звука (изложено в труде «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению» (*Discorsi e dimonstrazioni mathematiche, intorno a due nuove scienze, attenentialla mecanica i movimenti locali*)⁵. В 1630 г. французский математик, физик, философ и богослов, теоретик музыки Марен Мерсенн эмпирическим путем впервые определил скорость звука при выстреле из мушкета путем фиксации задержки во времени между вспышкой и хлопком, зафиксированными удаленным наблюдателем. Несколько позже на основании исследований Мерсенна французский математик и акустик Жозеф Совёр начал проводить опыты в области слуховых явлений. Именно он предложил использовать термин «акустика» при исследовании явлений, воспринимаемых на слух. При этом сам Совёр был глух с рождения. Он ввел понятия узлов и пучностей при колебаниях струн, разработал метод определения частот колебаний, выделил из общего колебательного процесса основной тон колебаний и кратные ему высшие гармоники, ввел понятие обертонов, а также предложил в качестве эталонной частоты в музыкальной шкале ноту с частотой 256 Гц.

Второй период в истории акустики длился с конца XVII в. и до 1920-х гг. и характеризуется наиболее интенсивным развитием этой науки.

Вышедший в 1687 г. основной труд Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии»⁶, в котором были заложены основы современной механики, также принят как точка отсчета в развитии теоретической базы акустики и механики сплошных сред. Роберт Гук в своем законе упругих деформаций, который позже лег в основу теории упругости, установил пропорциональную зависимость между силой и возникшей деформацией. В 1673 г. в классической работе по механике «Маятниковые часы»⁷ Христиан Гюйгенс сформулировал принцип, названный принципом Гюйгенса, и стал основоположником волновой теории, объясняющей и описывающей возникновение и распространение волн, в том числе акустических и оптических.

⁵ Рус. пер.: Галилео Галилей. Сочинения. М.; Л.: ГИТТЛ, 1934. Т. 1: Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению.

⁶ Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. Londinium: J. Streater, 1687.

⁷ Hugenius Ch. Horologium oscillatorium: sive, De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae. Parisius: F. Muguet, 1673.

На основании разработанных теорий в этот период акустика получила мощный импульс к развитию в качестве раздела механики. Были созданы теории механических колебаний, излучения и распространения акустических волн в различных средах. Появляются физические величины, характеризующие акустическое поле (звуковое давление (Па), скорость звука (м/с), интенсивность звука (Вт/м²) и методы измерения этих характеристик. Были открыты инфразвук и ультразвук, включенные теперь в частотный спектр звука. Дано физическое обоснование тембру звука, его окраске при воспроизведении одной и той же частоты на разных музыкальных инструментах, согласованное с тоном и обертонами.

Таких величайших умов XVIII в., как Леонард Эйлер, Даниил Бернулли, Жан Лерон Д'Аламбер, Жозеф Луи Лагранж, можно причислить к основоположникам современной математической физики, в частности ее раздела, связанного с колебаниями тел. Их работы по математическому моделированию упругих колебаний иногда противоречили друг другу в деталях, однако в итоге сложились в единую теорию, значение которой чрезвычайно велико до сего дня.

Математическое описание динамики точки Эйлер дает в 1765 г. в своей работе «Теория движения твердых тел»⁸. Бернулли с 1727 по 1778 г. изучает колебательные процессы, также регулярно прибегая к математическому их описанию⁹. В ходе исследований колебаний струн и стержней он ввел понятие простого гармонического колебания. Именно Бернулли удалось математически обосновать, что реальный колебательный процесс тела состоит из суммы множества простых гармонических колебаний. Д'Аламбер в 1743 г. в своем «Трактате о динамике»¹⁰ впервые формулирует правила выведения дифференциальных уравнений для описания движения любых материальных систем¹¹. Лагранж, в свою очередь, подытоживает труды старших коллег в своем труде 1788 г. «Аналитическая механика»¹² и создает учение о дифференциальном описании движения материальных систем.

Представлением об интерференции и дифракции упругих волн, развивающим работу Гюйгенса, занимались Томас Юнг и Огюстен Жан Френель. В 1842 г. Кристиан Допплер в статье «О цветном свете двойных звезд и некоторых других звезд на небесах»¹³ описывает явление, которое впоследствии получило название «эффект Доплера». Данный эффект устанавливает зависимость частоты звуковой волны от параметров перемещения источника звука относительно приемника звука.

⁸ Euler, L. *Theoria motus corporum solidorum*. Rostochius; Gryphiswaldia: A. F. Röse, 1765.

⁹ Григорьян А. Т. Даниил Бернулли, 1700–1782. М.: Наука, 1981.

¹⁰ d'Alembert J. L. *Traité de dynamique*. Paris: J. B. Coignard, 1743.

¹¹ Феоктистов В. В., Феоктистова О. П. Жан Лерон Д'Аламбер и его принцип в современной интерпретации // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана (электронный журнал). 2016. № 6. С. 260–272.

¹² Pulte H. Joseph Louis Lagrange, *Mécanique analitique*, first edition (1788) // Landmark Writings in Western Mathematics 1640–1940 / I. Grattan-Guinness (ed.). Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. P. 208–224.

¹³ Doppler Ch. *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*. Prag: In Kommission bei Borrosch & André, 1842.

Нельзя не упомянуть еще одного великого ученого-исследователя колебательных процессов, внесшего значимый вклад для развития как акустики, так и вообще механики и физики — Жана-Батиста Жозефа Фурье. Созданный им метод разложения сложного колебательного процесса на элементарные составляющие до сих пор получает широкое применение во всевозможных методиках, направленных на анализ и синтез вибраций ¹⁴.

Герман фон Гельмгольц, занимавшийся эмпирическими методами анализа звука посредством разложения в спектр, внес существенный вклад в представление о структуре природной акустики как сумме гармонических колебаний ¹⁵. В работе «Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа теории музыки» ¹⁶ он исследовал явление резонанса, ввел термины консонанс и диссонанс, предложил первый теоретический прототип слухового аппарата. Его труды в дальнейшем легли в основу физиологической и музыкальной акустики.

Британский физик Джон Уильям Стретт, более известный под фамилией Рэлей, которую ученый получил вместе с баронским титулом, также оказал одно из наиболее значимых влияний на физическую акустику. Практические приложения теории колебаний в акустике и оптике составляли ядро научных интересов Рэрея. В 1873 г. он разрабатывает ряд основных теорем, формирующих новый облик линейной теории колебаний. Его теоретический расчет возможности существования волн на поверхности твердого тела (граница отделяет объем твердого тела от другой среды — воздуха, вакуума, жидкости) до сегодняшнего дня применяется в сейсмологии, поверхностные акустические волны (ПАВ) получили название рэлеевских волн ¹⁷.

Важно отметить работы отечественных ученых на поприще акустики, выполненные на рубеже XIX и XX вв. Николай Алексеевич Умов ввел новую физическую величину — плотность потока энергии для упругих волн (Вт/м^2), а также вектор плотности потока энергии, называемый вектором Умова. Исследования Петра Николаевича Лебедева и Бориса Николаевича Неклепаева были направлены на выработку электричества посредством звуковой волны, обладающей специальными характеристиками (акустика микроуровня).

Зарождение архитектурной акустики принято связывать с именем американского ученого Уоллеса Сэбина, который в конце XIX в. создал формулу, связывающую время реверберации в помещении с его объемом и коэффициентом поглощения ¹⁸.

¹⁴ Корнев В. В., Хромов А. П. О методе Фурье в одной смешанной задаче // Математика. Механика. 2014. № 16. С. 32–35.

¹⁵ Самохин В. П., Мещеринова К. В. Памяти Германа Людвиг Фердинанда фон Гельмгольца (1821–1894) // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана (электронный журнал). 2014. № 9. С. 14–51.

¹⁶ Helmholtz H., von. Die Lehre den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Braunschweig: F. Vieweg und Sohn, 1863.

¹⁷ Рытов С. М. Теория звука. В 2 т. М.: ГИТТЛ, 1955.

¹⁸ Киселева Е. Г. История развития архитектурной акустики // Жилищное строительство. 2010. № 12. С. 26–29.

Третий период развития акустики начинается в 1920-х гг. и продолжается до сегодняшнего дня. Выделение этого этапа прежде всего связано с появлением радиотехники и развившихся из нее электроакустики, радиовещания, звукозаписи и звуковоспроизведения, что в совокупности оказало грандиозное влияние на способы коммуникации и передачи информации, сформировало совершенно новое медиапространство, навсегда изменило отношение человека к большим пространствам. Здесь акустика, считавшаяся уже полностью изученным и исчерпавшим себя разделом механики, вновь получает сильнейший толчок и преобразуется в автономную сферу науки. В качестве самостоятельной области акустика послужила фундаментом для таких направлений, как акустика движущихся сред, акустоэлектроника и акустооптика, гидроакустика и акустогидродинамика, кристаллоакустика, магнитоакустика, нелинейная акустика и др.

Приведем далее краткое описание основных направлений акустики, представленных в третьем периоде ее развития. Интерес к нелинейной акустике, занимающейся вопросом о распространении высокоинтенсивных звуковых волн, был вызван запросами новой техники, которые в XX в. нарастали особенно стремительно. Наибольшим вкладом в этом направлении отметились русские физики Николай Николаевич Андреев и Александр Александрович Эйхенвальд. Так, Андреев и Иван Гаврилович Русаков (1930-е гг.), а позже Дмитрий Иванович Блохинцев (1940-е гг.) и Майкл Джеймс Лайтхилл (1950-е гг.) занимались разработкой теории акустики движущихся сред и аэроакустикой, в рамках которых исследовался процесс аэродинамической генерации звука в движущейся воздушной среде.

Наиболее значимые имена в гидроакустике — Моррис Ирвинг, Леонид Максимович Бреховских, Лазарь Давидович Розенберг, исследовавшие независимо друг от друга вопросы сверхдальнего (на тысячи километров) распространения звука в водной среде¹⁹. Звукопоглощение, архитектурная и строительная акустика зародились благодаря Сергею Николаевичу Ржевкину, Георгию Даниловичу Малюжину и Вадиму Владимировичу Фурдуеву, а сегодня благодаря им возникли такие направления, как теория шумоизоляции и акустоэкология.

Важной вехой стало открытие в 1930-х гг. Пьером Бикаром и Рене Люком, а также независимо от них Петером Дебаем явления дифракции света с помощью ультразвуковых волн, позволившее в дальнейшем разработать метод ультразвукового неразрушающего контроля, который применяется вплоть до настоящего времени как наиболее эффективный метод контроля скрытых дефектов материала. Ультразвуковая дефектоскопия сегодня является обязательной процедурой технического контроля ответственных деталей общего, точного авиационного, атомного и других групп машиностроения, в особенности имеющих неразъемные сварные соединения.

Экспериментальные исследования гиперзвука (более 10^9 Гц) проводил в СССР Константин Николаевич Баранский. Кроме того, ранее в этом же

¹⁹ Егоров С. В. О некоторых вехах развития советской акустики (к 140-летию со дня рождения академика Николая Николаевича Андреева) // Управление наукой: теория и практика. 2020. Т. 2. № 2. С. 178–188.

направлении работали Лев Давыдович Ландау и Юрий Борисович Румер. Интерес представляет свойство некоторых материалов (полупроводники и металлы) поглощать упругие гиперзвуковые и ультразвуковые волны; разрабатывается и развивается соответствующая теория (теория поглощения ультразвука при комнатных температурах).

Психофизиологическая акустика (Георг Бекеши) наравне с технической получает развитие в середине XX в. Объектами исследований здесь являются человеческая речь и речевой аппарат; разрабатываются методы передачи вербальной информации, кодирования и расшифровки речи, определения особенностей слухового восприятия и др. Психофизиологическая акустика находится на границе физиологии органов речи и слуха с биофизикой.

Медицинские приложения акустических знаний приобрели в XX в. совершенно беспрецедентный статус. Методами ультразвуковой томографии с высокой точностью диагностируются нарушения или изменения во внутренних органах человека, за счет чего значительно повышаются темпы развития диагностической и исследовательской медицины. Выявлено бактерицидное свойство ультразвука, нашедшее применение при стерилизации продуктов или инструментов. Разработаны приборы для протезирования голосового и слухового аппарата человека. Имеет место применение ультразвука в хирургии.

История создания и развития методов акустического контроля в машиностроении

Контроль состояния объектов с применением акустической информации можно считать одним из старейших методов технического диагностирования. Основанием для этого является его относительная простота и наглядность. Акустические характеристики целостного гомогенного объекта всегда будут отличаться от характеристик звука, свойственных аналогичному объекту с нарушениями в структуре или химическом составе. Наиболее широкое распространение в технике получили акустические методы ультразвуковой дефектоскопии и акустической эмиссии.

Основные вехи становления акустических методов дефектоскопии в машиностроении связаны со следующими именами.

Техническая возможность разработки аппаратного обеспечения методов акустического контроля появилась благодаря французским ученым-физикам Жаку и Пьеру Кюри, открывшим свойство кристаллов (в частности кристаллов кварца) преобразовывать электрические колебания в звуковые (пьезоэлектрический эффект, 1880–1881 гг.)²⁰. На основании обратного пьезоэлектрического эффекта были разработаны высокочастотные и ультразвуковые акустические излучатели, получившие чрезвычайно широкое распространение в технике. Так, для приборов ультразвукового контроля до сих пор

²⁰ Curie J. Recherches sur le pouvoir inducteur spécifique et sur la conductibilité des corps cristallisés. Paris: Imprimerie de “La Lumière électrique”, 1888.

используются такие генераторы, что позволяет выявлять трещины и другие дефекты в материале объекта и сварных швах.

Уже упоминавшийся британский физик Рэлей в 1885–1890 гг. создает классическую теорию акустики, благодаря которой пришло понимание принципов и законов распространения звука в твердых телах. Математический аналитический подход объяснения звуковых явлений в его труде «Теория звука»²¹ сохраняет свою актуальность вплоть до настоящего времени. Большинство методов технического контроля и в наше время базируются на законах, установленных Рэлеем.

Следующим важным шагом на пути к созданию акустических методов технического контроля в их современном виде можно считать создание в 1915 г. французским физиком Полем Ланжевенем системы *SONAR (sound navigation and ranging)*²². Основной принцип ее работы заключается в генерации звукового сигнала и улавливании отраженного от объекта эха этого сигнала, их сравнении и получении различного рода информации на основании такого сравнения.

К 1930-м гг. накопилось достаточно теоретических знаний и технических возможностей для удовлетворения потребности в выявлении различного рода отклонений от нормы (брака) в продукции машиностроительной отрасли путем создания специальных приборов – дефектоскопов. В 1928 г. советский ученый-электротехник Сергей Яковлевич Соколов разрабатывает первые ультразвуковые дефектоскопы, модернизированные версии которых в дальнейшем широко применялись на многих заводах страны²³. В 1942 г. американец Доналд Спрул применяет принципы ультразвуковой эхолокации для обнаружения несплошностей в сталях²⁴. Вскоре в 1945 г. компанией «Сперри продактс инк.» (*Sperry Products Inc.*) был запатентован первый эхоимпульсный дефектоскоп и метод ультразвукового контроля, созданный Флойдом Фаерстоуном²⁵. В 1949 г. в Германии после рассекречивания были обнародованы имена создателей эхоимпульсных дефектоскопов. Две группы инженеров, одну из которых возглавляли Йозеф и Герберт Крауткремеры (*Josef und Herbert Krautkrämer*), а вторую – инженер-механик Карл Дойч, одновременно и независимо друг от друга создают приборы для выявления дефектов.

В 1950 г. Давид Соломонович Шрайбер (Всесоюзный институт авиационных материалов) продолжает развивать идеи о создании прибора неразрушающего контроля, имеющего принцип работы, основанный на ультразвуковых акустических колебаниях. Им также был разработан эхоимпульсный

²¹ *Strutt J. W., Baron Rayleigh. The Theory of Sound. London: Macmillan, 1877. Vol. 1; 1878. Vol. 2.*

²² *Zimmerman D. "A More Creditable Way": The Discovery of Active Sonar, the Langevin – Chilowsky Patent Dispute and the Royal Commission on Awards to Inventors // War in History. 2018. Vol. 25. No. 1. P. 48–68.*

²³ *Соколов С. Я. Устройство для определения неоднородностей в твердых, жидких и газообразных средах посредством ультразвуковых колебаний. Патент СССР № 49426. 1936.*

²⁴ *Sproule D. Ultrasonic Flaw Detection Apparatus. US Patent No. 2 972 069. 1961.*

²⁵ *Firestone F. A. Method of Supersonic Inspection. US Patent No. 2 592 134. 1952.*

дефектоскоп нового типа. Данный метод находит применение в авиастроении и вполне успешно. Кроме того, Шрайбер серьезно занимается изучением теоретических основ данного метода и публикует ряд работ по данной теме, среди которых труд «Ультразвуковая дефектоскопия»²⁶ пользуется наибольшей популярностью. Данная работа содержит описание основных видов металлургических дефектов, подлежащих обнаружению методами дефектоскопии, физических основ и различных методов ультразвуковой дефектоскопии, а также применяемой при этом аппаратуры.

Юлий Викторович Ланге (Всесоюзный институт авиационных материалов) расширяет представление о применении акустических методов контроля и в 1958 г. предлагает новый импедансный метод контроля с использованием изгибных колебаний²⁷. В результате были созданы несколько моделей импедансных дефектоскопов серии НАД, которые выпускались серийно.

Одним из крупнейших ученых в области ультразвуковой дефектоскопии того периода является Игорь Николаевич Ермолов (Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения). Он создает теорию акустического тракта — теорию о распространении и отражении ультразвуковых волн²⁸.

Уже в 1980-е разработкой портативных ультразвуковых дефектоскопов (УЗДЛ-61-2М, УЗДК-1, УЗДБ-1) занимался Борис Иванович Выборнов. Им были созданы методики контроля лопаток турбин и компрессоров, кожухов камер сгорания двигателей, барабанов авиационных колес²⁹.

Одновременно с ультразвуковым методом зародился и получил развитие еще один принципиально отличный акустический метод технического контроля — акустико-эмиссионный. Явление акустической эмиссии заключается в возникновении упругих акустических колебаний высокой частоты в материале (часто в металлах) при перестроении его кристаллической структуры. Такое перестроение может быть вызвано различными причинами, связанными с перераспределением внутренних напряжений материала.

Исторически возникновение понятия акустической эмиссии связано с исследованием такого явления, как «крик олова», которое в 1917 г. удалось объяснить процессом спонтанного двойникования кристаллической решетки материала. Ян Чохральский связал характерный звук, возникающий в химически чистом олове при его пластической деформации, со структурными изменениями в металле и высвобождающейся при этом энергией³⁰. В середине XX в. было замечено, что разрушение металлических балок вследствие

²⁶ Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1965.

²⁷ Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991.

²⁸ Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981; Федоров А. В. Модель акустического тракта раздельно-совмещенного оптико-акустического преобразователя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 339–347.

²⁹ Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985.

³⁰ Tomaszewski P. E. Jan Czochralski — Father of the Czochralski Method // Journal of Crystal Growth. 2002. Vol. 236. No. 1. P. 1–4.

высоких нагрузок сопровождается излучением упругих волн широкого спектра частот. Несколько десятков лет понадобилось для того, чтобы к 1970-м гг. техническое развитие достигло необходимого уровня, были разработаны специальные датчики с мембраной в качестве чувствительного элемента, с помощью которых на практике стали использовать регистрацию деформационных шумов для оценки качества материалов и изделий при техническом контроле и испытаниях.

Отметим наиболее важные шаги, пройденные на пути к современному уровню владения методом акустической эмиссии.

В 1920 г. советские физики Абрам Федорович Иоффе и Марина Викторовна Классен-Неклюдова занимались изучением природы пластичности и разрушения кристаллических тел и исследовали акустические шумы, возникающие при деформировании кристаллов каменной соли и цинка, нагретых до определенной температуры. Ими была установлена связь (пока только качественная) между шумами, источником которых являются сдвиги отдельных кристаллов соли и цинка, и параметрами пластической деформации материала ³¹.

В 1948 г. американский ученый-акустик Уоррен Перри Мейсон уже применяет специальную электронную аппаратуру и пьезоэлектрические датчики для исследования явления двойникования олова ³². При пластическом деформировании оловянных образцов (изгиб и сжатие) наблюдались ультразвуковые шумы, связанные с движением дислокаций.

Более серьезно и систематически к исследованию шумов, возникающих при деформировании материалов, подошел Йозеф Кайзер, в 1950 г. защитивший докторскую диссертацию по этой теме ³³. Он обнаружил, что если к образцу повторно прикладывается аналогичная по величине или меньшая нагрузка, то акустического отклика не следует. Это явление получило название эффекта Кайзера. Также он впервые обосновал возможность использования параметров акустической эмиссии для определения напряжений в материале и предупреждения разрушения. Результаты работ Кайзера вызвали большой интерес, и множество ученых и инженеров разных стран продолжили его исследования. Во Франции были исследованы шумовые явления, возникающие при образовании площадки текучести на образце из стали, получившей название «полосы Людерса». Был открыт эффект Портевена – Ле Шателье, возникающий при упрочнении металла и также сопровождающийся акустическими явлениями. В США Брэдфорд Хартли Скофилд классифицировал шумы, возникающие в материалах, выделив два их типа: непрерывно излучаемые шумы и шумы взрывного характера. Кроме того, Скофилдом было установлено, что источником шума при деформации может выступать поверхностный слой материала, отличающийся

³¹ *Иоффе А. Ф.* Физика кристаллов. М.; Л.: Госиздат, 1929; *Классен-Неклюдова М. В.* Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

³² *Mason W. P.* Electrical and Mechanical Analogies // *Bell System Technical Journal*. 1941. Vol. 20. No. 4. P. 405–414.

³³ *Kaiser J.* Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch. Dr.-Ing. Dissertation, Technischen Hochschule München. 1950.

по характеристикам от основной массы материала (например анодированный слой на алюминии)³⁴.

Начиная с 1950-х гг. инициативу по исследованиям деформационных шумов перехватывают США. Для подобных исследований начинает активно применяться электронно-вычислительная техника (например *IBM-7044*). Были разработаны системы обнаружения мест расположения дефектов (трещин) с точностью до одного дюйма. А следующим шагом стало создание Филипом Хаттоном системы непрерывного контроля изменений структуры материала³⁵. Наибольшее внимание было уделено процессам возникновения и развития хрупких дефектов, применялась данная система для контроля элементов конструкции гражданских ядерных реакторов. Одновременно с этим метод акустической эмиссии начал применяться для контроля качества сварных соединений. В. Джоли исследовал процессы быстрого охлаждения сварных швов³⁶, которые часто сопровождаются возникновением трещин. Было установлено, что данным процессам также свойственно возникновение интенсивных шумов. Высшей точкой в развитии акустико-эмиссионного метода технического контроля можно считать его применение в авиационной и космической отраслях сотрудниками фирмы «Аэроджет дженерал корпорейшн» (*Aerojet General Corporation*) Алленом Т. Грином³⁷ и Карлом Хартбауэром³⁸. В 1960-х гг. был создан новый класс аппаратуры для быстрого нахождения дефектов в сварных конструкциях, была определена зависимость интенсивности акустического излучения от скорости роста трещины. И к 1970-м гг. уже не остается сомнений в практической полезности метода акустической эмиссии для выявления разного рода дефектов в конструкциях без нарушая их целостности.

В России 1950-х гг. метод акустической эмиссии применялся иным образом. Сферой его применения прежде всего оказывается геологическая разведка и сейсмоакустика. Академики Александр Александрович Скочинский и Григорий Александрович Гамбурцев в 1952 г. вполне успешно исследуют деформационные шумы горных пород с целью прогнозирования выбросов угля и газа в шахтах³⁹. Для этого также разрабатывается новый тип аппаратного обеспечения — приборы ЗУА-1, ЗУА-2 для измерений сейсмической активности, что позволило значительно снизить количество неспрогнозированных случаев выбросов угля и пород в шахтах.

³⁴ Schofield B. H., Barreis R. A., Kyrala A. A. Acoustic Emission under Applied Stress // WADC Technical Report 58—194. 1958.

³⁵ Hutton P. H. Acoustic Emission in Metals as an NDT Tools // Materials Evalution. 1968. No. 7. P. 125—129.

³⁶ Оглезнева Л. А. Акустические методы контроля и диагностики. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009.

³⁷ Green A. T. Feasibility Study of Acoustic Depressurization System // Aerojet-General Corp. Rep. No. NAS 7-310. Aerojet-General Corp. Sacramento, CA, United States, 1965.

³⁸ Hartbower C. E., Morais C. F., Reuter W. G., Crimmins P. P. Acoustic Emission from Low-Cycle High-Stress-Intensity Fatigue // Engineering Fracture Mechanics. 1973. Vol. 5. No. 3. P. 783—789.

³⁹ Мельников Н. В. Роль академика А. А. Скочинского в развитии горной науки в СССР // Проблемы горного дела. М.: Недра, 1974. С. 5—12.

Заключение

Можно констатировать, что постоянно возрастающий уровень автоматизации производства и связанная с этим необходимость отслеживания параметров процесса в режиме реального времени является данностью сегодняшнего машиностроения. Для обеспечения высокого уровня автоматизации требуются источники достоверной информации, описывающей свойства системы в каждый момент времени и позволяющей осуществлять эффективный контроль. Методы, использующие акустические явления в качестве таких источников, обладают рядом достоинств, среди которых дешевизна, высокая точность, возможность применения без остановки производства. Из перечисленных подобных методов наибольшим потенциалом для применения на машиностроительных предприятиях обладает метод акустической эмиссии. Во многом это связано с современными возможностями техники. До сих пор не до конца исследованы все взаимосвязи характеристик явления акустической эмиссии, вызванных высвобождающейся энергией при структурных изменениях в материале, и свойствами этого материала. Перспективы установления таких взаимосвязей могут быть многообещающими.

Что касается применяющихся для реализации метода технических средств, то они достигли очень высокого уровня. Аппаратное сенсорное обеспечение обладает свойствами широкой адаптируемости к различным технологическим условиям, малым размером самих датчиков, сравнительным удобством размещения датчиков, высокой чувствительностью, способностью к фильтрации помех даже очень слабого сигнала ⁴⁰.

Сегодня при разработке металлообрабатывающего оборудования происходит оснащение основной технической системы множеством дополнительных систем, призванных снизить долю брака при производстве с наименьшими затратами человеческого труда. Так, авторы говорят о существовании потребности внедрения в конструкцию шлифовальных станков специальных акустико-эмиссионных датчиков для решения целого ряда задач, направленных на поддержание оптимальных условий обработки, изделий; например, использование подобных датчиков для распознавания контакта инструмента с заготовкой в процессе обработки позволяет снизить долю вспомогательного времени и повысить общую эффективность операции ⁴¹.

Стоит также сказать, что высокоперспективным направлением является применение систем мониторинга, в которых используются несколько принципиально разных датчиков обнаружения нежелательных явлений. Такие системы являются более эффективными ⁴² по сравнению с контролем процесса только по одному критерию. Современное развитие самообучающихся технологий, использующих нейронные сети, позволяет применять такой

⁴⁰ He B. et al. A Survey of Methods for Detecting Metallic Grinding Burn // Measurement. 2019. No. 134. P. 426–439.

⁴¹ Wegener K. et al. Recent Developments in Grinding Machines // CIRP 780 Annals – Manufacturing Technology. 2017. No. 66. P. 779–802.

⁴² Nath C. et al. Integrated Tool Condition Monitoring Systems and Their Applications: A Comprehensive Review // Procedia Manufacturing. 2020. No. 48. P. 852–863.

подход достаточно успешно. Совокупная информация, полученная из нескольких источников, позволяет составить более полное представление не только о фактическом состоянии системы в определенный момент, но и о причинах, приведших к такому состоянию, а также дать более глубокое понимание физики явлений.

Разумеется, разного рода проблемы также свойственны методу акустической эмиссии. В частности, одной из наиболее острых из них является высокая сложность поступающих сигналов. Поскольку сигнал описывает одновременно целый комплекс событий и явлений, происходящих как в структуре материала, так и за ее пределами (упругопластическая деформация, изменение внутренней текстуры, износ инструмента, фрикционные процессы), выделить из него отдельную составляющую бывает достаточно сложно⁴³. Проведение дальнейших исследований и устранение указанных несовершенств метода повысит его способность к эффективному прогнозированию и диагностике параметров систем, усилит заинтересованность в нем руководителей производств и приведет к его более широкому распространению.

References

- Boetsii Anitsii Manlii Severin (Boetius Anicius Manlius Severinus) (2012) *Osnovy muzyki [Fundamentals of Music]*. Moskva: Nauchno-izdatel'skii tsentr "Moskovskaia konservatoriia".
- Curie, J. (1888) *Recherches sur le pouvoir inducteur spécifique et sur la conductibilité des corps cristallisés*. Paris: Imprimerie de "La Lumière électrique".
- d'Alembert, J. L. R. (1743) *Traité de dynamique*. Paris: J. B. Coignard.
- Doppler, Ch. (1842) *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*. Prag: In Kommission bei Borrosch & André.
- Egrev, S. V. (2020) O nekotorykh vekhakh razvitiia sovetskoi akustiki (k 140-letiiu so dnia rozhdeniia akademika Nikolaia Nikolaevicha Andreeva) [On Some Milestones in the Development of Soviet Acoustics (Towards the 140th Anniversary of the Birth of Academician Nikolai Nikolaevich Andreev)], *Upravlenie nauko: teoriia i praktika*, vol. 2, no. 2, pp. 178–188.
- Ermolov, I. N. (1981) *Teoriia i praktika ul'trazvukovogo kontrolya [Theory and Practice of Ultrasonic Testing]*. Moskva: Mashinostroenie.
- Euler, L. (1765) *Theoria motus corporum solidorum*. Rostochius and Gryphiswaldia: A. F. Röse.
- Fedorov, A. V. (2022) Model' akusticheskogo trakta razdel'no-sovmeshchennogo optiko-akusticheskogo preobrazovatelya [A Model of the Acoustic Path of the Split-Coupled Optical-Acoustic Transducer], *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, vol. 22, no. 2, pp. 339–347.
- Feoktistov, V. V., and Feoktistova, O. P. (2016) Zhan Leron D'Alamber i ego printsip v sovremennoi interpretatsii [Jean le Rond d'Alembert and His Principle in Modern Interpretation], *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman*, no. 6, pp. 260–272.
- Galileo Galilei (1934) *Sochineniia [Works]*. Moskva and Leningrad: GITTL, vol. 1: Matematicheskie dokazatel'stva, kasaiushchiesia dvukh novykh otraslei nauki, otnosiashchikhsia k mekhanike i mestnomu dvizheniiu [Mathematical Discourses Concerning Two New Sciences Relating to Mechanics and Local Motion].
- Green, A. T. (1965) *Feasibility Study of Acoustic Depressurization System*, Aerojet-General Corp. Rep. No. NAS 7-310. Aerojet-General Corp. Sacramento, CA, United States.
- Grigor'ian, A. T. (1981) *Daniil Bernulli, 1700–1782 [Daniel Bernoulli, 1700–1782]*. Moskva: Nauka.
- Hartbower, C. E., Morais, C. F., Reuter, W. G., and Crimmins, P. P. (1973) Acoustic Emission from Low-Cycle High-Stress-Intensity Fatigue, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 5, no. 3, pp. 783–789.

⁴³ He et al. A Survey of Methods... P. 435.

- He, B. et al. (2019) A Survey of Methods for Detecting Metallic Grinding Burn, *Measurement*, no. 134, pp. 426–439.
- Helmholtz, H., von. (1863) *Die Lehre den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: F. Vieweg und Sohn.
- Hugenius, Ch. (1673) *Horologium oscillatorium: sive, De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*. Parisius: F. Muguet.
- Hutton, P. H. (1968) Acoustic Emission in Metals as an NDT Tools, *Materials Evalution*, no. 7, pp. 125–129.
- Ioffe, A. F. (1929) *Fizika kristallov [Crystal Physics]*. Moskva and Leningrad: Gosizdat.
- Kaiser, J. (1950) *Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch. Dr.-Ing. Dissertation*, Technischen Hochschule München.
- Kiseleva, E. G. (2010) Istoriia razvitiia arkhitekturnoi akustiki [History of Architectural Acoustics], *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, no. 12, pp. 26–29.
- Klassen-Nekliudova, M. V. (1960) *Mekhanicheskoe dvoynikovanie kristallov [Mechanical Twinning of Crystals]*. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR.
- Kornev, V. V., and Khromov, A. P. (2014) O metode Fur'e v odnoi smeshannoi zadache [On the Fourier Method in a Mixed Problem], *Matematika. Mekhanika*, no. 16, pp. 32–35.
- Krasil'nikov, V. A. (1992) *Vvedenie v akustiku [Introduction to Acoustics]*. Moskva: Izdatel'stvo MGU.
- Lange, Iu. V. (1991) *Akusticheskie nizkochastotnye metody i sredstva nerazrushaiushchego kontrolya mnogosloinykh konstruktii [Acoustic Low-Frequency Methods and Means of Nondestructive Testing of Multilayer Structures]*. Moskva: Mashinostroenie.
- Mason, W. P. (1941) Electrical and Mechanical Analogies, *Bell System Technical Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 405–414.
- Meĭnikov, N. V. (1974) Rol' akademika A. A. Skochinskogo v razvitiĭ gornoi nauki v SSSR [The Role of Academician A. A. Skochinsky in the Development of Mining Science in the USSR], *Problemy gornogo dela*. Moskva: Nedra, pp. 5–12.
- Nath, C. (2020) Integrated Tool Condition Monitoring Systems and Their Applications: A Comprehensive Review, *Procedia Manufacturing*, no. 48, pp. 852–863.
- Newton, I. (1687) *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londinium: J. Streater.
- Oglezneva, L. A. (2009) *Akusticheskie metody kontrolya i diagnostiki [Acoustic Monitoring and Diagnostic Methods]*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.
- Pulte, H. (2005) Joseph Louis Lagrange, Mécanique analytique, first edition (1788), in: Grattan-Guinness, I. (ed.) *Landmark Writings in Western Mathematics 1640–1940*. Amsterdam: Elsevier B. V., pp. 208–224.
- Rytov, S. M. (1955) *Teoriia zvuka [Theory of Sound]*. Moskva: GITTL.
- Samokhin, V. P., and Meshcherinova, K. V. (2014) Pamiati Germana Liudviga Ferdinanda fon Gel'mgol'tsa (1821–1894) [In Memory of Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894)], *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman*, no. 9, pp. 14–51.
- Schofield, B. H., Barreis, R. A., and Kyrala, A. A. (1958) Acoustic Emission under Applied Stress, *WADC Technical Report 58–194*.
- Shraiber, D. S. (1965) *Ul'trazvukovaia defektoskopiia [Ultrasonic Defectoscopy]*. Moskva: Metallurgiiia.
- Strutt, J. W., Baron Rayleigh (1877–1878) *The Theory of Sound*. London: Macmillan.
- Tomaszewski, P. E. (2002) Jan Czocharlski – Father of the Czocharlski Method, *Journal of Crystal Growth*, vol. 236, no. 1, pp. 1–4.
- Vitruvii (Vitruvius) (1936) *Desiat' knig ob arkhitekture [Ten Books on Architecture]*. Moskva: Izdatel'stvo Vsesoiuznoi akademii arkhitektury.
- Vitruvii (Vitruvius) (2006) *Desiat' knig ob arkhitekture [Ten Books on Architecture]*. Moskva: Arkhitektura-S.
- Vybornov, B. I. (1985) *Ul'trazvukovaia defektoskopiia [Ultrasonic Defectoscopy]*. Moskva: Metallurgiiia.
- Wegener, K. (2017) Recent Developments in Grinding Machines, *CIRP 780 Annals – Manufacturing Technology*, no. 66, pp. 779–802.
- Zimmerman, D. (2018) “A More Creditable Way”: The Discovery of Active Sonar, the Langevin – Chilowsky Patent Dispute and the Royal Commission on Awards to Inventors, *War in History*, vol. 25, no. 1, pp. 48–68.

Received: August 31, 2022.