

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В АНИЗОТРОПНОМ МАТЕРИАЛЕ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

© 2022 г. Н.П. Алешин¹, Н.А. Щипаков^{1,*}, М.Н. Дегтярев¹

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, Бауманская 2-я ул., 5, стр. 1

*E-mail: shchipak@bmstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.2022; после переработки 04.05.2022

Принята к публикации 06.05.2022

Рассмотрены возможные причины возникновения анизотропии акустических свойств в изделиях аддитивного производства. На основе акустических измерений определен тип упругой симметрии материала образца из сплава типа Inconel, изготовленного методом селективного лазерного сплавления (SLM). Анализ проведенных измерений показал, что направление выращивания образцов соответствует оси симметрии акустических свойств. Представлены результаты экспериментальных исследований и аналитического моделирования влияния анизотропии на амплитуду сигнала, отраженного от искусственного отражателя в виде бокового цилиндрического отверстия.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ультразвуковой контроль, анизотропия акустических свойств, эхометод, селективное лазерное сплавление.

DOI: 10.31857/S0130308222060021; EDN: BMSXDI

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время аддитивные технологии находят все большее применение в промышленности. Однако вопрос контроля изделий аддитивного производства (АП) остается открытым ввиду наличия специфических дефектов и микроструктуры, характерной для аддитивно выращенных изделий. Микроструктура изделий АП оказывает непосредственное влияние на физические и механические свойства материала [1—3]. Известно, что материалы АП могут обладать достаточно выраженной анизотропией свойств, что является дополнительной трудностью для создания верифицированной методики контроля [4].

Одним из наиболее перспективных методов для неразрушающего контроля (НК) изделий АП является ультразвуковой контроль (УЗК). Значительное число исследователей изучает особенности применения этого метода для изделий АП [5—7]. Среди проблем применения УЗК авторы отмечают наличие анизотропии акустических свойств изделий, что затрудняет правильную идентификацию дефектов в зависимости от их локализации в изделии АП.

Причина анизотропии акустических свойств изделий аддитивного производства остается до конца неизученной и обуславливается различными факторами, такими как микроструктурные дефекты, остаточные напряжения, границы сплавления слоев, кристаллографические и морфологические текстуры.

Из-за послойного процесса формирования детали зерна при затвердевании приобретают вытянутую столбчатую форму, ориентированную вдоль направления выращивания [8]. При наращивании последующего слоя осуществляется неполный переплав предыдущего, приводящий к изменению направленности зерен, которые были расположены сверху и были направлены горизонтально (см. рис. 1) [9]. Неполный переплав предыдущего слоя является причиной того, что подавляющая часть зерен в детали имеют вытянутую параллельно направлению выращивания форму. Как было отмечено в [10], ориентация изделия по отношению к платформе построения влияет также на пористость формируемого изделия. В деталях, ориентированных горизонтально к направлению выращивания, пористость оказывается значительно выше, чем в деталях, ориентированных вертикально. Описанные выше особенности влияют на механические свойства изделий АП в различных направлениях.

Ориентация зерен в определенном направлении обуславливает структурную анизотропию среды. Известно, что существует связь между симметрией структуры и симметрией свойств, как правило, симметрия физических свойств оказывается на порядок выше, нежели симметрия структуры.

Для того, чтобы лучше понять основной фактор, влияющий на анизотропию акустических свойств, были изготовлены специальные образцы, полученные методом селективного лазерного плавления (SLM).

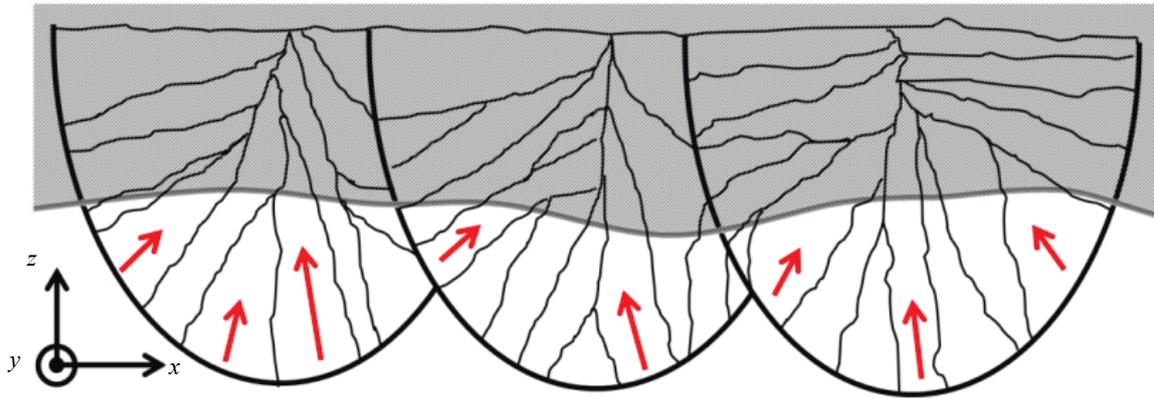


Рис. 1. Схема частичного передела нижележащих слоев из [9]. Стрелки указывают приблизительную ориентацию кристаллографического направления внутри зерен.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Общее уравнение акустической волны в анизотропной среде в матричной форме представлено в виде:

$$\nabla_{iK} C_{ijkl} \nabla_{Lj} v_j = \rho \frac{\partial^2 v_j}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала; v_j — составляющая скорости частиц; ∇_{iK} — оператор дивергенции в матричной форме; ∇_{Lj} — оператор градиента в матричной форме;

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

— матрица коэффициентов жесткости; $i, j = 1, \dots, 3$; $k, l = 1, \dots, 6$.

В случае изотропных твердых тел направление поляризации акустической волны определяется полем смещения частиц. Когда направление поля смещения частиц параллельно вектору распространения волны, то волна называется продольной волной, в случае, когда перпендикулярно вектору распространения волны, то называется сдвиговой волной. В изотропных средах свойства распространения волн, такие как скорость и направление поляризации, не зависят от направления.

Для анизотропных сред направление поляризации трех волновых мод ориентировано не перпендикулярно и не параллельно вектору распространения волны. Движение частиц продольной волны в анизотропных средах происходит не только параллельно направлению распространения волны, но и перпендикулярно ему. Волна, характеризующая таким поведением, носит название квазипродольной волны (qP).

Аналогичное поведение наблюдается и для сдвиговых волн в анизотропных средах, в связи с чем их называют квазипоперечными вертикальными (qSV) и квазипоперечными горизонтальными волнами (qSH).

В связи с наличием вышеуказанных эффектов в анизотропных материалах наблюдается анизотропия скорости распространения акустических колебаний в зависимости от направления ввода волны [11—14].

При распространении ультразвуковой волны в анизотропной среде возникает расхождение луча. Коэффициент, характеризующий степень расхождения луча (BD), определяется отношением углов изменения направления вектора фазовой скорости $\Delta\theta_g$ и вектора групповой скорости $\Delta\theta_p$:

$$BD = \left[\frac{\Delta\theta_g}{\Delta\theta_p} \right]. \quad (3)$$

В изотропной среде данное отношение всегда равно единице, так как энергия полностью сосредоточена вдоль направления волнового вектора.

В результате несовпадения векторов фазовой и групповой скорости в случае анизотропной среды происходит также отклонение ультразвукового луча (β) от прямолинейного распространения, определяемое из соотношения:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{V}_p \cdot \mathbf{V}_g}{|\mathbf{V}_p| \cdot |\mathbf{V}_g|} \right), \quad (4)$$

где \mathbf{V}_p и \mathbf{V}_g — векторы фазовой и групповой скоростей соответственно.

Модуль отношения изменения фазовой скорости к величине изменения групповой скорости определяет коэффициент распространения поля излучателя (BS):

$$BS = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_p}, \quad (5)$$

где ΔV_g и ΔV_p — величины изменения фазовой и групповой скоростей соответственно.

Коэффициент распространения поля излучателя для материалов из изотропной ферритной стали равен нулю из-за того, что величина групповой скорости равна величине фазовой скорости. В случае анизотропных материалов коэффициент распространения поля изменяется ввиду изменения скоростей. Более высокий коэффициент распространения поля приводит к изменению распределения энергии вдоль акустической оси.

При УЗК анизотропных изделий необходимо учитывать влияние вышеуказанных эффектов. Отклонение и расхождение луча, неравномерное распределение скоростей в зависимости от направления ввода колебаний может приводить к различию амплитуды сигналов идентичных отражателей в зависимости от направления ввода колебаний, что в результате приведет к неправильной интерпретации результатов контроля.

На практике вычисление всех 21 элемента матрицы жесткости (2) является трудоемким и требует точного определения главных плоскостей. Если пренебречь различиями свойств по направлениям, перпендикулярным направлению выращивания, то среду можно рассматривать как трансверсально-изотропную. Ось, совпадающая с направлением выращивания материала, в таком случае будет являться осью симметрии бесконечного порядка, а все плоскости, перпендикулярные оси симметрии, будут являться плоскостями изотропии.

Для того, чтобы определить матрицу упругих коэффициентов трансверсально-изотропного материала, достаточно определить всего 5 независимых упругих постоянных: C_{33} , $C_{11} = C_{22}$, C_{66} , $C_{44} = C_{55}$, $C_{13} = C_{23}$, $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$. Данные упругие коэффициенты можно определить экспериментальным путем за счет измерения скорости распространения ультразвуковой волны в различных направлениях [3]. Соотношения, связывающие скорости и коэффициенты жесткости, приведены в виде уравнений:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \rho \cdot V_{1/1}^2; \\
 C_{22} &= \rho \cdot V_{2/2}^2; \\
 C_{33} &= \rho \cdot V_{3/3}^2; \\
 C_{44} &= \rho \cdot V_{2/3}^2; \\
 C_{55} &= \rho \cdot V_{1/3}^2; \\
 C_{66} &= \rho \cdot V_{1/2}^2; \\
 C_{23} &= \sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2) \cdot (C_{33} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2)} - C_{44}; \\
 C_{13} &= \sqrt{(C_{11} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2) \cdot (C_{33} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2)} - C_{55},
 \end{aligned} \tag{5}$$

где V_{ii} — скорость продольной волны в направлении i ; V_{ij} — скорость поперечной волны, распространяющейся в направлении i с поляризацией в направлении j и $V_{ij/ij}$ — скорость квазипродольной или квазипоперечной волны, распространяющейся и поляризованной в плоскости ij .

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описание образцов для исследований

Образцы из Inconel 718 были получены методом SLM. Два образца были выполнены в виде цилиндров диаметром 30 мм и высотой 20 мм. По центру образцов были произведены механическим путем искусственные отражатели в виде бокового цилиндрического отверстия (БЦО) диаметром 3 мм. Эскизы образцов приведены на рис. 2а, б. Образцы были изготовлены с различной ориентацией по отношению к платформе построения.

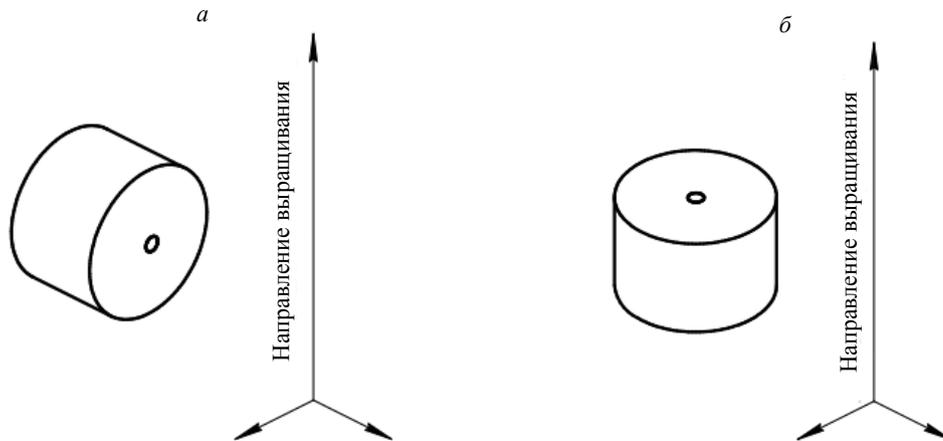


Рис. 2. Эскизы образцов с искусственными дефектами в виде БЦО:

а — образец № 1 (направление выращивания перпендикулярно оси цилиндрического образца); б — образец № 2 (направление выращивания совпадает с осью цилиндрического образца).

Для определения коэффициентов матрицы жесткости был подготовлен специальный образец (рис. 3), изготовленный при тех же режимах, что и вышеуказанные образцы. Габаритные размеры образца составляют $25 \times 25 \times 25$ мм. Геометрия была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить наличие 12 попарно параллельных граней для выполнения измерений скорости ультразвука в 6-ти направлениях. Этот образец аналогичен использованному в работе [3], где тот применялся для определения упругих констант Inconel 625.

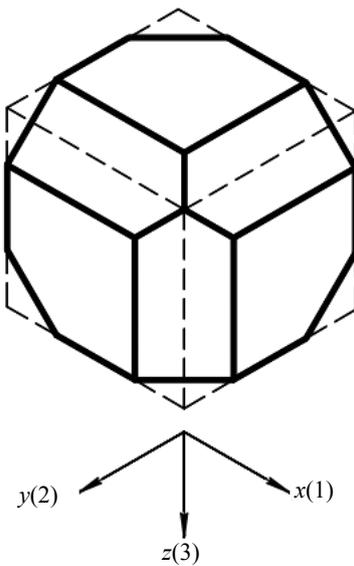


Рис. 3. Образец № 3 для определения упругих постоянных.

Аналитическое моделирование распространения и отражения ультразвуковых колебаний в трансверсально-изотропной среде

Чтобы количественно оценить возможное отклонение амплитуды принятого сигнала от искусственного дефекта, была использована модель распространения акустического поля, основанная на использовании метода аппроксимации Кирхгофа, метода разделения переменных (SOV) и теории геометрической дифракции (GTD model). При помощи вышеуказанных инструментов был имитирован иммерсионный УЗ контроль иммерсионным датчиком с частотой 5 МГц и диаметром пьезоэлемента 12,7 мм. Расстояние между датчиком и передней гранью образца составляет 95 мм. На рис. 4 представлена схема, использованная для моделирования ультразвуковых измерений.

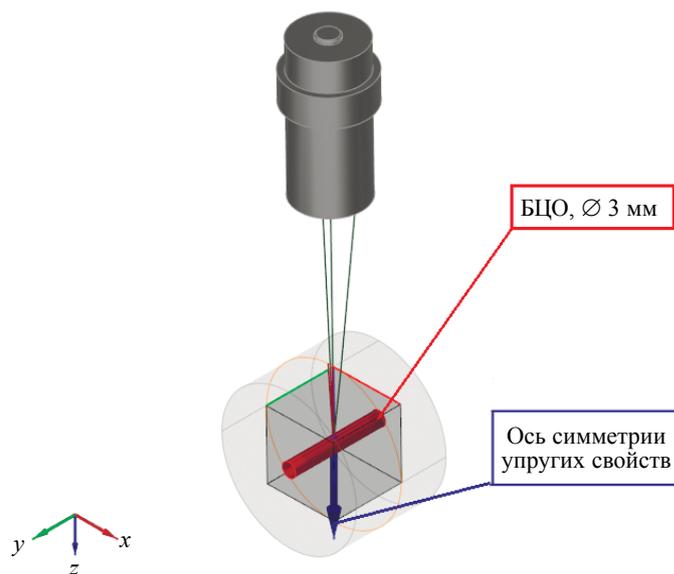


Рис. 4. Модель иммерсионного УЗ контроля цилиндрического образца с отражателем в виде БЦО.

Значения коэффициентов матрицы жесткости для SLM-образца из отечественного жаропрочного никелевого сплава

$C_{11} = C_{22}$, ГПа	C_{33} , ГПа	$C_{44} = C_{55}$, ГПа	C_{66} , ГПа	C_{12} , ГПа	$C_{13} = C_{23}$, ГПа
268,5	259	86,5	72	124,5	125

Упругие свойства SLM-образца Inconel 718 были определены на образце № 3 (образец для определения упругих постоянных). Измерения скоростей для определения упругих свойств были проведены контактным способом при помощи датчиков продольных и поперечных волн с центральной частотой 5 МГц. Значения коэффициентов упругости (см. табл. 1) были использованы для моделирования свойств трансверсально-изотропного материала. Плотность материала составляет 8,2 г/см³.

В результате моделирования были получены графики изменения исследуемых параметров (см. рис. 5). Скорость колебаний и амплитуда сигнала от БЦО меняются симметрично на участках от 0 до 90° и от 90 до 180° (положение 0° соответствует направлению ввода УЗ колебаний вдоль оси упругой симметрии, положение 90° — перпендикулярно оси упругой симметрии трансверсально-изотропного материала). Максимальное изменение скорости составило 4,7 %, что соответствует изменению на 256,3 м/с, а максимальное отклонение амплитуды — 2,7 дБ. В случае, когда направление ввода меняется в плоскости упругой симметрии, скорость и амплитуда сигнала от БЦО остаются неизменными.

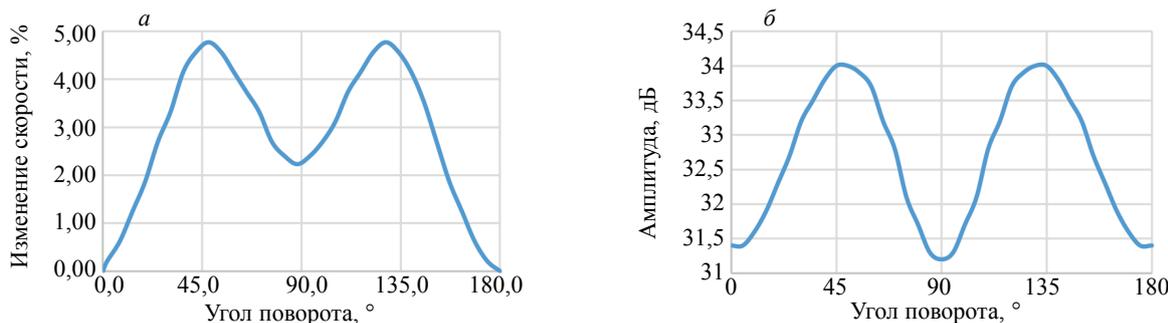


Рис. 5. Результаты моделирования:

а — зависимость изменения скорости от угла поворота относительно направления выращивания; *б* — зависимость амплитуды отраженного сигнала БЦО от угла поворота относительно направления выращивания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования по измерению амплитуды отраженного сигнала проводили иммерсионным способом при помощи иммерсионного нефокусированного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) продольных волн с центральной частотой 5 МГц. Ввод ультразвуковых колебаний осуществляли со стороны цилиндрической грани образца. Расстояние иммерсионного слоя было подобрано так, чтобы искусственный отражатель находился в дальней зоне формируемого акустического поля. Совмещенный датчик был установлен напротив образца так, чтобы акустическая ось была перпендикулярна собственной оси цилиндрического образца. Далее, образец, установленный на специальном поворотном столе, вращался по схеме рис. 6 на 180°. Запись координаты осуществляли за счет применения энкодера «miniwheel», разрешение которого составляет 12 шагов на 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений на образцах № 1 и 2 были получены в виде В-сканов, по которым были построены графические зависимости изменения скорости и амплитуды принятого сигнала от БЦО

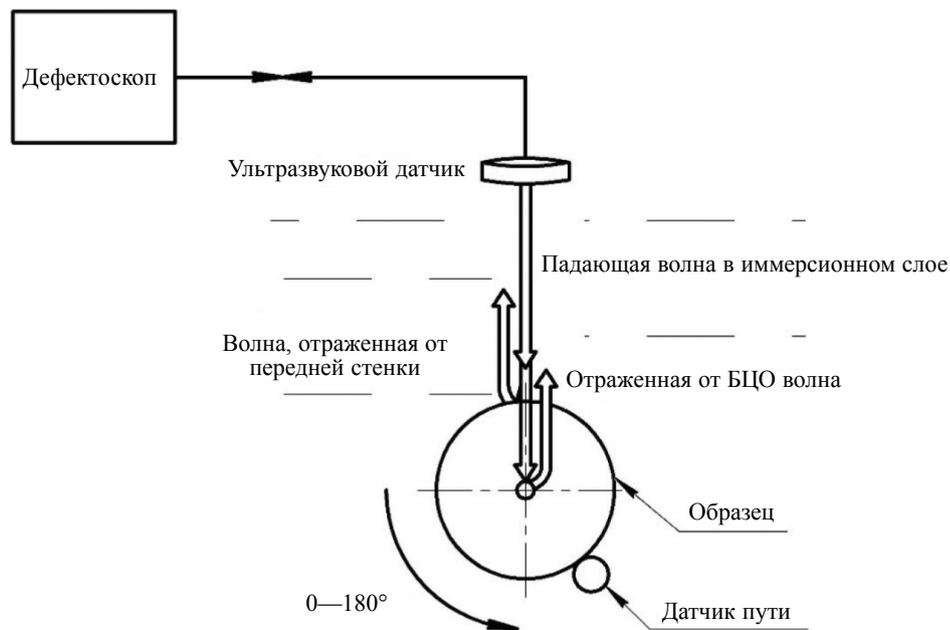


Рис. 6. Схема измерений изменения амплитуды сигнала от БЦО.

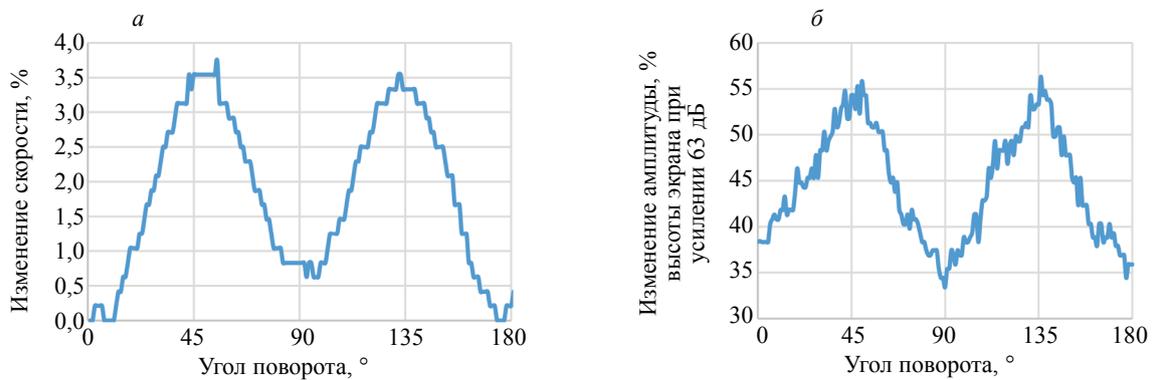


Рис. 7. Результаты экспериментов:

а — зависимость изменения скорости от угла поворота относительно направления выращивания; *б* — зависимость амплитуды отраженного сигнала БЦО от угла поворота относительно направления выращивания.

в зависимости от угла поворота. Анализ изменения измеряемых параметров на образце № 2 не выявил никакой закономерности. Напротив, на образце № 1 изменение скорости и амплитуды сигнала от БЦО показывает наличие определенной тенденции (рис. 7).

Как амплитуда, так и скорость распространения колебаний показывают идентичную тенденцию изменения при повороте образца на интервалах от 0 до 90° и от 90 до 180°. Угол поворота 0° соответствует вводу УЗ волн в образец вдоль направления выращивания, 90° — перпендикулярно направлению выращивания. При изменении направления ввода колебаний по отношению к направлению выращивания от 0 до 55°, а также от 93 до 133°, изменение скорости достигает своего локального максимального значения 3,7 %, что соответствует изменению скорости на 205,9 м/с. Аналогичным образом изменяется и амплитуда сигнала от БЦО. Максимальное отклонение амплитуды составило 22,9 %, что соответствует изменению на 4,5 дБ.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для количественного сравнения результатов эксперимента и моделирования было выполнено усреднение экспериментально определенной амплитуды путем наложения двух участков $0\text{—}90^\circ$ и $90\text{—}180^\circ$. Результаты моделирования и экспериментальных измерений амплитуды сигнала от БЦО с учетом усреднения в каждой точке показаны на рис. 8. Для количественного сравнения изменения амплитуды при повороте относительно направления выращивания было проведено нормирование амплитуды принятого сигнала в каждой точке по значению амплитуды сигнала в точке 0° , что позволяет провести сравнение изменения амплитуды в дБ при повороте относительно направления выращивания до положения 90° — перпендикулярного направлению выращивания. Точками обозначены результаты измерения, сплошными кривыми — их аппроксимация.

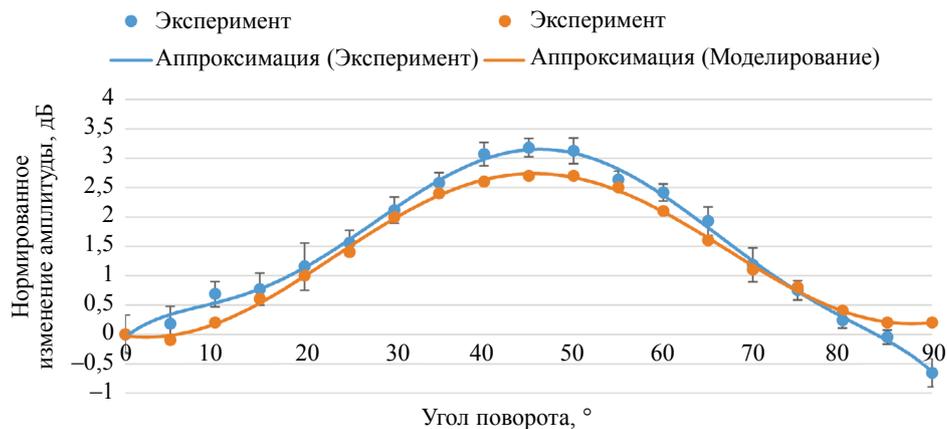


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных и моделирования.

Между положениями $0\text{—}45^\circ$ мы наблюдаем увеличение амплитуды на 3,2 дБ в случае эксперимента и увеличение до 2,7 дБ в случае моделирования. На участке от 45 до 90° изменение амплитуды снижается до $-0,7$ дБ в случае эксперимента и до 0,2 дБ в случае моделирования. Максимальное количественное различие между данными эксперимента и модели составляет 0,9 дБ, что говорит о хорошей сходимости результатов. Амплитуда сигнала при вводе УЗ колебаний перпендикулярно направлению выращивания (положение 0°) практически не отличается от амплитуды при возбуждении колебаний параллельно направлению выращивания (положение 90°), отклонение амплитуды между вышеуказанными положениями составляет менее 1 дБ.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что акустические свойства изделий АП могут отличаться в зависимости от направления распространения ультразвуковых колебаний в связи с особенностями формирования структуры изделий при послойном выращивании.

2. Предложенная аналитическая модель трансверсально-изотропной среды для оценки влияния акустической анизотропии изделий АП на амплитуду отраженных от модели дефекта ультразвуковых сигналов показала хорошее соответствие с экспериментом.

3. Максимальное отклонение амплитуды принятого сигнала от БЦО при изменении направления ввода на 45° от направления выращивания составило 3,2 дБ, что превышает допустимую погрешность измерений и предъявляет необходимость учитывать отклонение амплитуды при разработке технологии контроля изделий, изготовленных по аддитивным технологиям.

4. Определение симметрии упругих свойств позволяет количественно оценить влияние анизотропии на результаты контроля. Данная особенность обуславливает необходимость учета влияния свойств каждого конкретного изделия с определенной степенью анизотропии на достоверность результатов контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim Felix H., Moylan Shawn P. Literature Review of Metal Additive Manufacturing Defects // NIST Advanced Manufacturing Series 100-16. 2018.
2. Алешин Н.П., Мурашов В.В., Щипаков Н.А., Краснов И.С., Ложкова Д.С. Экспериментальные исследования возможностей и особенностей ультразвукового контроля деталей, изготовленных по аддитивным технологиям // Дефектоскопия. 2016. № 12. С. 17—24.
3. Javidrad H.R., Salemi Sina. Determination of elastic constants of additive manufactured Inconel 625 specimens using an ultrasonic technique // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020.
4. Charmi A., Falkenberg R., Ávila L., Mohr G., Sommer K., Ulbricht A., Sprengel M., Neumann R. Saliwan, Skrotzki B., Evans A. Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study // Materials Science and Engineering. 2021. V. 799.
5. Honarvar F., Varvani-Farahani A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control // Ultrasonics. 2020. V. 108. P. 106—127.
6. Sol T., Hayun S., Noiman D., Tiferet E., Yeheskel O., Tevet O. Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples // Additive Manufacturing. 2018. 22 (June). P. 700—707. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.016>
7. Hitzler L., Janousch C., Schanz J., Merkel M., Mack F., Öchsner A. Non-destructive evaluation of AlSi10Mg prismatic samples generated by selective laser melting: Influence of manufacturing conditions // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2016. V. 47. No. 6. P. 564—581.
8. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Масайло Д.В., Григорьев А.В. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 4—11. DOI: [dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11](https://doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11)
9. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J. Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting // Acta Mater. 2014. V. 68. P. 150—158.
10. Wauthle R., Vrancken B., Beynaerts B., Jorissen K., Schrooten J., Kruth J. P., Van Humbeeck J. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures // Additive Manufacturing. 2015. V. 5. P. 77—84.
11. Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г., Волкова Н.Н., Загребин Б.Н. Групповая скорость ультразвука в трансверсально изотропной среде // Дефектоскопия. 1994. № 2. С. 58—63.
12. Смородинский Я.Г. Расчет поляризации упругих волн в трансверсально-изотропном аустените // Дефектоскопия. 1999. № 4.1. С. 9—12.
13. Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г. Упругие волны в неоднородной пластине аустенита в модели трансверсально-изотропной среды // Дефектоскопия. 2001. № 7. С. 40—64.
14. Sanjeevareddy Kolkoori. Quantitative Evaluation of Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous Anisotropic Austenitic Welds using 3D Ray Tracing Method / Numerical and Experimental Validation. Doctor's thesis. Berlin, 2014. 250 p.