Лазерно-ультразвуковая диагностика пластиковых изделий, изготовленных методом аддитивных технологий

М.М. Новиков[1], Л.В. Новикова[1], Е.В. Саватеева[1], В.А. Симонова[2]

[1]Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» 140700 г.Шатура, МО, ул.Святоозерская, д.1 Россия
[2]Научный центр волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (филиал), 123007 г.Москва, 5-я Магистральная ул., 11 Россия

Аннотация

В настоящей работе рассматриваются применения методов неразрушающего контроля и дефектоскопии пластиковых изделий, изготовленных методом аддитивных технологий. Современное развитие аддитивных технологий, связанное с активным переходом от изготовления прототипов и тестовых образцов, к изготовлению функциональных изделий, увеличивает требования к повышению качества изготовления и проведению неразрушающей диагностики готовых изделий, в том числе и из пластиковых материалов. Общая производительность производственного процесса может быть повышена за счет увеличения выхода, обусловленного снижением количества брака, что обеспечивается контролем процесса и качества готовых изделий. Метод лазерно-ультразвуковой диагностики позволяет проводить контроль и дефектоскопию изделий из разных материалов с хорошим пространственным разрешением, что не всегда возможно, например, томографическим сканированием. Таким образом, основной целью данной работы является оценка возможности использования лазерно-ультразвуковых методов для обнаружения потенциальных дефектов и отслеживание влияние технологического процесса аддитивного производства на качество пластиковых изделий.

Ключевые слова

Аддитивные технологии, лазерно-ультразвуковая диагностика, компьютерная графика, лазерная стереолитография, дефектоскопия.

Laser-ultrasound diagnostics of plastic products made by the additive technologies

M.M. Novikov[1], L.V. Novikova[1], E. V. Savateeva[1], V. A. Simonova[2]

[1] Research Center Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences 140700 Shatura, MO, Svyatoozerskaya str., 1, Russia
[2] Scientific Center for Wave Research of the Federal State Budgetary Institution of Science of the A. M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences (branch), 123007 Moscow, 5th Main street, 11, Russia

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия
EMAIL: novikov@rambler.ru (М.М. Новиков);.lrnov@mail.ru (Л.В.Новикова); evsav@mail.ru (Е.В. Саватеева); varvara.simonova@gmail.com (В.А. Симонова)
ORCID: 0000-0003-0626-793X (М.М. Новиков); 0000-0002-7856-6202 (В.А. Симонова)

Abstract

This paper discusses the application of methods of non-destructive testing and flaw detection of plastic products manufactured by additive technologies. The modern development of additive technologies associated with the active transition from the manufacture of prototypes and test samples to the manufacture of functional products increases the requirements for improving the quality of manufacturing and conducting non-destructive diagnostics of finished products, including plastic materials. The overall productivity of the production process can be increased by increasing the yield due to a decrease in the number of defects, which is ensured by process control and the quality of finished products. The method of laser-ultrasound diagnostics allows monitoring and flaw detection of products made of different materials with good spatial resolution, which is not always possible, for example, by tomographic scanning. Thus, the main purpose of this work is to evaluate the possibility of using laser-ultrasonic methods to detect potential defects and to track the impact of the additive manufacturing process on the quality of plastic products.

Keywords

additive technologies, laser-ultrasound diagnostics, computer graphics, laser stereolithography, defectoscopy

1. Введение

Развитие лазерной техники, компьютерных систем трехмерного моделирования, разработка специальных материалов и оборудования сделали возможным прямое изготовление трехмерной компьютерной модели с любой геометрической формой методами добавления материала. Развитие таких технологий в настоящее время позволяет реализовать процесс создания объекта из разных материалов (жидкого полимера, порошка металлов, пластика, бумаги) при помощи разных технологических процессов (отверждение светом фотополимера, тепловое склеивание полимерных нитей, лазерное спекание металлических порошков …), обеспечивая требуемые параметры: необходимые размеры (от микрон до метров) и их точность, сложность геометрии, качество поверхности, скорость изготовления и функциональность. Сейчас эти технологии шагнули далеко вперед, найдя множество применений на производстве, приближаясь помимо изготовления прототипов и копий к созданию полноценных функциональных моделей. Поэтому в настоящий момент они получили общее название «аддитивное производство». Анализ современного состояния аддитивных технологий, основанных на процессе фотополимеризации [1-2], показывает, что они не только успешно развиваются, осваивая новые ценовые сегменты, но и разрабатываются новые перспективные материалы и оригинальные применения. Разработка новых фотополимерных композиций, обеспечивающие высокие функциональная свойства изделий, изготовленных методам лазерной стереолитографии имеет большое значение для развития аддитивного производства. Основным достоинством этой технологии является возможность быстрого создания изделий и построения моделей сложной формы с высокой точностью. После появления этой технологии в 1981 [3-4] значительные успехи были достигнуты в разработке фотополимерных композиций для создания изделий, обладающих высокими физико-химическими характеристиками [5-7]. Для увеличения производительности производственного процесса и повышения качества изготавливаемых изделий требуется развитие бесконтактных методов обнаружения потенциальных дефектов и отслеживание влияние технологического процесса на качество конечного изделия. В работе [8] было представлено использование магнитно-резонансной томографии (МРТ) для мониторинга, изучения выходного качества пластиковых моделей на основе акрилата, изготовленных с использованием стереолитографии. Было изучено влияние параметров сборки и влажной среды на однородность образца, распределение плотности сшивки, стабильность и образование дефектов. Качественная информация, полученная с помощью визуализации МРТ, была дополнена количественными измерениями времени релаксации ядерного магнитного резонанса и его спектров. Различные типы дефектов в образцах были обнаружены и классифицированы; некоторые дефекты возникли из-за локальных нарушений непрерывности матрицы (частичное застывание отвержденной смолы внутри полимера или образование

пузырьков), в то время как другие дефекты были обнаружены в виде объемного наслоения. Визуализация МРТ в сочетании с релаксометрией и 1-часовой спектроскопией паттернов позволила отслеживать распределение воды внутри образца и наблюдать эффекты набухания, разрыва и химического разложения только при их взаимодействии с водой. В данной работе рассматривается применение лазерной ультразвуковой томографии для исследования пластиковых моделей, полученных методом лазерной стереолитогрфафии для получения более точных данных о геометрии дефектов без длительного взаимодействия с водой.

2. Лазерная стереолитография и лазерная ультразвуковая томография

Лазерная стереолитография является одной из аддитивных технологий. Трехмерный объект при этом формируется послойно воспроизведением каждого слоя на поверхности жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК) с помощью лазерного излучения, как правило, ультрафиолетового диапазона. ФПК под действием лазерного излучения полимеризуется, образуя тонкую полимерную пленку. Переход к следующему слою осуществляется путем погружения платформы, на которой размещается объект, в емкость с жидкой ФПК на глубину, равную толщине следующего слоя. При полимеризации последующего слоя он приклеивается к предыдущему, что обеспечивает жесткость всего изделия. Формирование слоя осуществляется путем воспроизведения внешних и внутренних контуров и заполнения пространства между ними соответствующей штриховкой. Так как плотность ФПК в жидком состоянии меньше, чем в твердом, то при изготовлении объекта происходит объемная усадка. Этот процесс в свою очередь может приводить к деформации и искажениям формы объекта. Чем протяжённей длина штриха и чем больше заполняемая площадь, тем более существенными могут быть деформации, вызванные объемной усадкой. Для уменьшения влияния усадки на искажение геометрии изделия используются разнообразные технологические приемы, связанные с формированием специализированных методов заполнения формирующих слоев [7]. Для диагностики возможных дефектов, связанных с технологией формирования объемных пластиковых изделий методом лазерной стереолитографии, в данной работе использовалась лазерная ультразвуковая томография.

В традиционном ультразвуковом эхо-импульсном методе короткий акустический зондирующий импульс используется для зондирования объекта, а зарегистрированное обратно рассеянное акустическое поле - для восстановления внешней границы и внутренних акустических неоднородностей (рассеивателей) [9]. Лазерный ультразвуковой (ЛУ) метод диагностики основан на генерации звуковых волн лазерным импульсом. Этот импульс поглощается в поверхностном слое исследуемого объекта или в специальном материале, называемым оптико-акустическим (ОА) генератором. Временная форма и амплитуда зондирующего ультразвукового импульса, возбужденного ОА генератором, определяются коэффициентом поглощения света в генераторе, временной зависимостью интенсивности лазерного импульса и плотностью поглощенной лазерной энергии.

ЛУ метод похож на традиционный ультразвуковой метод контроля, однако вместо использования пьезоэлектрических преобразователей для генерации и приема короткого акустического зондирующего импульса в ЛУ методе используется короткий (обычно <10 ns) лазерный импульс для генерации короткого (<100 ns) и широкополосного (1–9 MHz) акустического зондирующего импульса за счет оптико-акустического эффекта [9]. В этом случае хорошо задемпфированные пьезоэлектрические преобразователи могут использоваться для приема обратно рассеянного акустического поля в широком диапазоне частот [9-11]. ЛУ метод - эффективный и быстродействующий, поскольку для генерации зондирующего ультразвукового сигнала используется лазерный импульс, а ширина полосы зондирующего импульса может быть достаточно широкой (от единиц до десятков MHz). При этом ультразвуковые преобразователи могут быть оптимизированы для широкополосного приема и лучшей акустической связи, поскольку они не используются для генерации ультразвука. Это позволяет проводить широкополосный ультразвуковой контроль объектов и эффективно разделять генерацию и обнаружение ультразвуковых сигналов для увеличения отношения сигнал / шум. Кроме того, поперечный профиль акустического пучка повторяет гладкий

поперечный профиль освещающего лазерного луча, таким образом, практически устраняя боковые лепестки [10]. Появление фокусированных пьезоэлементных антенных решеток и активное развитие средств вычислительной техники существенно расширяют возможности лазерно-ультразвуковой (ЛУ) томографии внутренней структуры горных пород, композитных материалов, биологических и других гетерогенных сред [12-15].

2.1. Дефектоскопия пластиковых дисков

Для тест-объекта использовалась модель тонкого диска диаметром 40мм и толщиной 2,5мм, форма диска имеет минимальные деформации, связанные с объемной усадкой, а малая толщина позволяет в одном эксперименте исследовать всю структуру модели, верхние и нижние слои формирования объекта (Рисунок 1).

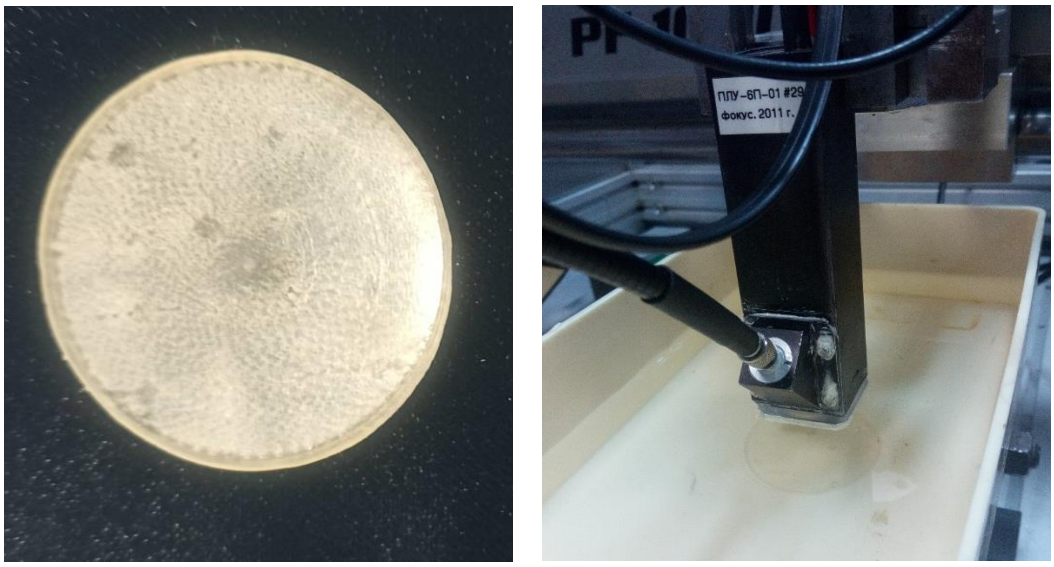


Рисунок 1: Фотография объекта контроля и системы автоматического лазерного сканирования фокусированным преобразователем модели ПЛУ-6П-01.

Технологический стиль формирования объекта.

```
;Шаг штриховки по X Y
h.step=0.25 0.25
;Цикл смещения X Y
h.shiftstep=2 2
;псевдоЭквидистанта
h.psevdoEquid=0.05
;Отступ штриховки
h.otstup=0.03
;Порядок штриховки (режим): 0/1/2/3 = X/Y/XY/X-Y
h.order=2
;Черезслойная инверсия направления штриховки  1/0 - да/нет
h.iversion=1
;Параметры штриховки верхних и нижних плоскостей
;Шаг штриховки по X Y
hU.step=0.15 0.15
;Цикл смещения X Y
hU.shiftstep=2 2
;псевдоЭквидистанта
hU.psevdoEquid=0.05
;Отступ штриховки
hU.otstup=0.03
;Порядок штриховки (режим): 0/1/2/3 = X/Y/XY/X-Y
```

hU.order=3.

Образцы изготавливались слоями 150мкм, полное число слоев 17, расчетная глубина полимеризации нижняя плоскость 180мкм, внутренняя штриховка 120мкм, верхняя плоскость 160мкм. В группу образцов входили модели с разным временем задержки лазера на точку, промаркированы соответственно 1 образец – 2 точки, 2 образец – 3 точки, 3 образец - 4 точки. Результаты структуроскопии представляют из себя набор срезов по плоскостям XZ, YZ и XY. Анализ данных сканирования проводится послойно в программе ADC View. На рисунке 2 представлена вкладка программы с результатами контроля **образца №1** со срезами, проходящими через центр образца: в окнах 1-3 представлены срезы XY, YZ и XZ соответственно, окно 4 – окно задания фильтра, в окне 5 представлен сигнал, зарегистрированный в точке поверхности с координатами X и Y, выбранными в окне 1 перекрестием красных маркеров. Все образцы промаркированы. Верхняя поверхность образцов более гладкая. На нижней поверхности образцов видны следы подпорок. Исходно первый нижний слой образцов изготовлялся с более высокой дозой на точку для прочности всего образца, доза последнего верхнего слоя также была чуть выше дозы всех слоев (но меньше, чем доза самого первого нижнего слоя) для обеспечения гладкой поверхности у образца.

В группу образцов входили модели с разным временем задержки лазера на точку, промаркированы соответственно 1 образец – 2 точки, 2 образец – 3 точки, 3 образец - 4 точки. Результаты структуроскопии представляют из себя набор срезов по плоскостям XZ, YZ и XY. Анализ данных сканирования проводится послойно в программе ADC View. На Рисунке 2 представлена вкладка программы с результатами контроля **образца №1** со срезами, проходящими через центр образца: в окнах 1-3 представлены срезы XY, YZ и XZ соответственно, окно 4 – окно задания фильтра, в окне 5 представлен сигнал, зарегистрированный в точке поверхности с координатами X и Y, выбранными в окне 1 перекрестием красных маркеров.

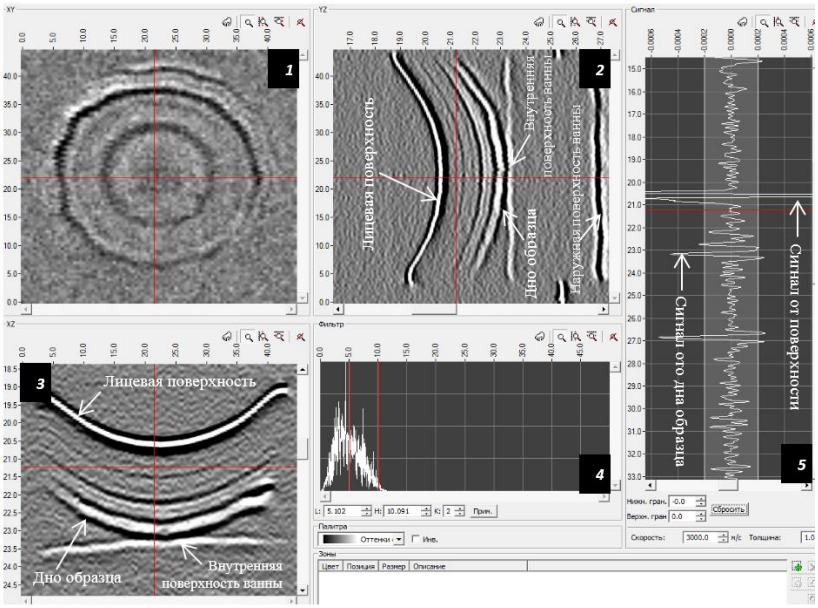


Рисунок 2: Результаты сканирования **образца №1** в программе CLUE-AutoScan: 1 – окно со срезом вдоль осей XY, 2 – окно со срезом вдоль осей YZ, 3 – окно со срезом вдоль осей XZ, 4 – окно задания фильтра, 5 – сигнал, выбранный в окне 1 перекрестием.

Лицевая поверхность тестируемого образца изображается яркой белой линией, отражение от свободной донной поверхности (как и от любой несплошности) представляется интенсивно-темной линией. На Рисунке 2 отмечены лицевая поверхность образца, его дно, а также в окне 5 отмечены соответствующие им

регистрируемые сигналы. В центральной части образца хорошо прослеживается внутренняя структура: можно насчитать 7÷8 слоев. Чем больше разница импедансов соседних слоев, тем сильнее заметна граница между ними. В окнах 1-3 границы между слоями отображаются темными линиями. Видно, что границы более интенсивно-темного цвета наблюдаются вблизи донной поверхности (сам же придонный слой отображается ярко-белой полосой), что говорит о том, что придонные слои являются значительно более жесткими по сравнению с остальными. Расположение особенностей по глубине пересчитывается исходя из скорости распространения ультразвука в материале и соответствует реальным значениям в мм. Невооруженным глазом видно, что образец не является плоским. Любые нарушения в периодичности картины на срезах говорят о наличии неоднородностей внутренней структуры.

На Рисунке 3 предоставлены результаты тестирования со срезами, проходящими через обнаруженные неоднородности внутренней структуры. Эти особенности отображаются в окне 1 темными пятнами, в окнах 2 и 3 проседанием сигнала от границы между придонными слоями (отмечены во всех окнах красными стрелками). В окне 5 видно, что сигнал от неоднородности превышает амплитуду донного сигнала (который, в свою очередь, ослаблен по сравнению с сигналом, представленным на рисунке 2), и тем самым данная особенность, скорее всего, является несплошностью.

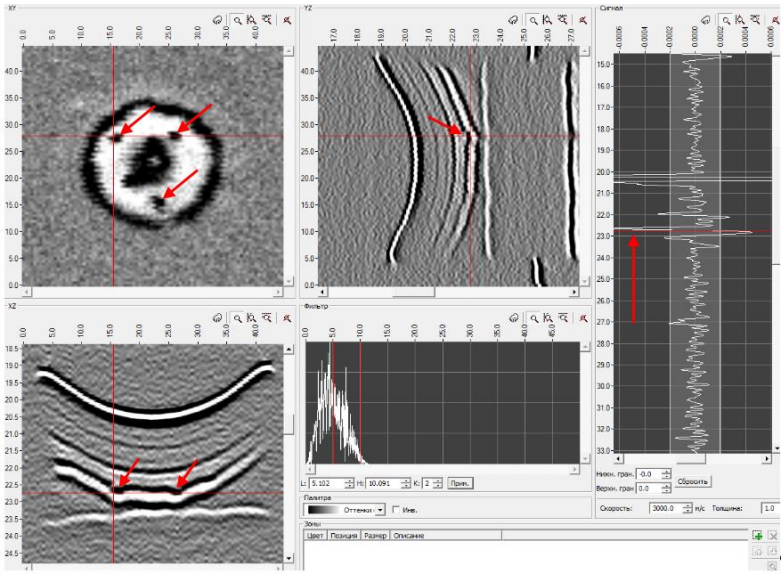


Рисунок 3: Результаты сканирования **образца №**1 со срезами, проходящими через несплошность.

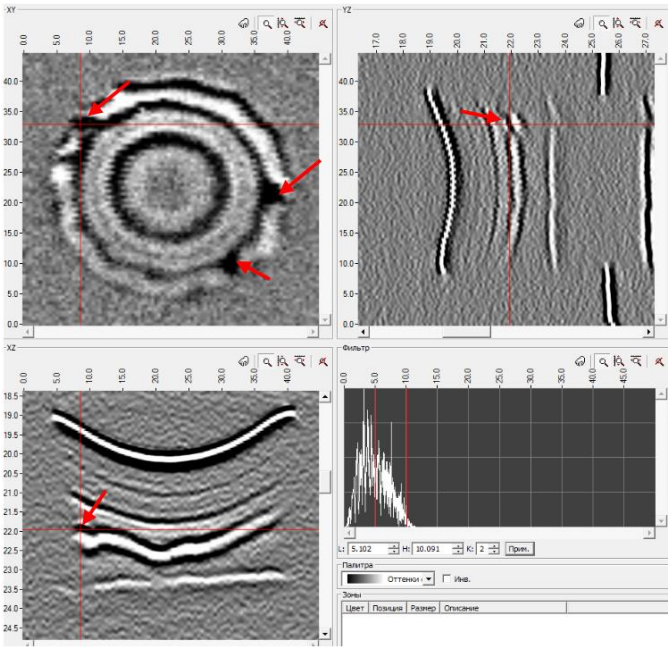
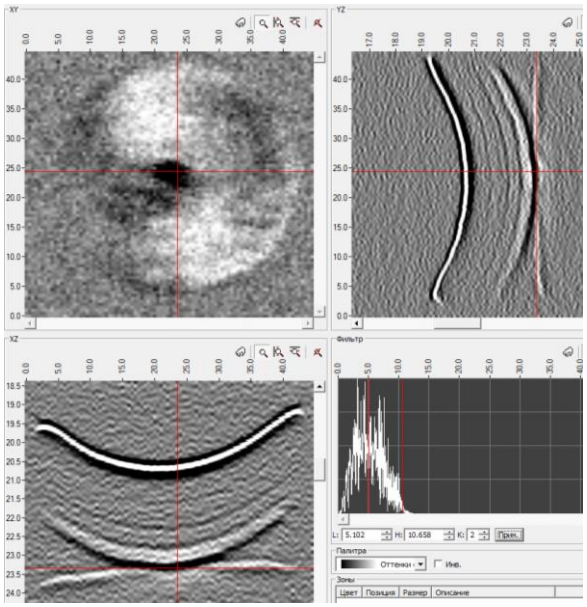


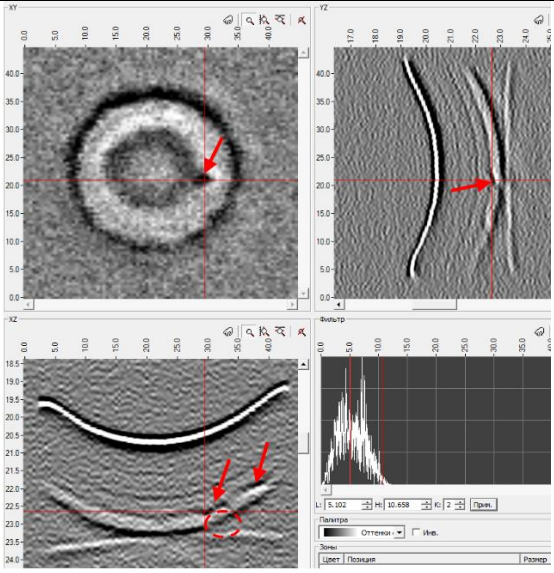
Рисунок 4: Результаты сканирования **образца №1** ы со срезами, проходящими через особенность внутренней структуры.

На Рисунке 4 представлен еще один комплект срезов, проходящих через неоднородности внутренней структуры образца №1. Сигнал от границы придонного слоя «проседает» (отмечено красными стрелками на XZ и YZ-срезах, на рисунке 3 то же самое), что говорит о неоднородности внутренней структуры в объеме предпоследнего слоя. Проседание сигнала отмечено на рисунке красными стрелками. Линия дна повторяет профиль вышеупомянутой границы между слоями. Несмотря на обнаруженные особенности, донный сигнал наблюдается во всем объеме образца. Эти особенности являются несплошностями и расположены на границе между придонными слоями. Особенностей структуры такого типа в образце достаточно много.

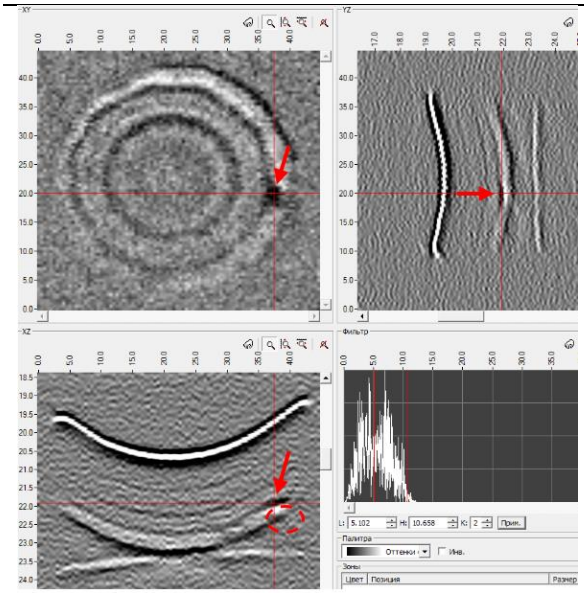
На Рисунке 5 представлены результаты сканирования **образца №2**.



а) Комплект срезов, проходящих через центр образца. Видна однородная внутренняя структура. Границы между слоями не столь заметны, как в предыдущем диске. Однако придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями.



б) Комплект срезов, проходящих через особенность внутренней структуры, являющейся несплошностью (отмечено красными стрелками). Донный сигнал «под» особенностью отсутствует или сильно ослаблен. Несплошность расположена между придонными слоями.

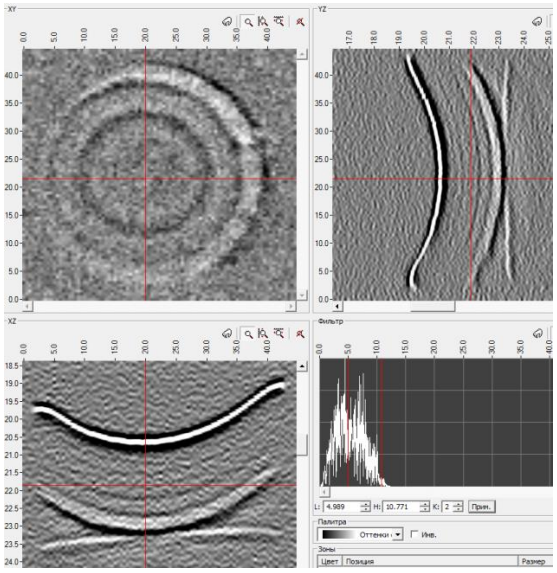


в) Комплект срезов, проходящих через особенность внутренней структуры, являющейся несплошностью (отмечено красными стрелками). Донный сигнал «под» особенностью сильно ослаблен. Несплошность расположена между придонными слоями на периферии образца.

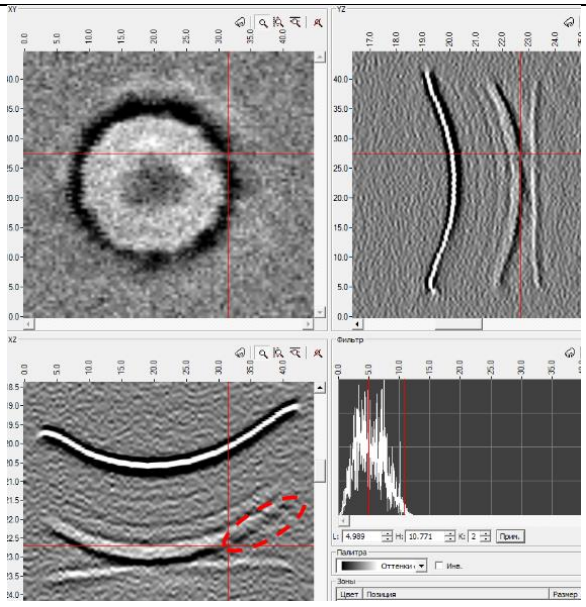
Рисунок 5: Результаты сканирования **образца №2** со срезами: а) проходящими через центр образца, б) и в) проходящими через особенности внутренней структуры.

Образец №2 обладает достаточно однородной структурой, присутствует несколько особенностей типа «несплошность».

На Рисунке 6 представлены результаты сканирования **образца №3**.



а) Комплект срезов, проходящих через центр образца. Видна однородная внутренняя структура. Границы между слоями не столь заметны, как в образце №1. Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями.



б) Комплект срезов, проходящих через периферию образца. Донный сигнал ослаблен, местами пропадает. Скорее всего, это связано с повышенным рассеянием на неоднородностях придонного слоя, поскольку несплошностей не обнаружено.

Рисунок 6: Результаты сканирования **образца №3** со срезами: а) проходящими через центр образца, б) проходящими через периферию диска.

Образец №3 обладает достаточно однородной структурой, особенностей типа «несплошность» не обнаружено.

3. Заключение

Лазерно-ультразвуковым методом была проконтролирована внутренняя структура пластиковых дисков. В группу образцов входили модели с разным временем задержки на точку. В центральной части образца №1 хорошо прослеживается внутренняя структура: можно насчитать 7÷8 слоев. Придонные слои являются значительно более жесткими по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Обнаружены неоднородности внутренней структуры предпоследнего слоя, а также небольшие несплошности между придонными слоями, несмотря на которые, донный сигнал наблюдается во всем объеме образца. В образце №2 слоистая структура прослеживается не так четко, как в предыдущем диске.

Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Обнаружено несколько особенностей типа «несплошность», за которыми донный сигнал сильно ослаблен или отсутствует. В образце №3 слоистая структура прослеживается не так четко, как в образце №1. Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Особенностей типа «несплошность» не обнаружено. Отсутствие донного сигнала в некоторых областях, скорее всего, связано с повышенным рассеянием ультразвука на неоднородностях последнего слоя. Образец №3, выполненный при максимальной дозе облучения (максимальная задержка на точку), имеет самую бездефектную структура, но и подвержен максимальным деформациям из-за объемной усадки полимера. Проведенная работа показала возможность дефектоскопии пластиковых моделей, изготовленных методом лазерной стереолитографии с помощью лазерно-акустической томографии. Проведение дополнительных исследований позволит получить точные геометрические размеры и квалифицировать типы неоднородностей, что позволить выбрать оптимальные параметры технологического процесса для получения более качественных изделий.

4. Литература

[1] C. Schmidleithner, D. Kalaskar 3D printing, Stereolithography. Ed. Cvetković D., London: IntechOpen. 2018.

[2] С.В. Камаев, М.А. Марков, А.Н. Никитин, М.М. Новиков Лазерная стереолитография: состояние и перспективы Аддитивная технология. -2018. N4.-С. 44-48.

[3] H. Kodama Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, The reviews of scientific instruments. -1981.-Vol.52. Iss. 11-P.1770-1773, DOI:10.1063/1.1136492.

[4] J.W. Halloran, Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization, Annual Review of Materials Research. 2016. Vol.46.-P.19-40. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031841

[5] S. Waheed, J.M. Cabot, N.P. Macdonald, T. Levis, R.M. Guijt, B. Paull, Breadmore M. C. 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers, Lab on a Chip, 2016. Vol.16.-P.1993-2013. DOI: 10.1039/c6lc00284f.

[6] P.F. Jacobs Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers. 1992.

[7] V.V. Vnuk, E.V. Ippolitov, S.V. Kamaev, M.A. Markov, A.A. Nikulenko, M.M. Novikov, S.A. Cherebylo Study of the influence of technological features of laser stereolithography process on functional characteristics of parts Materials Physics and Mechanics 47 (2021) 293-305 http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4722021_11

[8] E. V. Morozov, M. M. Novikov, V. M. Bouznik MRI monitoring and non-destructive quality measurement of polymeric patterns manufactured via stereolithography, Additive Manufacturing 12 (2016) 16–24 http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.015

[9] A. Oraevsky, A. Karabutov, Ultimate sensitivity of time-resolved optoacoustic detection, Proc. of SPIE, 3916 (2000) 228-239. https://doi.org/10.1117/12.386326.

[10] A. Bychkov, V. Simonova, V. Zarubin, E. Cherepetskaya, A. Karabutov The Progress in Photoacoustic and Laser Ultrasonic Tomographic Imaging for Biomedicine and Industry: A Review, Appl. Sci. 8 (2018) 1931. https://doi.org/10.3390/app8101931.

[11] A.A. Karabutov, N.B. Podymova, V.S. Letokhov, Time-resolved laser optoacoustic tomography of inhomogeneous media, Appl. Phys. B 63 (1996) 545–563. https://doi.org/10.1007/BF01830994.

[12] T.D. Khokhlova, I.M. Pelivanov, A.A. Karabutov // App. Phys. Lett. 92 (2008) 024105. https://doi.org/10.1063/1.2834855.
[13] A.S. Bychkov, E.B. Cherepetskaya, A.A Karabutov., V.A. Makarov Optoacoustic tomography utilizing focused transducers: The resolution study, J. of Biomed. Opt. 22 (2017) 076003. https://doi.org/10.1117/1.JBO.22.7.076003.
[14] M.W. Schellenberg, H.K. Hunt Hand-held optoacoustic imaging: A review, Photoacoustics, 11 (2018) 14-27. https://doi.org/10.1016/j.pacs.2018.07.001.
[15] P. Beard Biomedical photoacoustic imaging, Interface Focus 1 (2011) 602–631. https://doi.org/10.1098/rsfs.2011.0028.