

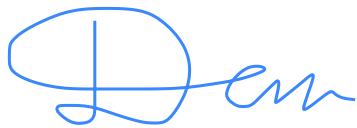
На правах рукописи

Дегтярев Максим Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
ПЛАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **кандидат технических наук, доцент
ЩИПАКОВ Никита Андреевич**
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры
«Сварка, диагностика и специальная
робототехника»

Официальные оппоненты: **доктор технических наук, профессор
КАЧАНОВ Владимир Климентьевич**
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», профессор

**доктор технических наук
ТИХОНОВ Дмитрий Сергеевич**
ООО «НПЦ «ЭХО+», заместитель
генерального директора–технический директор

Ведущая организация: **ИФМ УрО РАН**

Защита состоится «21» марта 2024 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направить на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Панкратов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Нагрузки, которым подвержены лопатки турбин, являются одними из самых значительных среди всех других нагрузок, возникающих в деталях и узлах авиационных двигателей и стационарных энергетических установок. В связи с этим кенным изделиям предъявляются высокие требования, касающиеся их надежности. Лопатки работают при высоких температурах, величина которых может превышать 1000 градусов, и имеют сложную геометрическую форму с переменной толщиной сечения и большим количеством концентраторов напряжений. Основными материалами, используемыми при изготовлении лопаток, являются жаропрочные никелевые сплавы, которые обеспечивают необходимые прочностные характеристики и стойкость к коррозии. Одним из основных способов производства турбинных лопаток в настоящий момент является литье. Однако современный рынок требует повышение скорости производства и значительную экономию строительных материалов. Эти задачи могут быть решены с использованием аддитивного производства изделий, которое заключается в выращивания деталей сложной формы путем сплавления гранулированного порошка на платформе построения с использованием высокотемпературных источников тепла. Наиболее зарекомендовавшей себя на сегодняшний день технологией является селективное лазерное плавление (СЛП), заключающееся в плавлении строительного материала слой за слоем по траектории, определяемой геометрическими особенностями изделия. Широкий диапазон параметров процесса плавления позволяет добиваться прочностных и эксплуатационных характеристик, не уступающих характеристикам аналогичных изделий традиционного производства.

Одним из основных препятствий для внедрения новой технологии производства является отсутствие верифицированных методик контроля, обеспечивающих достоверное обнаружение дефектов изделий СЛП с учетом уникальных особенностей технологии послойного выращивания.

В настоящий момент существует множество исследований о возможности использования различных методов неразрушающего контроля для изделий СЛП. Анализ показывает, что наиболее перспективными являются ультразвуковые методы контроля. Использование различных типов волн позволяет реализовать контроль изделия в полном объеме и с высокой производительностью выявлять различные дефекты, включая наиболее опасные плоскостные. Однако, существует ряд ограничений, касающихся применения этих методов. Большое количество исследователей констатируют наличие выраженной механической анизотропии свойств в аддитивных материалах из жаропрочных никелевых сплавов. Данный эффект приводит к анизотропии акустических свойств, которая создает проблемы для правильной интерпретации результатов ультразвукового контроля ввиду неравномерной чувствительности при прозвучивании материала в различных направлениях. В применении к изделиям сложной формы этот вопрос в настоящее время недостаточно изучен, а необходимые методические подходы, позволяющие

учесть влияние анизотропии свойств материалов СЛП на результаты ультразвукового контроля, не разработаны.

Цель работы: обеспечение равномерной чувствительности при проведении ультразвукового контроля материала турбинных лопаток, произведенных методом селективного лазерного плавления из жаропрочных никелевых сплавов, обладающих выраженной анизотропией акустических свойств

Задачи исследования:

1. Определить особенности формирования структуры жаропрочного никелевого сплава, полученного по технологии селективного лазерного плавления.
2. Установить зависимости между структурными особенностями и акустическими свойствами материала.
3. Разработать модель, позволяющую по характеристикам анизотропной структуры материала корректировать параметры акустического контроля.
4. Провести верификацию предложенной модели на образцах с искусственными дефектами.
5. Разработать методику ультразвукового контроля лопаток, произведенных методом селективного лазерного плавления из жаропрочного никелевого сплава.

Методы исследования: результаты проделанной работы были получены за счет теоретических исследований, численного и аналитического моделирования и экспериментальных исследований. Эксперименты были проведены с использованием дефектоскопа Omniscan MX. Экспериментальные образцы, произведенные методом СЛП, были получены на оборудовании Concept Laser M2. Компьютерная томография образцов была проведена на оборудовании GE Phoenix v|tome|x C450. Разработка образцов для экспериментальных исследований, численное и аналитическое моделирование, статистическая обработка данных и разработка регрессионных моделей были проведены с использованием стандартных программ, таких как KOMPAS 3D, Microsoft Excel, Mathcad 15, Python 3.0, CIVA.

Ценность выполненных исследований: разработана и обоснована методика, которая позволяет учесть особенности отражения акустического поля от дефектов в анизотропных средах, характерных жаропрочным материалам, используемых для производства турбинных лопаток по технологии селективного лазерного плавления.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый параметр (A_g), позволяющий количественно оценить степень неравномерности чувствительности при ультразвуковом контроле эхо-импульсным методом анизотропных материалов, полученных по аддитивной технологии. Параметр анизотропии (A_g) определяется как разность между отношениями скоростей поперечных волн взаимно-перпендикулярной поляризации, измеренных в направлениях под углом 45 градусов и по нормали к направлению выращивания соответственно.

2. Установлено критическое значение параметра A_g , при котором максимальное отклонение амплитуды эхо сигнала при изменении ракурса

озвучивания не превышает 2 дБ. На примере плоскодонного отражателя диаметром 2 мм, расположенного на глубине 60 мм показано, что критическое значение параметра A_g составляет 6,5%. В случае если параметр анизотропии $A_g \geq 6,5\%$, необходимо проводить корректировку значения амплитуды принятого эхо-сигнала от дефекта.

Практическая значимость работы:

Разработаны Технологические рекомендации (ТР 1.001-2022) и промышленный регламент (ПР-АУЗК-2022) для автоматизированного неразрушающего контроля качества, которые позволяют обеспечить проведение ультразвукового неразрушающего контроля перспективных изделий, в том числе из жаропрочного никелевого сплава, изготовленных методом селективного лазерного плавления. Технологические рекомендации и промышленный регламент внедрены в Центр НТИ «Новые материалы и вещества». Разработана модель, основанная на машинном обучении, позволяющая осуществлять корректировку амплитуды при сканировании анизотропного материала в зависимости от ракурса озвучивания по отношению к направлению выращивания материала. Данная модель использована в программном обеспечении сканера-дефектоскопа роботизированного комплекса для выполнения ультразвукового контроля изделий аддитивного производства.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием поверенного экспериментального оборудования, соответствием результатов экспериментов с результатами численного и аналитического моделирования, а также использованием методов статистической обработки данных.

На защиту выносятся:

1. Установленная зависимость между анизотропией скорости УЗ-волн и изменением амплитуды эхо-сигнала при изменении ракурса озвучивания относительно направления выращивания на примере аддитивных материалов, используемых для производства турбинных лопаток СЛП.

2. Критерий классификации анизотропных аддитивных материалов СЛП по степени влияния анизотропии акустических свойств на результаты контроля.

3. Регрессионная модель, которая позволяет при ультразвуковом контроле анизотропных материалов турбинных лопаток СЛП определять величину корректировки амплитуды найденных отражателей ΔA в зависимости от следующих параметров: угол между направлением прозвучивания и направлением выращивания, глубина залегания отражателя, параметры анизотропии A_3 и A_{13} .

Апробация работы:

Основные результаты проведенной работы были доложены на XVI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2023 г.), XXIII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2023 г.), XV Международной научно-технической конференции «НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ» (г. Москва, 2023 г.), научных семинарах кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2021, 2022 г, 2023г.).

Личный вклад соискателя заключается в выполнении исследовательской работы по теме диссертации на всех этапах. Автором был выполнен литературный обзор по теме исследования, моделирование и экспериментальные исследования, статистическая обработка результатов, разработана технология ультразвукового контроля, а также подготовлены и сделаны доклады на конференциях и семинарах. Все результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии, весь заимствованный материал отмечен в диссертационной работе ссылками.

Публикации по теме диссертации: опубликовано 3 научных работы, входящих в базу данных Scopus, из них 2 входящие в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа изложена на 115 страницах машинописного текста, иллюстрируется 49 рисунками, содержит 11 таблиц, состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 108 наименований.

Содержание работы

Во введении показана актуальность работы и сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

В первой главе рассмотрены общие сведения о структурных особенностях изделий СЛП, проведен анализ дефектов, характерных для изделий данной технологии производства, а также обзор и анализ возможностей применения различных методов неразрушающего контроля. Приведены основные сведения об анизотропии свойств изделий СЛП. Изложены основные особенности ультразвукового контроля (УЗК) анизотропных материалов и проведен анализ способов обеспечения равномерной чувствительности контроля в анизотропных материалах турбинных лопаток СЛП.

Анализ известных технологий неразрушающего контроля показал, что наиболее перспективными методами для контроля изделий СЛП из жаропрочного никелевого сплава являются ультразвуковые методы и рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Однако, исследователи отмечают, что при контроле методом РКТ изделий из жаропрочных никелевых сплавов получается низкий контраст изображения из-за того, что материал обладает высокой плотностью. Данный эффект может привести к пропуску дефектов при контроле участков изделия с толщиной более 10 мм. Ультразвуковой контроль обладает значительно большей производительностью в сравнении с РКТ, а также позволяет обеспечить необходимую чувствительность при контроле материалов с высокой плотностью.

Анализ открытых литературных источников по исследованиям микроструктуры СЛП образцов показал, что при послойном отверждении материала, зеренная структура имеет преимущественную направленность вдоль направления выращивания. Материалы, получаемые методом СЛП, во многих случаях являются преимущественно неоднородными на микроуровне, на расстояниях порядка нескольких микрометров, но, поскольку эти размеры пренебрежимо малы по сравнению с длиной волны ультразвука при контроле эхометодом на частотах 5-15 МГц, с точки зрения акустического контроля эти

материалы можно рассматривать как однородные на макроуровне, но анизотропные.

Ультразвуковой контроль анизотропных материалов имеет существенные особенности. Для анизотропных сред направление поляризации трех волновых мод ориентировано не перпендикулярно и не параллельно вектору распространения волны. Вектор смещения частиц в продольной волне в анизотропных средах имеет составляющие, не только параллельные направлению распространения волны, но и перпендикулярные к нему. Волна, характеризуемая таким поведением, носит название квази-продольной волны (QL). Аналогичное поведение наблюдается и для сдвиговых волн в анизотропных средах, в связи с чем их называют квази-поперечными вертикальными (QSV) и квази-поперечными горизонтальными волнами (QSH). В связи с наличием вышеуказанных эффектов в анизотропных материалах наблюдается различие скоростей распространения упругих волн в зависимости от направления ввода волны. При распространении волны под углом к оси симметрии свойств материала могут возникать такие эффекты как отклонение УЗ-пучка от направления волновой нормали, изменение фокусировки, а также изменение распределения акустического давления вдоль главной акустической оси. Описанные выше эффекты приводят к тому, что чувствительность при контроле оказывается различной в зависимости от направления распространения волн. Данная проблема опасна тем, что может привести к неправильной интерпретации результатов контроля.

Исследователи отмечают, что характер послойного процесса выращивания изделия обуславливает наличие 3-х взаимно перпендикулярных осей симметрии свойств, две из которых совпадают с направлением сканирования лазерным источником при плавлении порошка, а третья направлена вдоль направления выращивания. На практике зачастую применяются стратегии сканирования с чередующимися участками с различным направлением сканирования. Чередование участков с разным направлением сканирования лазерного источника в каждом слое обеспечивает более равномерное распределение свойств в сечении, перпендикулярном направлению выращивания. В случае, если различием свойств в плоскости, перпендикулярной направлению выращивания можно пренебречь, то все оси, лежащие в данной плоскости, будут эквивалентны друг другу, а плоскость, проходящая через эти оси, будет являться плоскостью изотропии. Наличие плоскости изотропии характерно для трансверсально-изотропных (ТИ) материалов.

Исследования по определению упругих свойств материалов в зависимости от параметров технологии показывают, что свойства одних и тех же аддитивных материалов, изготовленных с использованием различных параметров технологии СЛП, могут сильно различаться. Данный эффект обуславливает необходимость в разработке критерия, который позволит классифицировать материалы в зависимости от степени анизотропии акустических свойств перед контролем конкретного изделия, изготовленного на определенных режимах технологии СЛП. У разных производителей параметры и режимы печати одних и тех же изделий могут различаться, что является дополнительной проблемой для создания

комплексной методики контроля лопаток СЛП из жаропрочного никелевого сплава.

Во второй главе проведены исследования по определению акустической и упругой анизотропии специальных аддитивных образцов, изготовленных методом СЛП и прямым лазерным выращиванием (ПЛВ). На специальных образцах из материала ЭП648, полученных методом СЛП, проведены экспериментальные исследования по определения связи между анизотропией скорости УЗ-волн и амплитудой отраженного сигнала от искусственного отражателя при прозвучивании с разных ракурсов. Для материалов с различной степенью анизотропии получены зависимости амплитуды отраженного эхо-сигнала плоскодонного отражателя от положения кристаллографических осей по отношению к направлению прозвучивания.

При помощи контактного ультразвукового способа были определены коэффициенты матрицы упругости C_{ij} на 6-ти специально изготовленных образцах. Образцы были произведены из материалов, которые применяются для ответственных изделий, работающих в условиях повышенной температуры, в том числе для турбинных лопаток. Один из образцов после изготовления был подвергнут горячему изостатическому прессованию (ГИП), чтобы оценить влияние ГИП на анизотропию упругих свойств. Значения полученных коэффициентов для шести образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1
Коэффициенты матрицы упругости для материалов исследовательских образцов

Коэффициенты жесткости	ЭП648 СЛП	ЭП648 СЛП+ГИП	Inconel718 ПЛВ	Inconel718 СЛП	ВЖ159 СЛП	08Х18Н10Т ПЛВ
C_{11}	269	281	269	257	246	253
C_{22}	269	271	269	255	246	261
C_{33}	259	283	259	239	251	259
C_{44}	75	79	87	76	98	71
C_{55}	75	66	87	75	97	79
C_{66}	56	79	72	70	96	81
C_{23}	121	125	125	115	152	97
C_{13}	127	119	125	108	154	113
C_{12}	110	121	124	113	151	110

Полученные коэффициенты были использованы для моделирования упругих свойств анизотропных материалов аддитивного производства в программном комплексе CIVA. Аналитический модуль Ultrasonic Simulation Tool (UST) в CIVA позволяет рассчитывать акустическое поле в анизотропном материале с заданными упругими характеристиками. UST использует теорию лучевых трубок, описывающую формирование акустического поля в скалярном приближении. Для расчета взаимодействия акустического поля с дефектами используются: метод аппроксимации Кирхгофа, метод разделения переменных, геометрическая теория дифракции. В CIVA был проведен расчет изменения амплитуды отраженной

продольной волны от плоскодонного отражателя диаметром 2 мм, расположенного на глубине 30 мм, при повороте оси симметрии свойств 1, совпадающей с направлением выращивания. Схема модели представлена на Рисунке 1.

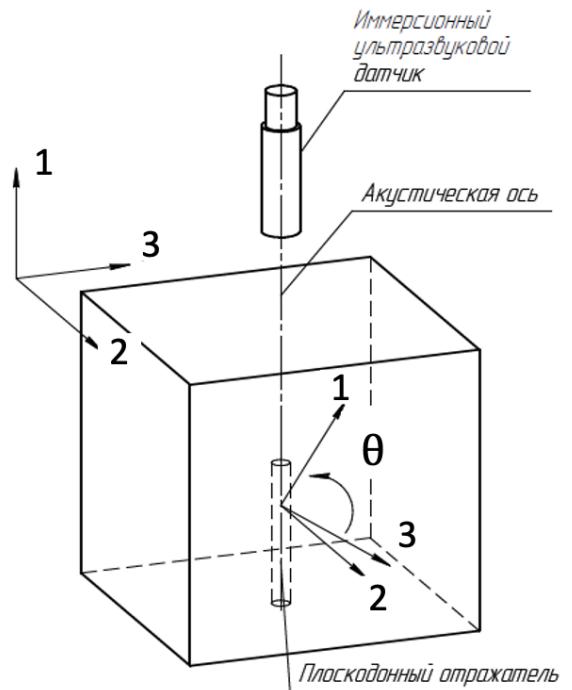


Рисунок 1. Схема модели для расчета в CIVA Ultrasonic Simulation Tool. Частота датчика 5 МГц, диаметр пьезоэлемента 12,7 мм. θ - угол между осью симметрии свойств 1, совпадающей с направлением выращивания, и направлением прозвучивания при нормальном падении УЗ-волны на поверхность

В результате моделирования был получен график изменения амплитуды ΔA в зависимости от угла θ между осью симметрии упругих свойств и направлением прозвучивания. График представлен на Рисунке 2. Изменение амплитуды представляет собой величину

$$\Delta A(\theta) = A(\theta) - A(0^\circ) \quad (1)$$

где $A(\theta)$ – значение амплитуды сигнала, отраженного от плоскодонного отражателя, нормированное относительно амплитуды сигнала, отраженного от передней стенки образца. Точка 0° соответствует расположению направления прозвучивания параллельно оси симметрии свойств 1 (Рисунок 1).

Анализ полученных зависимостей показывает, что у четырех из шести исследованных материалов, а именно ЭП648 СЛП, ВЖ159 СЛП, Inconel 718 СЛП и 08Х18Н10Т, изменение амплитуды отраженного сигнала при изменении угла θ превышает предел допустимой погрешности 2дБ, причем наибольшее изменение амплитуды, равное 9,5 дБ было получено у материала ВЖ159 СЛП. Характер кривых показывает, что изменение амплитуды достигает своего максимума либо при прозвучивании под углом, примерно равным 45° к направлению выращивания (ВЖ159 СЛП, Inconel 718 СЛП, Inconel 718 ПЛВ, 08Х18Н10Т ПЛВ), либо под углом примерно 90° к направлению выращивания (ЭП648 СЛП и ЭП648 СЛП+ГИП).

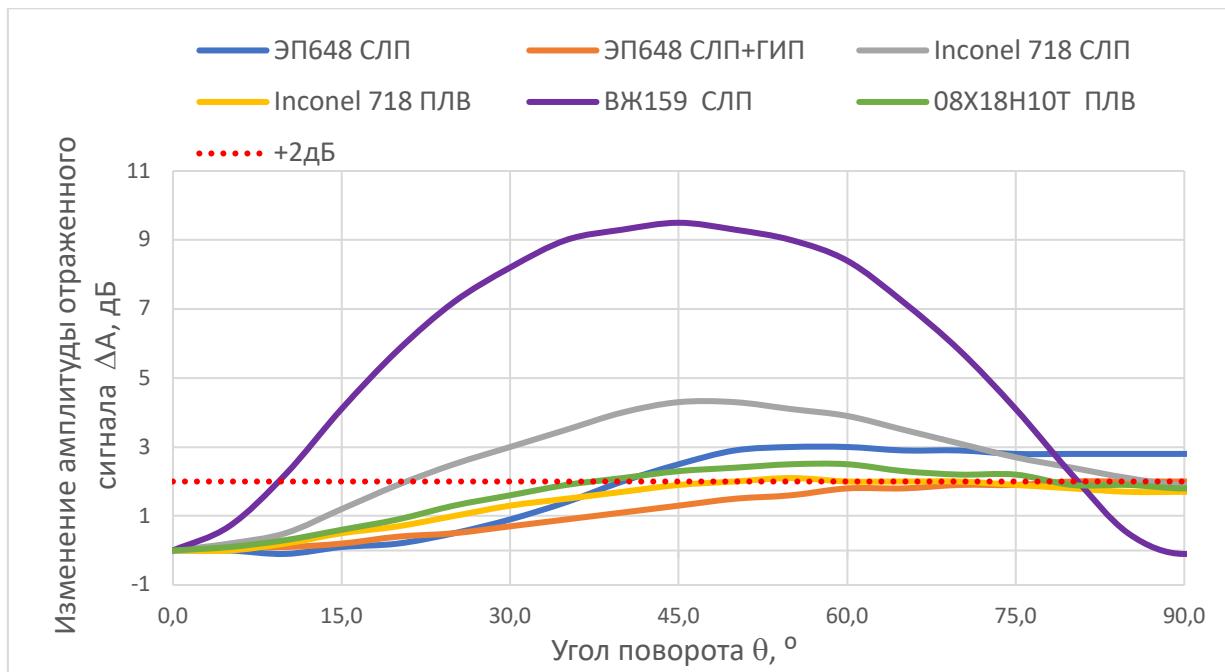


Рисунок 1. Результаты моделирования изменения амплитуды сигнала, отраженного от плоскодонного отражателя диаметром 2 мм, расположенного на глубине 30 мм, в зависимости от угла между направлением прозвучивания и направлением выращивания для шести исследованных образцов

Для того, чтобы экспериментально оценить изменение амплитуды отраженного сигнала для различных направлений прозвучивания были изготовлены специальные образцы из жаропрочного никелевого сплава ЭП648 СЛП. Два образца были выполнены в форме цилиндров диаметром 40 мм и высотой 18 мм. По центру образцов были изготовлены механическим путем боковые цилиндрические отражатели (БЦО) диаметром 2 мм. Общий вид образцов приведен на Рисунке 3.

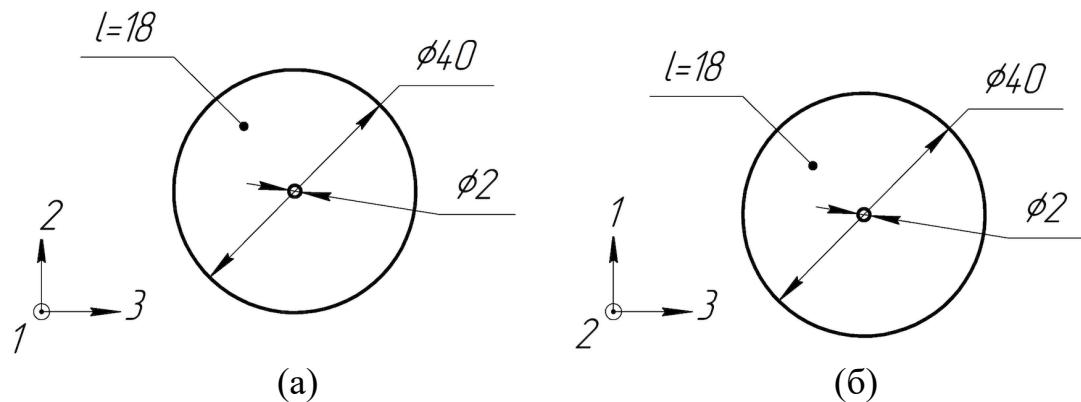


Рисунок 2. Эскиз исследовательских образцов, а) - Образец №1; б) - Образец №2
1 – направление выращивания образца.

Эксперименты с образцами проводились иммерсионным способом с использованием ПЭП, возбуждающего продольные волны с параметрами, аналогичными тем, что использовались для моделирования в CIVA. Схема эксперимента показана на Рисунке 4.

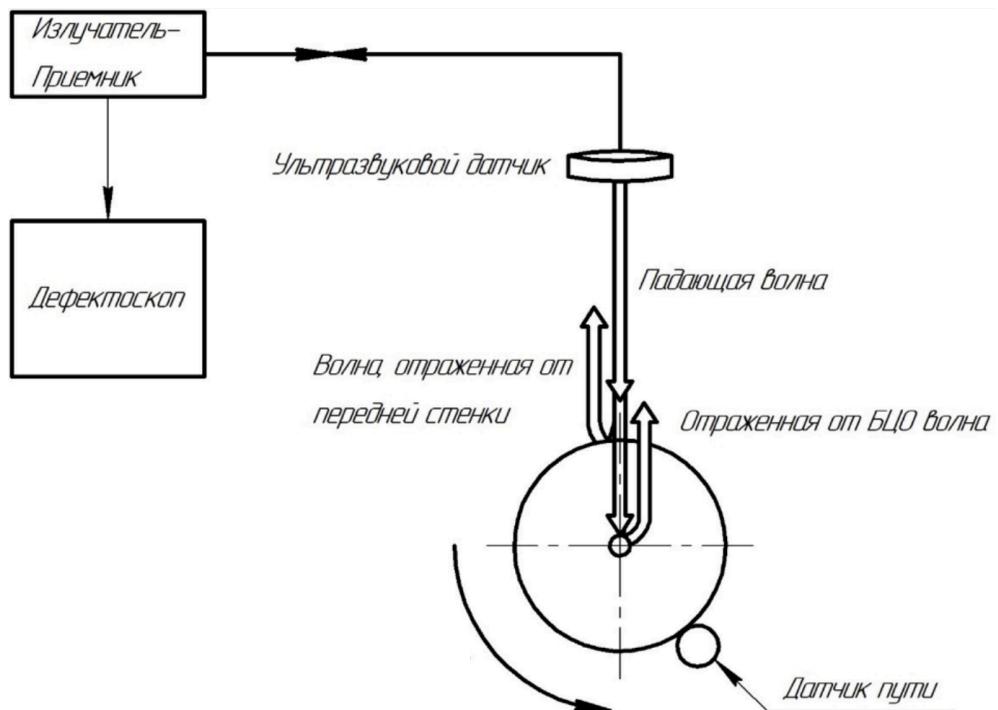


Рисунок 3. Схема эксперимента по измерению амплитуды отраженного от БЦО сигнала при изменении направления прозвучивания

Результаты экспериментов на образцах получены в виде В-сканов, из которых были получены графические зависимости путем измерения амплитуды принятого сигнала от БЦО в зависимости от угла поворота образца. Всего было получено по 180 точек для каждого из образцов. Результаты экспериментального исследования приведены на Рисунке 5.

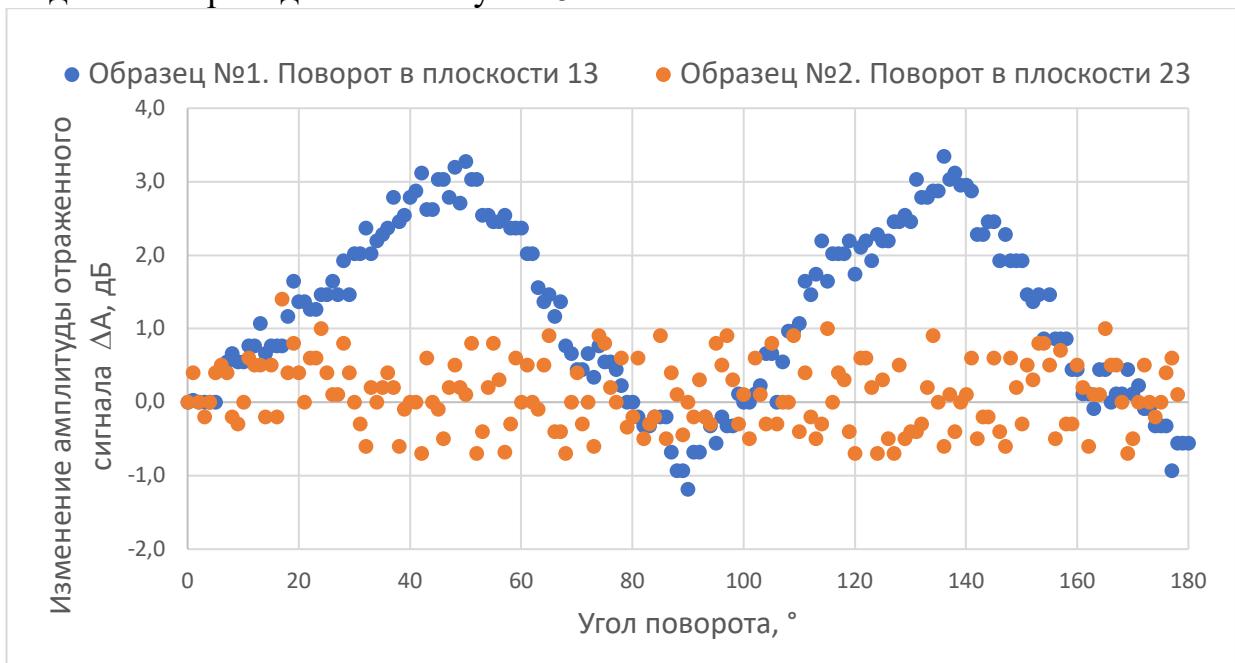


Рисунок 4. Результаты эксперимента по измерению амплитуды отраженного от БЦО сигнала в зависимости от угла поворота образца

Анализ полученных зависимостей показал, что в образце №2 (Рисунок 3, б), в котором прозвучивание проводилось в плоскости 23, перпендикулярной

направлению выращивания, явной тенденции изменения амплитуды не обнаружено. Когда прозвучивание проводилось на образце №1 (Рисунок 3, а) в плоскости 13, проходящей через направление выращивания, возникает аналогичная тенденция изменения амплитуды, что и при моделировании в CIVA. Для того, чтобы количественно сравнить результаты моделирования в CIVA с экспериментом был проведен расчет изменения амплитуды для цилиндрического отражателя по схеме, аналогичной той, что была использована в эксперименте. Средняя квадратичная ошибка (СКО) и средняя абсолютная ошибка (САО) между данными эксперимента и моделирования составили 0,4 и 0,3 дБ соответственно, что говорит о приемлемой точности расчетов акустического поля в CIVA для анизотропных материалов с известными упругими свойствами.

Чтобы визуально оценить анизотропию скорости ультразвука в жаропрочном никелевом сплаве, с использованием коэффициентов C_{ij} из Таблицы 1 были построены кривые фазовых медленностей (Рисунок 6). Фазовая медленность представляет собой величину обратную фазовой скорости ультразвука. В случае, если материал является изотропным, кривые медленностей представляют собой концентрические окружности. По степени отклонения формы кривых от окружностей можно судить о выраженности анизотропии фазовой скорости в рассматриваемом сечении.

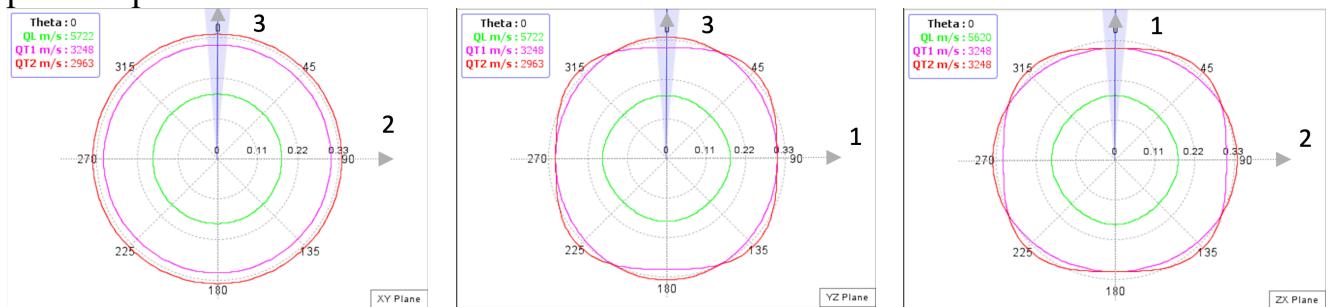


Рисунок 5. Сечения поверхностей медленностей для жаропрочного никелевого сплава ЭП648, через плоскости 23, 13 и 12, где ось 1 совпадает с направлением выращивания

Форма кривых, полученных для сечения 23 (плоскость, перпендикулярная направлению выращивания), соответствует окружностям, что говорит о том, что в плоскости 23 величина скорости не зависит от направления. Данная форма кривых характерна для ТИ-материалов.

Если провести сравнение между формой сечений поверхностей медленностей, построенных в плоскости 13 (Рисунок 6, плоскость, проходящая через направление выращивания) и изменением амплитуды отраженного сигнала при повороте осей симметрии свойств в той же плоскости (Рисунок 5, образец №1), то можно заметить связь между формой кривых и характером изменения амплитуды сигнала, отраженного от искусственного отражателя. Различие между скоростями поперечных волн QSV и QSH (красная и розовая кривые на Рисунке 6 в плоскости 13) плавно изменяется, достигая локального максимума около положения в направлении под углом 45° к оси 1, затем соотношение изменяется в противоположную сторону. То есть, если под углом 45° к оси 1 более быстрой была волна QSH, то в направлении по нормали к оси 1 волна QSV становится быстрее

QSH. Похожим образом изменяется и амплитуда на Рисунке 5, сначала достигая своего локального максимума около 45° , а затем плавно снижаясь до момента, пока угол поворота не станет равным 90° . Сравнение формы кривых медленностей для материалов ЭП648 СЛП, ЭП648 СЛП+ГИП, 08Х18Н10Т ПЛВ, ВЖ159 СЛП и Inconel 718 ПЛВ с полученными результатами моделирования изменения амплитуды сигнала, отраженного от плоскодонного отражателя (Рисунок 2), показало схожую тенденцию. Таким образом отклонение амплитуды при изменении направления прозвучивания достигает локальных максимальных значений, когда увеличивается соотношение между скоростями поперечных волн горизонтальной и вертикальной поляризаций. Поскольку наибольшие отклонения амплитуды были зафиксированы в положениях, когда угол между направлением распространения волны и направлением выращивания составляет примерно 45° и 90° (Рисунок 2), различия между скоростями поперечных волн горизонтальной и вертикальной поляризаций в этих направлениях могут быть использованы для определения количественных параметров акустической анизотропии материалов АП.

В третьей главе приведено описание предлагаемого метода оценки анизотропии, а также проводится сравнение предлагаемого метода с существующими. Показано, что в исследованных материалах предложенный метод обладает наибольшей эффективностью для задачи установления связи между анизотропией свойств и изменением амплитуды отраженного сигнала при повороте ракурса озвучивания. На основе оценки влияния различной степени анизотропии аддитивных материалов на результаты ультразвукового контроля получен критерий, позволяющий классифицировать материалы СЛП на слабо и сильно анизотропные.

Анизотропию материалов СЛП предлагается оценивать как разность между процентными соотношениями скоростей поперечных волн взаимно-перпендикулярной поляризации, измеренных в направлениях под углом 45° и по нормали к направлению выращивания соответственно. Схема определения коэффициентов анизотропии представлена на Рисунке 7. Таким образом, для оценки анизотропии свойств материалов СЛП предлагаются следующие коэффициенты:

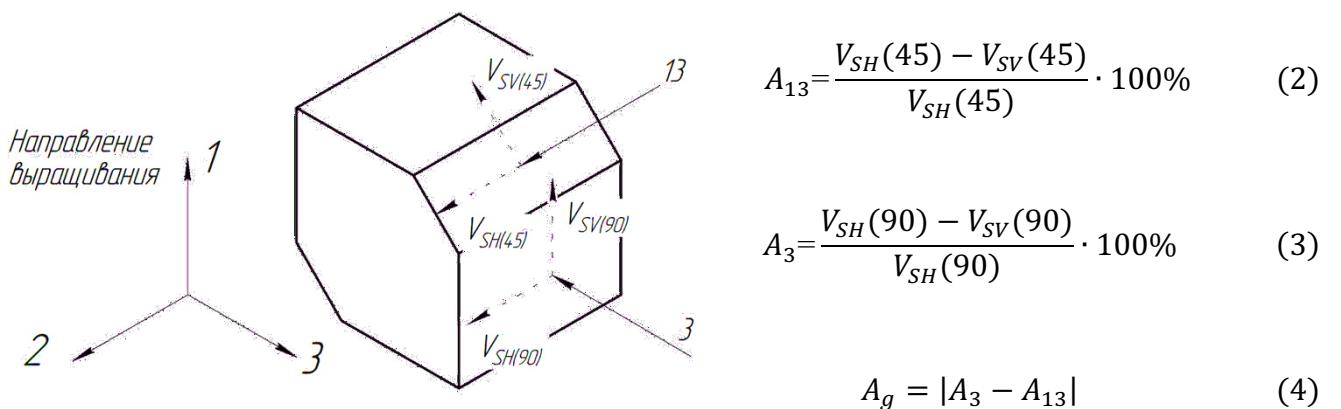


Рисунок 6. Схема определения скоростей для расчета коэффициентов анизотропии

где $V_{SH}(45), V_{SV}(45), V_{SH}(90), V_{SV}(90)$ – скорости поперечных волн горизонтальной и вертикальной поляризаций, измеренные в направлениях под углами 45° и 90° к направлению выращивания соответственно.

Коэффициенты A_{13} и A_3 отвечают за величину отношения между скоростями поперечных волн горизонтальной и вертикальной поляризации в направлениях под углами 45° и 90° к оси 1 соответственно (Рисунок 7). Коэффициент A_g позволяет количественно оценить изменение отношения между скоростями поперечных волн при изменении направления распространения волны от 45° до 90° к оси 1 (Рисунок 7).

Проверка эффективности предложенного метода оценки анизотропии была проведена путем расчета выборочного коэффициента корреляции между различными коэффициентами анизотропии (предложенным и известными из других работ) и максимальным отклонением амплитуды отраженного сигнала ΔA_{max} , полученным в результате моделирования в CIVA для аддитивных материалов с различной степенью анизотропии. Значения коэффициентов анизотропии были рассчитаны по экспериментально определенным коэффициентам матрицы упругости C_{ij} аддитивных образцов, описанных в главе 2. Также для увеличения набора данных были добавлены экспериментально определенные коэффициенты C_{ij} других аддитивных образцов, взятые из открытых источников. Расчет максимального изменения амплитуды ΔA_{max} в CIVA был проведен по схеме, аналогичной представленной на Рисунке 1.

Коэффициенты корреляции между коэффициентами анизотропии, определенными по различным методикам, и максимальным отклонением амплитуды сигнала ΔA_{max} приведены в Таблице 2.

Таблица 2
Таблица коэффициентов корреляции

	ε	δ	γ	G	B_S	A_g
ΔA_{max}	0,31	0,74	-0,50	0,58	0,31	0,97

где $\varepsilon, \delta, \gamma, B_S$ – коэффициенты, используемые для оценки степени анизотропии горных пород; G – коэффициент для оценки анизотропии кристаллов.

Анализ коэффициентов корреляции из Таблицы 2 показал, что наиболее сильная связь среди рассмотренных коэффициентов анизотропии с максимальным отклонением амплитуды наблюдается между A_g и ΔA_{max} . Этот факт подтверждает эффективность предложенного в данной работе параметра A_g для оценки акустической анизотропии материалов АП.

Для разработки критерия, позволяющего на основе предложенных параметров анизотропии классифицировать материалы СЛП на слабо и сильно анизотропные, к экспериментально определенным параметрам анизотропии были также добавлены значения, полученные путем моделирования с использованием численных методов. Увеличение количества данных необходимо для того, чтобы получить более равномерное распределение между значениями коэффициентов анизотропии A_g и максимальными отклонениями ΔA_{max} . Линейная регрессия была использована для установления связи между ΔA_{max} и A_g .

В MS Excel было получено уравнение регрессии:

$$\Delta A_{max} = 0,24 \cdot A_g + 0,48 \quad (5)$$

Коэффициент детерминации R^2 равен 0,74. Используя полученное уравнение регрессии, можно провести расчет порогового значения параметра анизотропии A_g , при котором максимальное отклонение амплитуды эхо сигнала не превышает 2 дБ. Используя формулу 5 получаем, что при значениях параметра анизотропии $A_g < 6,5\%$ значение максимального отклонения амплитуды эхо-сигнала ΔA_{max} при изменении ракурса озвучивания не превышает допустимый уровень погрешности. В случае если параметр анизотропии $A_g \geq 6,5\%$, то изменение амплитуды может превышать 2 дБ при прозвучивании изделия под углом к направлению выращивания. Чтобы обеспечить в данных материалах равномерную чувствительность контроля, необходимо проводить корректировку значения амплитуды принятого эхо-сигнала от дефекта.

В четвертой главе рассмотрена задача коррекции изменения амплитуды отраженного эхо-сигнала при прозвучивании анизотропных изделий СЛП в различных направлениях по отношению к направлению выращивания в приближении, что аддитивный материал является трансверсально-изотропным, а направление выращивания совпадает с осью симметрии свойств. Такой подход позволяет детально учесть анизотропию контролируемого материала и обеспечить равномерную чувствительность контроля при прозвучивании в различных направлениях по отношению к направлению выращивания.

По результатам анализа факторов, влияющих на изменение амплитуды ΔA отраженного от дефекта сигнала при УЗК анизотропных изделий СЛП определены следующие параметры, влияющие на значение зависимой переменной:

- θ – Угол между направлением прозвучивания и осью симметрии акустический свойств, совпадающей с направлением выращивания изделия;
- A_{13} – Параметр акустической анизотропии в направлении 45° к направлению выращивания;
- A_3 – Параметр акустической анизотропии в направлении 90° к направлению выращивания;
- h – Глубина, на которой расположен отражатель;

Поскольку для решения задачи о корректировке амплитуды требуется знать величину отклонения ΔA в зависимости от рассмотренных выше 4-х параметров, необходимо разработать регрессионную модель, которая способна определить характер связи между пятью переменными. Регрессионная модель была получена в результате использования алгоритмов машинного обучения. Весь набор данных, используемый для обучения модели, был собран путем моделирования в CIVA UST. Расчет амплитуды отраженного сигнала был произведен для различных комбинаций значений варьируемых параметров для частоты ультразвуковых колебаний 10 МГц и диаметра пьезопластины 12,7 мм. Общая схема решения регрессионной задачи представлена на Рисунке 9.

В результате моделирования был получен набор данных, содержащий 2401 значений ΔA в зависимости от входных параметров модели. Полученная выборка данных была разделена на обучающую и тестовую в соотношении 80/20.

Обучающий набор данных был использован для проверки производительности различных алгоритмов машинного обучения. Наилучшие показатели метрик качества были получены для модели градиентного бустинга, значения ошибок работы модели САО и СКО составили менее 0,3 дБ, что является показателем высокой точности работы модели. Подбор гиперпараметров модели градиентного бустинга был проведен методом случайного поиска (Random search).

Верификация модели была выполнена с использованием тестового набора данных, состоящего из данных, полученных посредством моделирования, но не использованных в процессе обучения, и экспериментальных данных, полученных на анизотропных цилиндрических образцах ЭП648 СЛП. Значения метрик СКО и САО при оценке точности на данных выборках составили менее 1 дБ. Полученные результаты свидетельствуют о приемлемой точности работы модели для решения задачи корректировки амплитуды эхо-сигнала найденных отражателей в аддитивных материалах, используемых для лопаток СЛП.

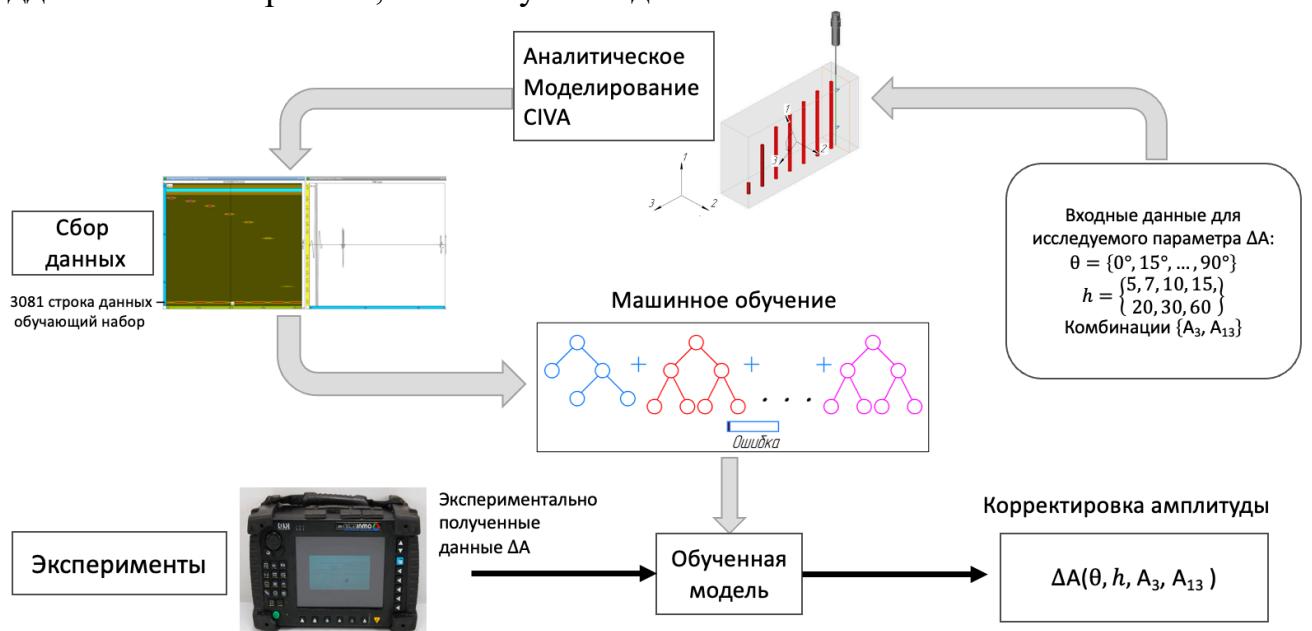


Рисунок 7. Общая схема решения задачи определения корректировки амплитуды отраженного сигнала от дефекта ΔA в зависимости от угла θ , глубины залегания отражателя h и коэффициентов анизотропии A_{13}, A_3

В пятой главе на основе выполненных исследований приведена разработанная методика контроля лопаток СЛП из жаропрочного никелевого сплава, в том числе разработан алгоритм действий по обеспечению равномерной чувствительности контроля при прозвучивании изделия во всем диапазоне углов между направлением прозвучивания и направлением выращивания. Разработанная регрессионная модель была использована при разработке программного обеспечения сканера-дефектоскопа роботизированного комплекса для выполнения ультразвукового контроля изделий аддитивного производства. Результаты исследований использовались при разработке Технологических рекомендаций (ТР 1.001-2022) и промышленного регламента (ПР-АУЗК-2022) для автоматизированного неразрушающего контроля качества, которые позволяют обеспечить проведение ультразвукового неразрушающего контроля

перспективных изделий, в том числе из жаропрочного никелевого сплава, изготовленных методом селективного лазерного плавления. Технологические рекомендации и промышленный регламент внедрены в Центр НТИ «Новые материалы и вещества».

Основные выводы и результаты

1. Установлено, что неравномерность чувствительности при контроле изделий аддитивного производства связана с анизотропией скорости ультразвука.

2. Разработаны новые параметры для характеристики анизотропии аддитивного материала A_3 , A_{13} , A_g , устанавливающие связь между различием скорости поперечной волны и отклонением амплитуды отраженного сигнала, при прозвучивании одного и того же отражателя в различных направлениях по отношению к направлению выращивания.

3. Доказана эффективность предложенных параметров в сравнении с существующими параметрами анизотропии применительно к задаче установления связи между степенью анизотропии материала и неравномерностью чувствительности.

4. Разработан критерий для классификации материалов аддитивного производства, используемых для производства лопаток, на слабо и сильно анизотропные в зависимости от степени влияния анизотропии акустических свойств на результаты контроля. На примере плоскодонного отражателя диаметром 2 мм, расположенного на глубине 60 мм показано, что критическое значение параметра A_g составляет 6,5%. В случае если параметр анизотропии $A_g \geq 6,5\%$, необходимо проводить корректировку значения амплитуды принятого эхосигнала от дефекта.

5. Разработана регрессионная модель, позволяющая определить значение корректировки амплитуды ΔA эхо-сигналов найденных отражателей в зависимости от угла между направлением прозвучивания и направлением выращивания, диаметра пьезоэлемента, частоты ультразвука, глубины залегания отражателя, параметров анизотропии A_3 , A_{13} . Данная модель может быть использована при контроле турбинных лопаток с толщиной сечения до 60 мм при настройке на плоскодонном отражателе диаметром 2 мм.

6. Проведена верификация регрессионной модели на статистически репрезентативном наборе данных, включающем в себя как экспериментальные данные, так и данные моделирования, не использованные в процессе обучения. Верификация показала, что значение среднеквадратической ошибки работы модели составило менее 1 дБ.

7. Разработана методика проведения ультразвукового контроля турбинных лопаток, произведенных по технологии селективного лазерного сплавления из жаропрочного никелевого сплава.

8. Результаты работы были использованы при разработке Технологических рекомендаций (ТР 1.001-2022) и промышленного регламента (ПР-АУЗК-2022) для автоматизированного неразрушающего контроля качества, которые позволяют обеспечить проведение ультразвукового неразрушающего

контроля перспективных изделий, в том числе из жаропрочного никелевого сплава, изготовленных методом селективного лазерного плавления. Разработанная модель, основанная на машинном обучении, использована в программном обеспечении сканера-дефектоскопа роботизированного комплекса для выполнения ультразвукового контроля изделий аддитивного производства.

9. Полученные в данной работе результаты могут быть использованы для разработки методик контроля более широкого класса изделий из анизотропных материалов, для которых характерно наличие трансверсально изотропной симметрии свойств.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Алешин Н.П., Щипаков Н.А., Дегтярев М.Н. Моделирование процесса распространения ультразвуковых колебаний в анизотропном материале изделий, изготовленных по аддитивным технологиям // Дефектоскопия. 2022. №6. С. 17-25 (0,5 п.л./0,25 п.л.).

2. Об использовании пазов для моделирования трещин при ультразвуковой дефектоскопии / Дегтярев М.Н. [и др] // Дефектоскопия. 2022. № 2. С. 3-12 (0,5 п.л./0,25 п.л.).

3. Исследование возможности обнаружения трещин в полимерном композиционном материале / Дегтярев М.Н. [и др] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2023. №5. С.32-47 (1 п.л./0,5 п.л.).