

УДК 681.787, 745.512

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ИСКУССТВА, ВЫПОЛНЕННЫХ В ТЕХНИКЕ ИНТАРСИИ

И.П. Гуров, Е.В. Жукова, А.В. Левшина

Рассматриваются возможности применения метода оптической когерентной томографии с перестраиваемой длиной волны (1305 ± 75 нм) для изучения предметов декоративно-прикладного искусства, изготовленных с применением техники деревянной интарсии. Приводятся изображения В-сканов и 3D-изображения областей исследования.

Ключевые слова: оптическая когерентная микроскопия, 3D-изображение, инкрустация, интарсия, декоративно-прикладное искусство.

Введение

Сохранение культурного наследия нуждается в применении неразрушающих методов диагностики ценных предметов искусства. Известно, что метод оптической когерентной томографии (ОКТ) в последнее десятилетие стал широко использоваться в изучении живописи и разнообразных объектов культурного наследия. Инновационные научные центры, работающие с такими бесценными объектами, оборудованы самой современной техникой, включая спектральные, рентгеноскопические, микроскопические и ОКТ-комплексы. Результаты исследования живописных слоев старинных работ методами ОКТ представлены, например, в [1]. Изучению свойств лаковых слоев масляной живописи посвящена работа [2]. ОКТ-приборы успешно применяются в диагностике старинных образцов стекла и природных минералов [3–5].

Разнообразие материалов, из которых выполнены предметы искусства или входящие в их состав отдельные элементы, весьма велико. Особое место при изготовлении изделий, представляющих художественную ценность, занимает такой доступный и широко используемый материал, как дерево. Известны результаты применения метода ОКТ к исследованию материала древесины [6]. Однако на современном этапе использования ОКТ в музейном деле недостаточное внимание уделено изучению предметов декоративного искусства и народных промыслов, изготовленных из разных пород дерева, имеющих лаковые покрытия и роспись. Ранее нами были выполнены эксперименты по изучению методами спектральной и корреляционной ОКТ разнообразных материалов, в том числе поверхности древесины [7]. Цель настоящей работы – продемонстрировать возможности применения метода ОКТ для диагностики микроструктуры поверхности деревянных объектов, выполненных в технике инкрустации, на примере исследования конкретного изделия декоративно-прикладного искусства.

Объект исследования

Инкрустация – это известный способ украшения изделий узорами и изображениями поверхностей различных предметов. В качестве материала вставок в инкрустации используют кусочки металлов, минералов, кости, перламутра, ценных пород дерева, драгоценные камни. Отличаясь по фактуре и цвету, материалы создают причудливые орнаменты на основе геометрического и природного рисунков. Такой способ отделки однотонных материалов позволяет улучшить потребительские свойства и создает особое эстетическое впечатление об изделии.

Разновидность инкрустации – интарсия, технологический прием декорирования деревянных изделий вставками других пород дерева. Разнообразие растительной флоры издревле используется в технике украшения деревянных поверхностей разного назначения. Мастерами созданы бесценные шедевры – образцы домашней утвари, интерьера, декоративных панно. Интарсия и маркетри – это две технологии, которые успешно использовались ранее при создании предметов искусства. Отличие техники маркетри от интарсии состоит в том, что украшается вставками вся поверхность изделия. Для изготовления вставок при инкрустации используются листы шпона разных пород дерева, которые особым образом закрепляются на поверхности декорируемого предмета.

В качестве объекта исследования была выбрана деревянная ваза, изготовленная в 70-х г.г. XX в. Этот объект представляет собой образец кустарного производства. Внешний вид вазы и изучаемая область на ее поверхности показаны на рис. 1. Ваза изготовлена методом точения из бруска березы. Внешняя сторона вазы дополнительно подвергалась тонированию морилкой. Далее вручную мастером выполнена инкрустация кусочками шпона по поверхности нижней части вазы. В качестве материала, вероятно, использовалась мягкая светлая порода деревьев, например, клена или ясеня. В раппорте орнамента в ряде случаев нарушено расстояние между ромбами как в отдельных рядах, так и между рядами, что указывает на кустарный способ отделки изделия. Трудность выполнения интарсии на этом изделии обусловлена округлостью формы основы поверхности, вставки имеют небольшие размеры и изготовлены из листового шпона.

Основными исследовательскими задачами работы были изучение технологического приема крепления вставок на округлой поверхности и анализ возможностей применения технологий ОКТ для исследования объектов, выполненных в технике интарсии.

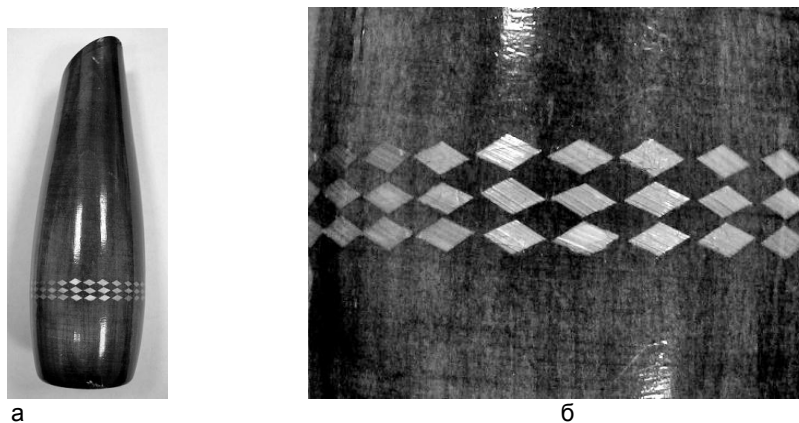


Рис. 1. Предмет декоративно-прикладного искусства, выполненный с использованием технологии интарсии: внешний вид изделия (а); геометрический орнамент на поверхности вазы (б)

Экспериментальное оборудование

Для изучения свойств области интарсии был использован оптический когерентный микроскоп (ОКМ), модель EX1301 производства фирмы Michelson Diagnostics (Великобритания), принцип работы которого основан на методе спектральной оптической когерентной микроскопии. Микроскоп конструктивно выполнен в виде микроинтерферометра [8]. В состав прибора входит лазерный источник с возможностью перестройки по длинам волн относительно максимума излучения на длине волны 1305 ± 75 нм. Излучение в процессе сканирования проникает в толщу изучаемого образца, рассеивается на микронеоднородностях и, отражаясь от внутренних слоев, попадает на фотодиод, который служит приемником излучения. Четырехлинзовая система фокусировки позволяет выполнять регистрацию предметной волны, отраженной на разной глубине, которая, интерферируя с опорной волной, формирует интерференционные картины на различных длинах волн. Микроскоп обеспечивает регистрацию томограмм (В-сканов) в диапазоне глубин до 2 мм. Оптическое аксиальное разрешение (по глубине сканирования) составляет 10 мкм, а боковое разрешение – не хуже 7,5 мкм. Возможно исследовать область образца размерами до $7 \times 12 \times 2$ мм, при этом минимальный шаг бокового сканирования равен 1 мкм. Программное обеспечение ОКМ обеспечивает возможность реконструкции 3D-изображения, выделение в нем отдельных сечений и микрообъемов с целью детального анализа изучаемой области, что и было использовано при экспериментальных исследованиях.

Экспериментальные результаты

На первой стадии эксперимента были оценены условия применения метода ОКТ к изучению микроструктуры деревянной поверхности. На рис. 2 представлены реконструированные 3D-изображения поверхности объекта, покрытого слоем лака. Направление X соответствует боковому движению зондирующего пучка при сканировании, а направление Y – смещению объекта при измерении, т.е. направлению сканирования по поверхности. Видно, что на изображении рис. 2, а, хорошо просматривается слой лака, оценка толщины которого, полученная при анализе томограмм, составила около 200 мкм. Возможность выделения отдельных сегментов объема при работе с 3D-изображением позволила рассмотреть поверхность древесины, находящуюся под слоем лака. Довольно хорошо видны волокна и трещины на поверхности слоя дерева. Это указывает на то, что изучаемый объект в процессе хранения состарился, древесина вазы рассохлась, возникли трещины внутри древесной ткани, которые и привели к появлению трещин в лаковом слое.

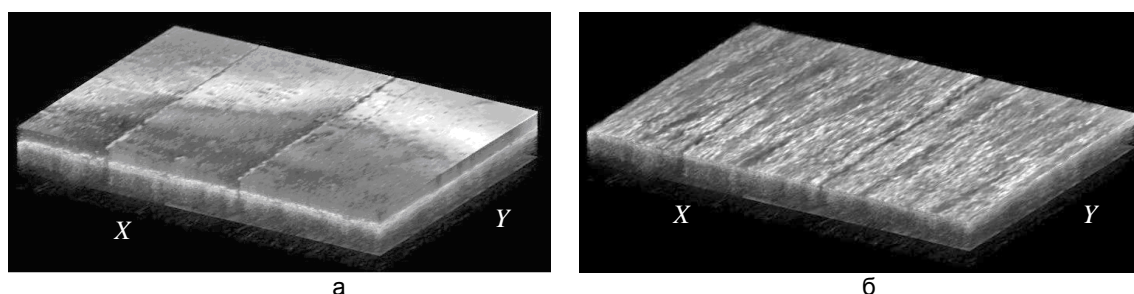


Рис. 2. Восстановленное 3D-изображение поверхности дерева с лаковым покрытием: поверхности с лаковым слоем ($x=2,10$ мм; $y=1,41$ мм; $z=1,10$ мм) (а); поверхности после выделения на изображении слоя древесины ($x=2,10$ мм; $y=1,41$ мм; $z=0,88$ мм) (б)

Для изучения технологии интарсии было выполнено сканирование по поверхности вставки. Ширина сканирования составила 5 мм, а шаг сканирования по поверхности объекта – 0,01 мм. Присутствие лакового слоя, обладающего сильными отражающими свойствами, уменьшает интенсивность зондирующего излучения, которое должно проникать вглубь изучаемого объекта. Но, как показали ранее выполненные нами эксперименты по исследованию лаковых слоев, все же сохраняются условия для эффективного применения ОКМ в изучении материалов под лаковым слоем.

На рис. 3 приведены трехмерные изображения поверхности в области вставки. Работа с 3D-изображением позволяет ориентировать в пространстве цифровую модель изучаемой области, выделять необходимые области для детального исследования. Из рис. 3, а, видно, что почти нет зазоров между основой и вставкой по ее периметру, на поверхности лакового слоя, оставшегося над частью элемента инкрустации, видна сеть трещин. На рис. 3, б, показан этот же участок, но уже без лакового слоя.

Для выявления способа крепления элемента инкрустации в пазе основы исходное 3D-изображение было специальным образом сегментировано (рис. 4, а), и этот прием позволил визуализировать области соединения. Видно, что шпон вставки выступает над поверхностью основы. С учетом информации, имеющейся в трехмерном изображении, получена оценка высоты около 200 мкм. Выступы вставки наблюдались со всех сторон ромба, т.е. исходная технология крепления заключалась в создании рельефной интарсии. Последующее покрытие изделия лаком выравнивало высоты поверхностей, и в готовом изделии интарсия становилась художественной, одноуровневой.

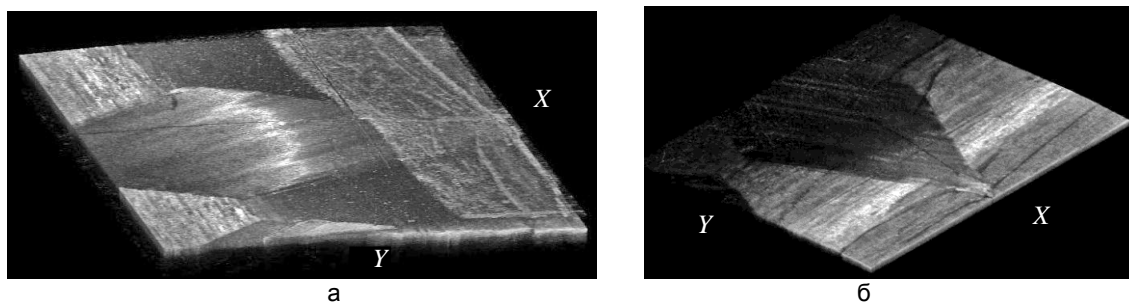


Рис. 3. Восстановленное 3D-изображение поверхности в области вставки: поверхности с частью лакового слоя ($x=5,0$ мм; $y=4,65$ мм; $z=0,9$ мм) (а); поверхности после выделения слоя древесины ($x=5,0$ мм; $y=4,65$ мм; $z=0,47$ мм) (б)

На рис. 4, б, в, приведены изображения томограмм (В-сканов) для разных сечений в пределах крепления вставки в выемке основы. На томограммах хорошо просматриваются пузырьки в лаке, высота которого над вставкой составляет не более 150 мкм, над основой 290 мкм. На поверхности древесины вазы по обе стороны от вставки виден дефектный слой (рис. 4, б). Его появление вызвано нарушением структуры поверхности древесных тканей в процессе обработки при вытачивании изделия, а также последующим тонированием морилкой поверхности дерева. Можно оценить глубину этого слоя величиной в 30–50 мкм. На томограммах не видна переходная область между лаком и поверхностью древесины, что связано с недостаточной разрешающей способностью ОКМ.

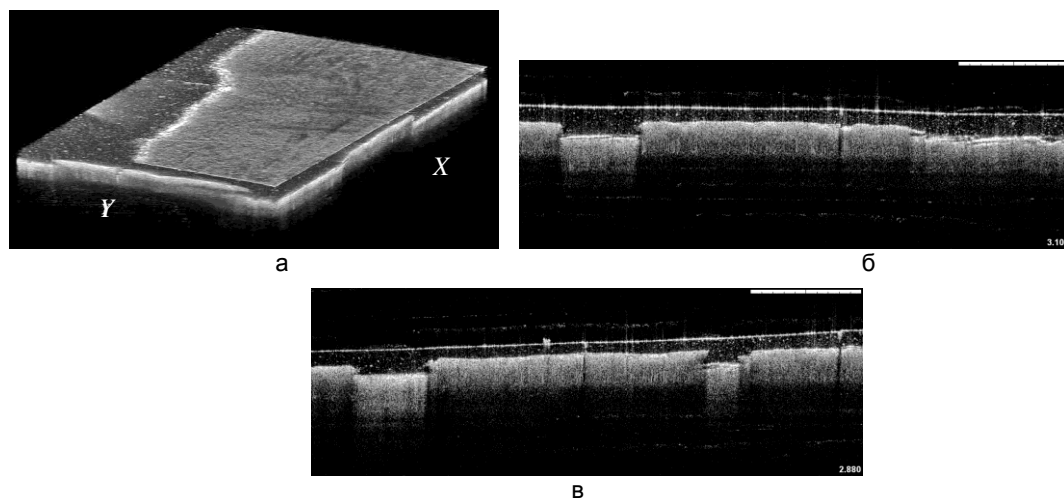


Рис. 4. Анализ 3D-изображения поверхности в области вставки: 3D-изображение поверхности с лаковым слоем ($x=5,0$ мм; $y=2,81$ мм; $z=1,33$ мм); томограммы (В-сканы) (б–в). Размер В-сканов – 5×2 мм

Традиционно в технике интарсии вставка изготавливается с нижней расширенной частью и в сечении имеет трапецидальную форму. Выемка для вставки на поверхности декорируемого изделия выполняется с пазами по бокам, и при креплении вставки возникает соединение типа «ласточкина хвоста». В данном случае мастер не использовал такой прием соединения элементов интарсии, что, вероятно, связано с округлой формой основы, на которую крепились близко расположенные вставки.

На рис. 5 приведено 3D-изображение, полученное при сканировании элемента поверхности интарсии, с которого удален лак.

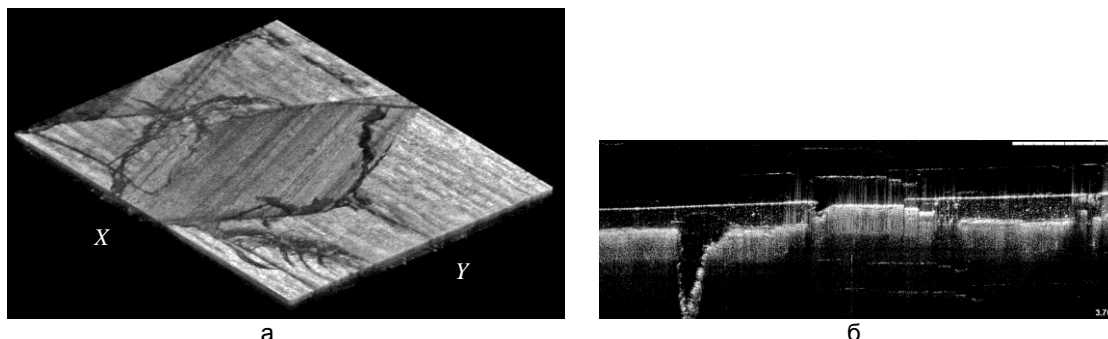


Рис. 5. 3D-изображение поверхности дерева вставки без лакового слоя: 3D-изображение поверхности ($x=5,0$ мм; $y=4,65$ мм; $z=0,70$ мм) (а); томограмма (В-скан) размером 5×2 мм (б)

Отсутствие лака на древесине позволило лучше визуализировать поверхность при сканировании. В частности, после удаления остатков слоя лака на трехмерном изображении поверхности и выделения слоя древесины (рис. 5, а) удалось наблюдать трещины на деревянной основе и самом элементе вставки. На рис. 5, б, приведена томограмма в одном из сечений. Видно, что слой лака на момент изготовления был тонкий, около 70 мкм, и со временем был утрачен. Причиной отслоения лака послужило образование трещины, которая по ширине составляет не менее 600 мкм при глубине более 900 мкм. На поверхности основы видна также разветвленная структура трещин, что подтверждается изучением отдельных В-сканов в местах их обнаружения. Это пример влияния растрескивания древесины на стыках и зазорах, приводящих к разрушению элементов интарсии.

Заключение

Изучение методом спектральной оптической когерентной микроскопии деревянного предмета декоративного искусства, выполненного в технике интарсии, позволило получить новую и интересную информацию, раскрывающую особенности технологии мастеров, работающих с деревом. Различия в природных свойствах вставок, изготавливаемых из разных пород дерева, хорошо визуализируются при изучении изделий с помощью ОКМ. Слой лакового покрытия, микроструктура деревянного фона, стыки между основой и вставкой, ее форма – это наблюдаемые участки на цифровом 3D-изображении объекта, они подлежат анализу при детальном исследовании. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования метода ОКТ для диагностики структуры интарсии у таких объектов.

При помощи метода оптической когерентной микроскопии можно выявить точные геометрические параметры вставок, отдельных участков и элементов, определить технологию крепления вставки, оценить состояние ее поверхности, сохранность материала, определить толщину лака и даже клея, который иногда используют при работе с древесиной, так как многие клеи прозрачны на данной длине волны.

Важным результатом выполнения подобных исследований может стать воссоздание трехмерной модели изучаемого участка в интарсии. При работе с особо ценными предметами искусства необходимо тщательно подходить к организации реставрационных работ, и послойное изучение 3D-изображения позволит уточнить геометрические объемы вставок, выявить направление волокон в труднодоступных для реставрации местах, оценить характер дефектов, размеры элементов и толщину отдельных слоев.

Методы оптической когерентной микроскопии могут быть применимы не только для изучения традиционной техники интарсии, но и для исследования объектов из дерева, украшенных маркетри, инкрустацией другими материалами, полезны в диагностике сохранности микросоединений, элементов узора резьбы, степени разрушения и загрязненности углублений и отверстий, и тут особая роль отводится работе с трехмерными цифровыми моделями изучаемых участков.

Неразрушающий метод контроля, реализуемый при помощи технологий оптической когерентной томографии, исключительно важен при изучении разнообразных ценных предметов искусства, инкрустированных различными материалами. Сочетание высокой разрешающей способности метода оптической когерентной микроскопии с вычислительными возможностями современных компьютерных технологий обеспечивает дальнейшее развитие методов диагностики состояния исторических памятников и предметов культурного наследия, возможности идентифицировать старинные изделия и сохранить ценные предметы искусства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Liang H. En-face optical coherence tomography – a novel application of non-invasive imaging to art conservation // *Opt.Expr.* – 2005. – V. 13. – № 16. – P. 6133–6144.
2. Latour G., Georges G., Siozade L., Deumié C., Echard J.P. Study of varnish layers with optical coherence tomography in both visible and infrared domains // *Proc. of SPIE.* – 2009. – V. 7391. – 73910J–1 –73910J–9.
3. Targowski P., Iwanicka M. Optical Coherence Tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects – a review // *Appl. Phys. A.* – 2012. – V. 106. – № 2. – P. 265–277.
4. Chang S., Mao Y., Fluerau C., Chang G. Optical coherence tomography used for jade industry // *Proc. of SPIE.* – 2010. – V. 7855. – P. 785514–1–785514–9.
5. Adler D.C., Stenger J., Gorczynska I., Lie H., Hensick T., Spronk R., Wolohojian S., Khandeka N., Jiang J.Y., Barry S., Cable A.E., Huber R., G. Fujimoto J.G. Comparison of three-dimensional optical coherence tomography and high resolution photography for art conservation studies // *Opt. Expr.* – 2007. – V. 15. – № 24. – P. 15972–15985.
6. Latour G., Echard J.P., Soulier B., Emond E., Vaiedelich S., Elias M. Structural and optical properties of wood and wood finishes studied using optical coherence tomography: application to an 18th century Italian violin // *Appl. Opt.* – 2009. – V. 48. – № 33. – P. 6485–6491.
7. Волынский М.А., Гуров И.П., Жукова Е.В., Левшина А.В., Маргарянц Н.Б., Семов А.А. Исследование трехмерной микроструктуры материалов на основе методов оптической когерентной томографии // *Фотография. Изображение. Документ.* – 2011. – Вып. 1. – № 1. – С.81–85.
8. Гуров И.П. Компьютерная фотоника: принципы, проблемы и перспективы // *Научно-технический вестник.* – СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 21. – С. 5–20.

Гуров Игорь Петрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

Жукова Екатерина Владимировна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zhukova-ifmo@mail.ru

Левшина Анна Викторовна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, l_a_v_sun@mail.ru