УДК 372.811

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор

© С. Г. Головина, канд. архит., доцент

© В. А. Норин, канд. техн. наук, доцент

© Ю. В. Сокол, старший преподаватель

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: bennor@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-128-135

© Yu. V. Pukharensko, Dr. Sci. Tech., Professor

© S. G. Golovina, PhD in Arch., Associate Professor

© V. A. Norin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Yu. V. Sokol, senior teacher

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: bennor@yandex.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ АРХИТЕКТУРНОГО ДЕКОРА

MODERN TECHNOLOGIES OF THREE-DIMENSIONAL SCANNING IN THE MANUFACTURE OF ARCHITECTURAL DÉCOR

Рассмотрены вопросы использования современных инновационных технологий трехмерного сканирования при изготовлении элементов фасадного декора из различных архитектурных материалов. Описаны достоинства и недостатки различных технологий изготовления изделий архитектурного декора. Показано, что технологии трехмерного сканирования не предполагают непосредственного контакта между прибором и поверхностью реставрируемого объекта, который может привести к дополнительным повреждениям объекта. Также нет необходимости прикасаться к исследуемым объектам. Для обеспечения процесса сканирования достаточно иметь доступ к объекту со всех сторон с целью получения максимально точной информации о его форме и размерах. При использовании трехмерного сканирования возможно в течение нескольких минут создать точную цифровую объемную копию объекта, которая используется для построения обмерных чертежей и получения физической копии воспроизводимого изделия на 3D-принтере. Описана методика проведения оптического сканирования элементов архитектурного декора.

Ключевые слова: изделия архитектурного декора, архитектурные материалы, трехмерное сканирование, реставрация архитектурного наследия.

The article is devoted to the use of modern innovative technologies of three-dimensional scanning in the manufacture of facade decoration elements from various architectural materials. Advantages and disadvantages of various technologies of manufacturing architectural décor products are described. It is shown that the three-dimensional scanning technology does not imply direct contact between the device and the surface of the restored object, which can lead to additional damage to the object. Another advantage of this technology is that there is no need to touch the objects under study. To ensure the scanning process, it is enough to have access to the object from all sides in order to obtain the most accurate information about its shape and size. When using three-dimensional scanning, it is possible to create an accurate digital three-dimensional copy of the object within a few minutes, which is used to build dimensional drawings and obtain a physical copy of the reproduced product on a 3D printer. This article describes the method of optical scanning of architectural décor elements.

Keywords: architectural décor products, architectural materials, three-dimensional scanning, restoration of architectural heritage.

При реконструкции жилых домов в Санкт-Петербурге прежде всего стремятся сохранить или восстановить гармонию композиции их фасадов, так как каждое здание рассматривается не только как отдельный объект, но и как часть исторической застройки. Облик реконструи-

руемого здания должен отвечать его характеру и вписываться в исторически сложившийся ландшафт Санкт-Петербурга.

При обследовании исторических фасадов зданий перед их реконструкцией, как правило, обнаруживается утрата ряда декоративных эле-

ментов или их искажение. Для восстановления прежнего вида архитектурно-декоративной работы фасада необходимо учитывать ее традиционные особенности [1].

При реставрации фасадов зданий для изготовления элементов архитектурного декора в каждом конкретном случае используются различные технологии и архитектурные материалы, такие как:

- обычная штукатурка «по месту»;
- гипс;
- архитектурный бетон;
- полимерный бетон;
- натуральный камень;
- стеклопластик;
- полиуретан;
- пенопласт.

Каждая технология изготовления изделий из этих материалов имеет свои достоинства и недостатки.

Штукатурный декор

Это старый традиционный способ, который популярен и сейчас. Однако выполнение декора по «месту» требует очень высокой квалификации штукатуров и весьма трудоемко.

Лепнина из гипса

При сложных ажурных формах декора воспроизводимые элементы изготавливаются методом отливки из гипса в матрицу, выполняемую по модели. Это сравнительно недорогая технология, основные затраты — это работа скульптора при изготовлении модели для матрицы и монтаж готовой детали. К недостаткам можно отнести большой вес изделия, сравнительно небольшую долговечность, обусловленную воздействием атмосферных явлений, и высокую стоимость.

Отливки из архитектурного бетона, фибробетона

Изделия из архитектурного бетона отличаются высокой прочностью и долговечностью [2, 3]. Однако большой вес декоративного бетона усложняет монтаж готового изделия, неблагоприятно влияя на прочность стен.

Изделия из природного камня

Природный камень использовался в архитектуре в течение столетий. Прочный и устойчивый к механическим повреждениям и выветриванию фасадный декор из натурального камня не подвержен влиянию времени. Недостатком при-

родного камня является его высокая стоимость, сложность обработки, значительно увеличивающая срок изготовления деталей. Сложность монтажа готового изделия еще больше увеличивает стоимость работ.

Архитектурный декор из стеклопластика

Этот способ изготовления фасадного декора используется редко. Обычно это пустотелые фасадные элементы на основе стекловолокна и эпоксидных составляющих. Достоинствами стеклопластика являются малый вес и возможность изготовления ажурных элементов. К недостаткам можно отнести его хрупкость при сильном механическом воздействии и абразивный износ (требуется защитное покрытие).

Изделия из пенопластов

Изделия из пенопластов обычно используются в интерьерном декоре. Однако для фасада подавляющее большинство из них не годится, так как под воздействием солнечных лучей, перепадов температур и осадков они быстро теряют внешний вид и разрушаются. Изделия из пенопласта для фасада производят путем заливки в специальные формы. Декор из пенопласта для фасада имеет незначительный вес, он прост в обработке, поэтому материал востребован у архитекторов. Однако пенопласт не обладает высокой прочностью и долговечностью.

При любом способе изготовления изделий фасадного декора предварительно необходимо провести архитектурные обмеры реставрируемых элементов, на основании которых выполняются обмерные чертежи. Этот этап технологии реставрации во многом определяет точность воспроизводимой физической копии.

В зависимости от сложности и размеров архитектурных деталей могут использоваться различные способы обмеров. Традиционный натурный метод обмеров предполагает непосредственный контакт между прибором и поверхностью объекта, что является крайне нежелательным, так как может привести к дополнительным повреждениям объекта [4]. Кроме того, чертежи при натурном способе обмеров весьма трудоемко изготавливать и они не дают полной информации о деталях орнамента, общем облике памятника архитектуры и его деталей. Поэтому появление технологии 3D-сканирования было воспринято в сообществе реставраторов с большим вооду-

шевлением, так как при 3D-сканировании нет необходимости перемещать исследуемые объекты и прикасаться к ним [5–7]. Для обеспечения процесса сканирования достаточно иметь доступ к объекту со всех сторон с целью получения максимально точной информации о его форме и размерах. При использовании трехмерного сканирования возможно в течение нескольких минут создать точную цифровую объемную копию объекта [8, 9].

В СПбГАСУ была отработана методика сканирования элементов архитектурного декора оптическим сканером *Artec Eva*, включающая два этапа: полевые и камеральные работы.

Полевые работы проводятся непосредственно на объекте и предполагают проведение самой съемки с использованием технологий трехмерного сканирования.

Для того чтобы приступить к процессу сканирования, необходимо подготовить сканер к работе. Для этого требуется подключить сканер *Artec Eva* к сети или к аккумулятору, затем через USB-порт подключиться к компьютеру, то есть напрямую к программному обеспечению *Artec Studio*, которое распознает оборудование. Индикатор, находящийся на корпусе сканера, при этом ненадолго загорается синим цветом, что является сигналом к загрузке сканера.

Сканер направляется на объект под прямым углом на расстоянии не менее 40 см, иначе сканирование может не осуществиться. Сканер в руках оператора должен перемещаться относительно объекта равномерно, без резких движений, в противном случае в будущей модели могут появиться так называемые «дыры», или пустоты, которые будут мешать на этапе создания 3D-модели. Слишком медленно перемещать сканер также не рекомендуется, так как при записи может появиться избыточная информация, которая займет на диске много памяти. Во время сканирования внимание оператора должно концентрироваться на изображении объекта на экране, а не на реальном объекте. Если объект имеет сложную форму или нет возможности с первого раза отсканировать его со всех сторон, необходимо сделать несколько сканов. Области сканирования выбираются таким образом, что-

бы впоследствии появилась возможность совместить их по соответствующим точкам¹.

После завершения сканирования объекта со всех ракурсов необходимо полученные данные обработать на компьютере. На монитор компьютера выводится определенное количество сканов. Их размер зависит от захватываемой площади, а качество — от точности передачи деталей объекта.

Завершая полевые работы, необходимо сохранить проект для дальнейшей камеральной обработки.

Камеральные работы выполняются в лаборатории с использованием специальных компьютерных программ. На данном этапе производится обработка полученных данных и составляется отчетная документация.

Вначале в компьютер загружается проект, созданный и сохраненный на этапе полевых работ.

Поскольку при сканировании в область сканирования всегда попадают лишние детали и элементы, то эти так называемые шумы должны быть удалены. Процедура удаления шумов находится во вкладке «Редактор» и осуществляется в режиме «Ластик». Для начала выбирается один из всех имеющихся сканов. *Artec Studio* имеет несколько режимов по ручному удалению шумов:

- «двумерное выделение», которое предназначено для удаления деталей среднего размера;
- «трехмерное выделение», используемое для удаления небольших деталей;
- «прямоугольное выделение», позволяющее выделить обширные прямоугольные участки;
- выделение «Лассо», предназначенное для выделения курсором произвольного контура на поверхности;
- «отсечение плоскостью» — режим, предназначенный для удаления опорных поверхностей.

На рис. 1 представлено изображение объекта с выделенной областью опорной поверхности.

Далее нажатием кнопки «Стереть» удаляется опорная поверхность.

Лишние шумы и детали удаляются при помощи команды «Двумерное выделение».

Описанная выше процедура по удалению опорной поверхности и шумов повторяется для всех полученных сканов поочередно.

¹ Документация к *Artec Studio*. URL: <http://docs.artec-group.com/as/11/ru/> (Дата обращения: 21.06.2018).

Рис. 1. Режим «Отсечение плоскостью». Выбор области опорной поверхности

Следующим этапом является сборка отредактированных сканов в 3D-модель. В Artec Studio для этого предусмотрена вкладка «Сборка».

Для начала выбираются два скана, необходимые для совмещения, они оба отображаются на рабочем экране приложения Artec Studio. Их положение относительно друг друга должно быть удобным для совмещения (рис. 2). Три общие точки у двух сканов — это оптимальное количество для осуществления данной операции.

После нанесения общих точек на сканы нажатием кнопки Enter на экране появляется совмещенный единый скан на основе двух ранее выбранных (рис. 3).

Совмещение полученного единого скана с последующим проводится аналогичным образом (рис. 4). В конце каждой сшивки обязательным шагом является сохранение всех данных.

Очередной этап редактирования — удаление полигонального шума и придание будущей 3D-модели четкости изображения.

Практически всегда на объекте есть определенные места на поверхности, которые невозможно отсканировать. В таких случаях используется функция «Глобальная регистрация», которая находится во вкладке «Команды». В ней выбираются и сохраняются параметры «Texture_and_Geometry». Кнопкой «Применить» убирается полигональный шум, устраняются шероховатости и погрешности².

Далее начинается процесс «склейки» модели, который представляет собой создание полигональной 3D-модели объекта. Существует

три режима склейки: быстрая, гладкая и четкая (см. таблицу).

Для получения наиболее точной 3D-модели выбирают четкую склейку (рис. 5), задав следующие значения для параметров:

- *resolution* (в переводе с англ. «разрешение») — чем меньше значение, тем четче форма. Значение 0,5;

- *fill-holes* (в переводе с англ. «заполнить дыры») — данный параметр отвечает за заполнение «дырок» в реконструируемой модели, может быть задан несколькими значениями, а именно: *by_radius*, *waterlight*, *manually*. В данной методике была выбрана опция *waterlight*, которая заделывает все отверстия в модели.

Следующим этапом работы является размещение модели в координатной плоскости.

При этом рекомендуется действовать по следующему алгоритму:

1. Нажать на вкладку «Редактор».

Рис. 2. Выбор общих точек двух сканов

Рис. 3. Два совмещенных скана

² Документация к Artec Studio. URL: <http://docs.artec-group.com/as/11/ru/> (Дата обращения: 21.06.2018).

Рис. 4. Итоговый совмещенный скан

2. Выбрать координатную плоскость, на которой будет размещена 3D-модель. В данной работе выбрана XOY.

3. Отметить три точки на опоре (рис. 6).

4. Инвертировать направление осей координат: Z для плоскости XOY.

5. Нажать кнопку «Применить», чтобы сохранить результат.

В итоге на экран выводится 3D-модель (рис. 7).

Заключительным этапом работы (в случае необходимости) может быть текстурирование — наложение текстуры из отдельных кадров на получившуюся модель (рис. 8).

При этом нужно указать, какой метод текстурирования предпочтителен: построение карты треугольников или текстурного атласа. Здесь надо иметь в виду, что карта треугольников строится быстрее, но используется она для быстрого просмотра получаемой текстуры. Текстурный атлас применим для финального экспорта. При-

меня тот или иной метод, перед текстурированием важно правильно упростить сетку и задать необходимые параметры. Для карты треугольников можно задать размеры треугольника в пикселях (по умолчанию 10), но увеличение размера потребует и больше памяти: ОЗУ и видео. Для обоих методов задается размер результирующей текстуры.

В случае если на получившейся модели все еще будут наблюдаться какие-то лишние «штрихи» (например, часть подставки), то можно вновь воспользоваться средствами редактирования.

Полученная цифровая копия реставрируемого изделия используется для построения обмерных чертежей и для получения физической копии [10] воспроизводимого изделия на 3D-принтере. Современные технологии 3D-печати дают возможность эффективно воспроизводить сложные художественные формы элементов фасадов, что особенно актуально при реконструкции старых зданий, которые имеют статусы архитектурных памятников. В этом случае становится возможным изготавливать сложные элементы архитектурного декора без привлечения высококвалифицированных архитекторов-реставраторов.

По типу используемых материалов 3D-принтеры делятся:

- на порошковые;
- гипсовые;
- фотополимерные;
- восковые.

В последнее время за рубежом в 3D-печати фасадного декора используется инновационный экологичный биопластик.

Технология трехмерной печати постоянно развивается, появляются новые принтеры, которые имеют уникальный принцип работы. Также

Сравнение режимов склейки

Программы	Быстрая склейка	Гладкая склейка	Четкая склейка
	Быстрый результат для больших объемов данных	Большие массивы шумных данных с отсутствующими участками	Любые сканы с мелкими деталями и тонкими гранями
Artec Eva	Разрешение не менее 0,4 мм		
Artec Spider	Разрешение не менее 0,1 мм		
Artec L	Разрешение не менее 0,5 мм		
Особенности	Создает относительно шумные поверхности	Более сглаженные результаты. Относительно медленный	Более высокий уровень детализации

Рис. 5. Четкая склейка

Рис. 7. Итоговая 3D-модель отсканированного объекта

Рис. 6. Задание опорной плоскости тремя точками

Рис. 8. Трехмерная модель с наложением текстуры

ведутся активные разработки расходных материалов, и с каждым годом их список становится все длиннее.

В современных 3D-принтерах применяется две основные технологии печати: струйная и лазерная.

Принцип работы 3D-принтера зависит от его типа и от применяемых расходных материалов — это может быть³:

- лазерная печать;
- спекание;
- послойное плавление и наклеивание пластика;
- ламинирование;
- плавление порошка;
- полимеризация фотополимерного пластика путем воздействия на него лазером;
- послойное склеивание расходного материала;
- вакуумная электронно-лучевая плавка порошка.

³ Виды 3D-принтеров и трехмерной печати. URL: <http://www.techno-guide.ru/informatsionnye-tehnologii/3d-tehnologii/vidy-3d-printerov-i-trekhmernoj-pechati.html>.

Заключение

Технологии трехмерного сканирования в последнее время, безусловно, становятся востребованными за счет высокой скорости обмерных работ, точности и детализации съемки. Получаемая трехмерная модель является источником получения привычных двухмерных чертежей, материалом для визуализации и для получения физических моделей при трехмерной печати^{4,5,6,7,8}.

Однако в настоящее время не существует универсальной методики сканирования элементов архитектурного декора. Работа с каждым объектом является творческим процессом, в результате которого находятся различные технические решения, приемы, накапливаются специальные

⁴ Как экспортировать в STL 3D-модели из разных программ. URL: <https://www.cubicprints.ru/blog/post/export-3d-modeli-v-STL-format> (Дата обращения: 19.06.2018).

⁵ Фотополимерный 3D-принтер. URL: <https://3dtool.ru/stati/gipsovyj-3d-printer/> (Дата обращения: 24.06.2018).

⁶ Восковые 3D-принтеры. URL: <http://3d.globatek.ru/3d-printers/vosk/> (Дата обращения: 19.06.2018).

⁷ Гипсовый 3D-принтер. URL: <https://3dtool.ru/stati/gipsovyj-3d-printer/> (Дата обращения: 18.06.2018).

⁸ Первый опенсорс порошковый 3D-принтер. URL: <https://habr.com/post/148989/> (Дата обращения: 16.06.2018).

знания, позволяющие выработать оптимальную методику для получения качественной модели. Поэтому публикация результатов накопленного положительного опыта в данной области, как мы полагаем, позволит специалистам быстрее освоить методики оцифровки элементов архитектурного декора.

Библиографический список

1. Тихонов Г. Ф. Модернизация жилых зданий. М.: Стройиздат, 1986. 192 с.
2. Пухаренко Ю. В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6582> (дата обращения: 15.07.2018).
3. Пухаренко Ю. В., Норин В. А., Крылова М. К. Производство железобетонных изделий: моделирование производственных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1 (66). С. 97–104.
4. Золотова Е. В. Современные архитектурные обмеры объектов недвижимости. М.: Архитектура-С, 2009. 112 с.
5. Bruno F., Bruno S., De Sensi G., Luchi M. L., Mancuso S., Muzzupappa M. From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition // Journal of Cultural Heritage. 2010. № 11 (1). Pp. 42–49.
6. Pavlidis G., Koutsoudis A., Arnaoutoglou F., Tsioukas V., Chamzas C. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage // Journal of Cultural Heritage. 2007. № 8. Pp. 93–98.
7. Tucci G., Cini D., Nobile A. Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2011. Vol. XXXVIII-5/W16. Pp. 413–420.
8. Шахмеева Е. А., Норин В. А. Новейшие информационные технологии в учебном процессе строительных вузов // Опыт создания и реализации технологических инноваций в образовании: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 27 окт. 2017 г.) / редкол.: Л. А. Абрамова [и др.]. Чебоксары: ИД «Среда», 2017. С. 160–164.
9. Норин В. А., Гулбаев А. Х. Анализ российского рынка 3D-сканеров и нормативной базы технологии лазерного сканирования. Проблемы выбора лазерного 3D-сканера // Научные исследования: теория, методика и практика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 21 мая 2017 г.). В 2 т. Т. 1 / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. С. 320–323.

10. Тишкин В. О. Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования // Науч.-техн. вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 87–92. URL: <http://ntv.ifmo.ru/file/article/352.pdf> (дата обращения: 20.06.2018).

References

1. Tikhonov G. F. *Modernizatsiya zhilykh zdaniy* [Modernization of residential buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 192 p.
2. Pukhareno Yu. V. *Restavratsiya i stroitel'stvo: potentsial fibroarmirovannykh materialov i izdeliy* [Restoration and construction: potential of fiber-reinforced materials and products]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 4. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6582> (Accessed: 15.07.2018).
3. Pukhareno Yu. V., Norin V. A., Krylova M. K. *Proizvodstvo zhelezobetonnykh izdeliy: modelirovanie proizvodstvennykh protsessov* [Production of concrete products: production process modeling]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 1 (66), pp. 97–104.
4. Zolotova E. V. *Sovremennye arkhitekturnye obmery ob'ektov nedvizhimosti* [Modern architectural measurements of real estate property objects]. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2009, 112 p.
5. Bruno F., et al. From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*, 2010, no. 11 (1), pp. 42–49.
6. Pavlidis G., et al. Methods for 3D digitization of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2007, no. 8, pp. 93–98.
7. Tucci G., Cini D., Nobile A. Effective 3D digitization of archaeological artifacts for interactive virtual museum. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011, vol. XXXVIII-5/W16, pp. 413–420.
8. Shakhmееva E. A., Norin V. A. *Noveyshie informatsionnye tekhnologii v uchebnom protsesse stroitel'nykh vuzov* [The latest information technologies in educational process of construction of high schools]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Opyt sozdaniya i realizatsii tekhnologicheskikh innovatsiy v obrazovanii: materialy»* [Proc. of the Int. sci.-prakt. conf. "Experience of creation and implementation of technological innovations in education"]. Cheboksary, October 27, 2017. Sreda Publ., 2017, pp. 160–164.
9. Norin V. A., Gulbaev A. Kh. *Analiz rossiyskogo rynka 3D-skanerov i normativnoy bazy tekhnologii lazernogo skanirovaniya. Problemy vybora lazernogo 3D-skanera*

[Analysis of the Russian market of 3D scanners and the normative base of laser scanning technology. The problem of choosing 3D laser scanner]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Nauchnye issledovaniya: teoriya, metodika i praktika»* [Proc. of the Int. sci.-prakt. conf. "Scientific researches: theory, methodology and practice"]. Cheboksary, May 21, 2017. Interaktiv Plyus Publ., 2017, pp. 320–323.

10. Tishkin V. O. *Metodika sborki i obrabotki dannykh, poluchennykh v protsesse 3D-skanirovaniya* [Methods of collection and processing of data obtained in the process of 3D-scanning]. *Nauch.-tekhn. vestnik Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* – Scientific-technical bulletin of St. Petersburg state University of information technologies, mechanics and optics, 2011, no. 1 (71), pp. 87–92. Available at: <http://ntv.ifmo.ru/file/article/352.pdf> (Accessed: 20.06.2018).