

V. N. Ivanov
JSC NPO «Vavilov's State Optical Institute»

METHOD OF INCREASING THE MAXIMUM LASING ENERGY OF A RAMAN LASER EMITTING AT A WAVELENGTH SAFE FOR VISION

The author investigated Raman self-conversion laser, designed for rangefinder, operating at eye safe diapason at $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$. The laser is consist of on the active element from a potassium gadolinium tungsten crystal $\text{KGd(WO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$ and a crystal passive laser Q-switcher made from YAG : V^{3+} crystal, pumped by a pulsed Xe-lamp placed in a silvered tubular reflector. The laser generation was beginning at the wavelength of $\lambda = 1.351 \mu\text{m}$ and was converted inside the active element at the first Roman Stokes component $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$. The cross-section of the stimulated radiation at $\lambda = 1.351 \mu\text{m}$ is four times lower than the cross-section of the stimulated radiation at the wavelength $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$, so the competition of the amplification processes at these two wavelengths has a determining value on the energy of the laser generation. In the passive Q-switched mode, the maximum values obtained for four different sizes of active elements of KGW : Nd^{3+} . The value of the obtained maximum generation energy was proportional to the volume of the active element (as far as the author knows, it was noticed for the first time) and was determined by the gain coefficient, at which a significant removal of inversion at a competing wavelength $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$ began. The method reducing competing processes of the inversion removal at $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$ was proposed.

Raman, self-conversion, laser, eye safe

УДК 681.786.23:725.945.025.4

А. А. Галушкин, С. Л. Гонобоблева
СПбФ АРАН

А. А. Журавлев, В. А. Парфенов, Ю. В. Филатов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение 3D-сканирования и аддитивных технологий для документирования и создания физических копий эстампажей из собрания СПбФ АРАН

Рассмотрено создание 3D-архива и физических копий эстампажей. Предложен оригинальный способ реставрации эстампажей, основанный на создании специальной матрицы, получаемой в результате комбинированного использования техники 3D-сканирования и аддитивных технологий. Для оцифровки эстампажа использовался оптический 3D-сканер, работа которого основана на использовании структурированного света. Подробно рассмотрена методика компьютерной обработки полученной при сканировании 3D-модели, необходимая для ее загрузки в микропроцессор 3D-принтера. Для создания реплики эстампажа и реставрационной матрицы использовались лазерные 3D-принтеры, принцип действия которых основан на технологии лазерной стереолитографии. Проведена оценка точности репродуцирования эстампажа сравнением его 3D-модели с 3D-моделями реплик, полученных с помощью 3D-принтеров. Проведенные экспериментальные исследования доказали принципиальную возможность создания 3D-архивов и репродуцирования эстампажей. Предложенный подход к сохранению данного вида памятников истории и культуры является принципиально новым в практике отечественной музейной и архивной работы.

**Лазерное 3D-сканирование, 3D-печать, эстампаж, репродуцирование, памятники
истории и культуры**

На протяжении XIX–XX вв. техника эстампажа являлась наиболее достоверным и распространенным способом документирования (фиксации) и сохранения находящихся в труднодоступных местах памятников, в первую очередь таких,

которым угрожает полное уничтожение в результате стихийных бедствий, войн, актов вандализма и разрушающих факторов окружающей среды. Эстампаж – это изготовленный из бумаги (иногда ткани) прямой оттиск рельефного изображения

(надписи, рисунка). Эстампажированием фиксировали эпитафии, высеченные на камнях, или петроглифы (наскальная рельефная живопись). Первые подобные изделия относят к моменту изобретения бумаги в Китае (II в. н. э.), считается, что тогда и были получены первые оттиски с плоских каменных рельефов.

В самом общем виде процесс изготовления эстампажа представляет собой следующую последовательность действий. На хорошо очищенный рельеф (как правило, каменный) накладывают рыхлую увлажненную бумагу. Затем специальными щетками бумагу простукивают в тех местах, где имеется рельеф, который нужно зафиксировать. В результате этого бумага вдавливаясь в углубления рельефа. Когда она высыхает, на нее можно нанести водорастворимую краску с целью улучшения видимости рельефа. Техника эстампажей широко применялась для фиксации памятников древнегреческого и римского наследия, в районах Междуречья, а также в Малой Азии и на территории Армении [1]. В нашей стране ее использовали в основном для фиксации петроглифов в Карелии, Крыму, а также в отдельных районах Сибири и Забайкалья.

Бумага и ткань – материалы, сложные в хранении, а бумажные рельефы, которыми по сути дела являются эстампажи, тем более. Эстампажи, которые в настоящее время находятся в архивах, чаще всего имеют плохое состояние сохранности. Реставрация эстампажей осложняется наличием рельефного изображения, которое в процессе восстановления не должно быть утрачено, а значит, применение традиционного метода прессования невозможно в полном объеме. Несмотря на то что эстампаж – копия памятника, его реставрация и сохранение важны как с точки зрения того, что оригинал может уже быть полностью утрачен, так и потому, что он несет в себе информацию памятника и информацию о памятнике, которая с течением времени может меняться, исчезать, трансформироваться.

В этой ситуации на повестке дня стоит вопрос о необходимости поиска новых высокоэффективных методов документирования и реставрации эстампажей. Одним из возможных и весьма перспективных подходов к решению этих задач является использование техники лазерного и оптического 3D-сканирования. Главным достоинством 3D-сканирования при его использовании в области сохранения культурно-исторического насле-

дия является возможность высокоточной фиксации размеров и объемного изображения памятников [2]. Это выгодно отличает данную технику от традиционно используемой для фиксации памятников цифровой фотографической съемки. Другим существенным достоинством 3D-сканирования является то, что создаваемые в процессе съемки компьютерные 3D-модели могут использоваться для создания высокоточных физических копий объектов, что открывает широкие возможности для экспонирования эстампажей. Речь идет о том, что реплики (и исходные 3D-модели) можно использовать для проведения выставок (в том числе передвижных), обмена коллекциями между музеями из разных стран, и т. д.

Примеры подобного рода работ известны из научной литературы. В частности, речь идет о европейском проекте EAGLE (Информационные технологии для эпиграфики и культурного наследия), в рамках которого проводились исследования в области цифровой эпиграфики (сюда относятся и эстампажи, снятые с надписей) [3]. Результаты деятельности по оцифровке коллекций, полученные разными научными коллективами, представлены на глобальном портале EUROPEANA, где содержатся цифровые копии различных объектов мирового наследия. Основные задачи, которые ставят перед собой европейские специалисты по оцифровке эстампажей, это создание баз данных открытого доступа и физических копий. Отдельной задачей является компьютерная реконструкция утраченных или частично утраченных буквенных рельефов в надписях [4].

Несмотря на очевидную перспективность применения 3D-сканирования эстампажей, в практике отечественной музейной и архивной работы такой подход до сих пор не использовался. Вместе с тем такого рода объекты имеются во многих российских музеях и архивах. Большие коллекции эстампажей хранятся в фондах Института истории материальной культуры, Музее антропологии и этнографии, Институте истории, Институте восточных рукописей РАН. В Санкт-Петербургском филиале архива РАН (СПбФ АРАН) также имеется коллекция эстампажей, которая прежде принадлежала Русскому археологическому институту в Константинополе (РАИК) – учебно-научному заведению, целью которого было изучение памятников византийской древности. Этот институт просуществовал с 1895 по 1914 гг., а после начала Первой мировой войны его коллекции оказались в разных музеях и учреждениях [5].

В марте 2017 г. авторы настоящей статьи предложили на заседании Ученого совета СПбФ АРАН идею создания электронного 3D-архива и физических копий всех эстампажей из его коллекции. Помимо документирования как такового это дало бы возможность изучения и восстановления надписей, подчас уже утраченных в оригинале. Предварительные исследования по 3D-оцифровке эстампажей были проведены в июне 2017 г. и доказали принципиальную возможность реализации данной идеи [6]. В конце 2017 г. часть коллекции эстампажей бывшего РАИК перед принятием на хранение в СПбФ АРАН была обеспылена, проверена на наличие биозагрязнений и упакована в специальные короба в Лаборатории консервации и реставрации документов.

Кроме того, авторы предложили современный оригинальный метод реставрации эстампажей с помощью специальной матрицы, которая также может быть создана в результате 3D-сканирования. Основная идея создания матрицы состоит в том, что ее поверхность является инвертированным объемным изображением реставрируемого эстампажа, а следовательно, она повторяет рельеф того памятника, с которого когда-то был изготовлен эстампаж. В процессе реставрации матрица выполняет роль своеобразной «опорной» поверхности, которая может быть использована в качестве индивидуального реставрационного стола для каждого эстампажа. Это позволяет восполнять утраты бумаги не только на плоских участках, но даже в местах рельефного изображения. В результате этого реконструируемые в процессе реставрации участки поверхности будут точно воспроизводить исходное изображение эстампажа.

Данная статья посвящена исследованию возможности создания физических копий эстампажей, а также указанной реставрационной матрицы при помощи 3D-сканирования и аддитивных технологий.

В ходе эксперимента поверхность одного из эстампажей была оцифрована при помощи 3D-сканирования. Объектом исследования служил модельный образец эстампажа, выполненный в СПбФ АРАН. Сканирование осуществлялось по методике, ранее разработанной авторами применительно к скульптурным памятникам [7], но с учетом специфики регистрируемого объекта в данном случае имело особенности. Для съемки была выбрана та сторона листа бумаги, которая при изготовлении эстампажа накладывалась на

поверхность с высеченным текстом. Это имеет принципиальное значение, поскольку именно эта сторона бумаги наиболее точно передает мелкие детали рельефа того текста, который зафиксировал эстампаж. В процессе сканирования эстампаж аккуратно раскладывался на ровной твердой поверхности и жестко фиксировался при помощи плоских зажимов. Это делалось для того, чтобы исключить изгибы и «вспучивание» бумаги.

Сканирование осуществлялось при помощи сканера RVPRO 5M («RangeVision», Россия). По принципу действия данный сканер относится к системам, действие которых основано на использовании структурированного света [8]. Согласно заявленным производителем характеристикам, в зависимости от расстояния до объекта данный сканер обеспечивает разрешение в диапазоне 50...350 мкм.

Полученные при сканировании сканы, представляющие собой так называемые облака точек (отдельные фрагменты объемного изображения поверхности эстампажа), собирались в единую 3D-модель. На рис. 1 приведен фрагмент изображения на экране компьютера полученной 3D-модели.

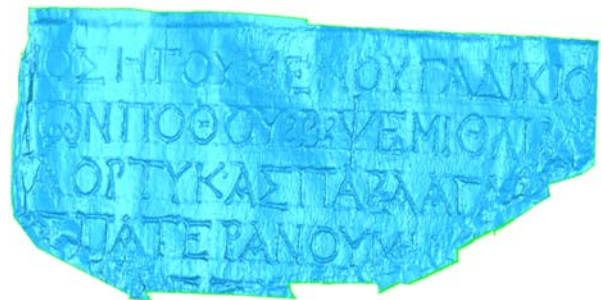


Рис. 1

Для создания реплики и реставрационной матрицы эстампажа потребовалась существенная доработка 3D-модели. Дело в том, что для репродуцирования объектов с использованием аддитивных технологий (а именно такой подход предполагалось использовать для создания реплики) требуется так называемая замкнутая 3D-модель. Однако та модель, которая была получена в результате сканирования эстампажа, относится к категории 2.5D-моделей, поскольку не имеет «толщины». По сути при сканировании были лишь зафиксированы объемные свойства поверхности бумажного листа, но не отсканированы его боковые «стенки». Следовательно, данные об объеме отсканированного объекта в такой модели отсутствуют. Это хорошо видно из рис. 2, на котором приведен фрагмент изображения поверх-

ности модели эстампажа. Однако это вполне решаемая проблема, так как в практике компьютерной обработки данных, получаемых в процессе 3D-сканирования, существует несколько стандартных способов придания «объема» плоским объектам. Кратко опишем использованную методику.

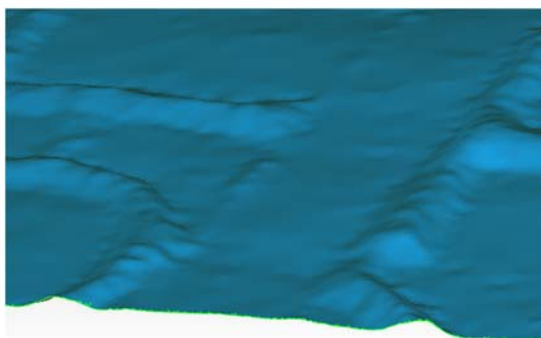


Рис. 2

Оцифрованная в процессе сканирования эстампажа поверхность, представлявшая собой компьютерный файл в формате OBJ, была импортирована в программу-редактор 3D-графики Autodesk 3DSMax. Далее в режиме редактирования полигонов была выбрана вся поверхность целиком и к ней применена команда экструзии [9]. Это действие означает, что из каждого полигонального элемента, отвечающего за отдельный участок поверхности отсканированного объекта, вытягивается новый полигон, расстояние и направление вытягивания которого задаются программистом «вручную». В результате выполнения этих действий изначально «плоская» (не имеющая физической толщины) поверхность становится замкнутой и приобретает объем (рис. 3).

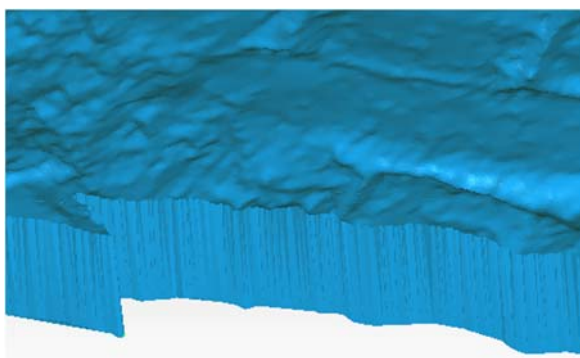


Рис. 3

При необходимости заданный объем можно изменять (например, для уменьшения необходимого количества материала в процессе 3D-печати). Для удобства дальнейшей работы с преобразованной указанным способом моделью можно использовать так называемые геометрические примитивы (например, параллелепипед или ци-

линдр). Тогда поверхность эстампажа в модели, полученной на предыдущем шаге описываемых действий, может быть совмещена с одним из таких примитивов. В результате можно, например, получить параллелепипед, одна из граней которого будет содержать «оттиск» ранее полученной модели. После этого необходимо применить модификатор булевой операции [10]. В итоге получается 3D-модель, имеющая удобную с практической точки зрения геометрическую форму, но что принципиально важно – в ней по-прежнему имеется поверхность, которая в точности повторяет рельеф поверхности эстампажа (рис. 4).

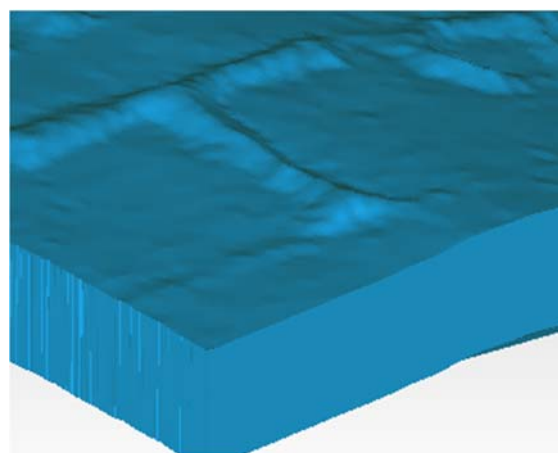


Рис. 4

Полученная вышеуказанным образом 3D-модель может быть непосредственно использована для создания реплик эстампов с целью их экспонирования. Однако для создания реставрационной матрицы необходимо получить инвертированную (зеркально отраженную) поверхность. Такая поверхность также может быть получена методами компьютерной обработки, но в отличие от предыдущего случая перед процедурой экструзии поверхности необходимо предварительно применить операцию переориентировки нормалей [11]. Поясним, о чем идет речь. В 3D-графике каждый полигон, из которого состоит 3D-модель, представляет собой треугольник. Этот треугольник помимо координат вершин, задающих его размер и положение в пространстве, характеризуется еще и нормалью. Нормаль – это вектор, перпендикулярный плоскости, образуемой его вершинами. Этот вектор определяет, какая из ее сторон является лицевой (наружной) – именно в эту сторону он и направлен [12]. Для пояснения изложенного на рис. 5 показаны поверхности эстампажа с нормальями, ориентированными в противоположные стороны.

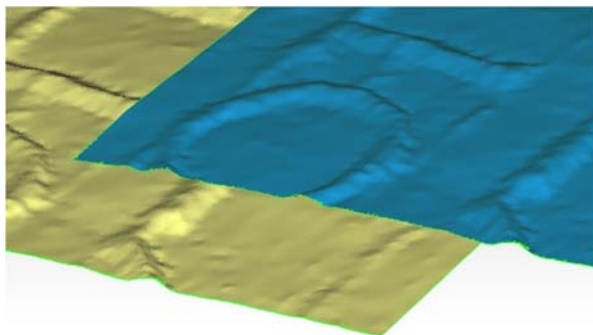


Рис. 5

Инвертировав нормаль и повторив описанные ранее операции по преобразованию 3D-модели, авторы получили инвертированную модель, которая может быть использована при изготовлении матрицы для реставрации эстампажа.

В ходе исследований изготавливались опытные образцы реставрационной матрицы с использованием упомянутых аддитивных технологий. Среди современных методов быстрого прототипирования одним из наиболее перспективных является метод 3D-печати по технологии SLA (от англ. Stereolithography) [13]. При использовании данной технологии репродуцирование объектов происходит в результате послойного нанесения и отверждения фотополимера под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения, источником которого может быть как лазер, так и галогенная лампа. Каждый слой фотополимера фиксированной толщины подвергается УФ-засветке при помощи специальной маски, которая определяет сечение «вырабатываемого» объекта. Эта маска может создаваться при помощи специального сканатора, который осуществляет развертку лазерного излучения в плоскости с помощью системы высокоточных зеркал. В другом случае для формирования маски используется оптическая проекционная система, основанная на использовании DLP-технологии (Digital Light Processing). Основными достоинствами 3D-печати по технологии SLA является высокая степень детализации поверхности получаемых объектов, скорость и точность.

Для создания реставрационной матрицы в работе были использованы два различных 3D-принтера, работающих по SLA-технологии: iSLA-350 (компания «Shining», Китай) и Formlabs 1+ (компания «Formlabs», США). 3D-принтер iSLA-350 позволяет создавать объекты размером до $350 \times 350 \times 350$ мм (при минимальной толщине слоя фотополимера 100 мкм и рабочей

длине волны излучения лазера 355 нм). Создаваемые на принтере Formlabs 1+ объекты ограничены размерами $125 \times 125 \times 165$ мм (при минимальной толщине слоя фотополимера 25 мкм).

Для отработки технологии создания реставрационной матрицы были отпечатаны небольшие фрагменты инвертированной поверхности эстампажа, один из которых представлен на рис. 6.



Рис. 6

Для оценки точности соответствия инвертированной поверхности эстампажа образцы матрицы, отпечатанные на 3D-принтере, были отсканированы с помощью того же самого сканера RV PRO 5M. Точность репродуцирования оценивалась сравнением 3D-моделей эстампажа и матрицы. Для этого использовалась методика сравнения 3D-моделей, описанная в [14]. Она основана на одновременной загрузке двух 3D-моделей одного и того же объекта в специальную компьютерную программу GeomagicStudio. В результате «наложения» моделей друг на друга данная программа позволяет количественно оценить их различия. В данном случае максимальное значение среднеквадратичного отклонения (СКО) поверхностей 3D-моделей экспериментальных образцов матрицы от поверхности 3D-модели исходного эстампажа составляло: 37 мкм при печати на принтере iSLA-350 (рис. 7) и 230 мкм – для принтера Formlabs 1+ (рис. 8).

Нужно отметить, что при печати на 3D-принтере Formlabs 1+, помимо большего значения СКО, отмечалось еще одно отличие матрицы от исходной поверхности эстампажа. Высота рельефа отдельных участков некоторых букв получилась примерно на 100 мкм меньше по сравнению с высотой тех же участков букв на самом эстампаже. Вероятно, это может быть связано с проблемами локального отверждения фотополимера

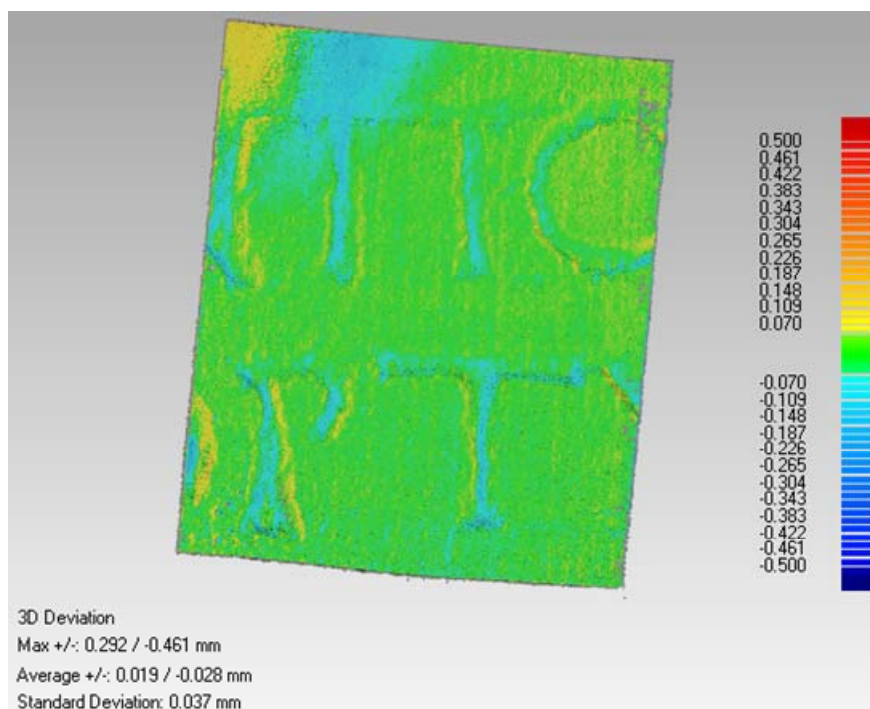


Рис. 7

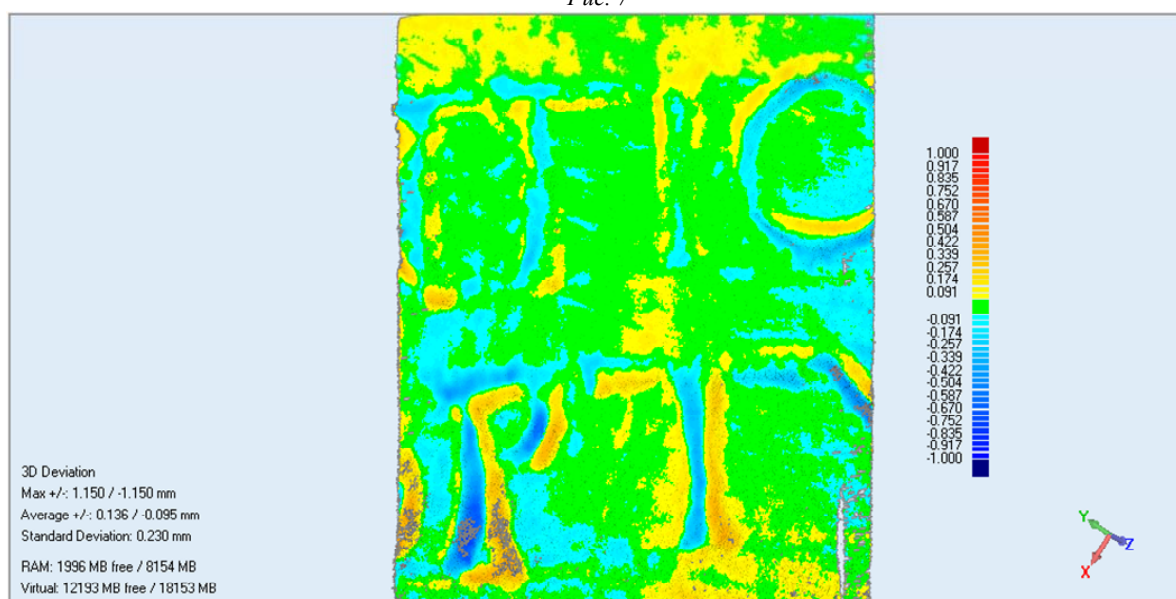


Рис. 8

в процессе печати. Стоит также заметить, что положение некоторых букв при печати сместилось в горизонтальном направлении относительно их положения на оригинальной поверхности (смещение составляет около 200...300 мкм). Одним из возможных объяснений этого эффекта может быть неточность позиционирования лазерного пучка, обеспечиваемого сканатором принтера (принтер находится в эксплуатации уже несколько лет, и многие его элементы выработали свой ресурс).

Однако при печати на принтере Formlabs 1+ был отмечен еще один дефект реплик эстампжей. Речь идет о возникновении неровностей (ло-

кальных «вспучиваний»), которые особенно отчетливо видны на тыльной стороне образцов, которая должна была получиться абсолютно плоской (рис. 9). Появление таких дефектов может быть связано с тем, что при работе данного принтера используется фотополимер на основе акриловых смол, имеющих большую хрупкость. В отличие от Formlabs 1+ в принтере iSLA-350 используется фотополимер на основе эпоксидных смол, которые по своим свойствам близки к механическим характеристикам термопластиков (они имеют большую механическую упругость). По-видимому, разные материалы, используемые в



Рис. 9

этих двух принтерах, имеют индивидуальные особенности отвердевания, что по-разному влияет на качество печати.

Следует также заметить, что на поверхности всех образцов матриц при печати на обоих принтерах образовывалась микроструктура в виде неглубоких (высотой около 0.01 мм) тонких (шириной около 0.01...0.02 мм) полосок, пересекающих друг друга крест-накрест. По-видимому, по такой траектории происходило перемещение лазерного пучка, используемого для отвердевания фотопо-

лимера. Однако величина этих микродефектов столь мала, что не может оказать влияния на точность восполнения утрат в процессе реставрации эстампажей.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы. 3D-оцифровка и получение высокоточных физических копий эстампажей в результате комбинированного использования техники 3D-сканирования и аддитивных технологий является вполне реальной задачей. Что касается создания реставрационной матрицы, то в работе была экспериментально доказана принципиальная возможность технической реализации этой идеи. Поэтому следующим этапом исследований должна стать разработка технологии и методик реставрации эстампажей и других документальных объектов на бумажной основе с рельефным текстом или изображениями.

Авторы выражают благодарность Н. А. Павличенко, предоставившей для проведения экспериментов, изготовленный ею модельный образец эстампажа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пиотровский Б. Б. Ванское царство (Урарту) // М.: Изд-во Вост. лит., 1959. 260 с.
2. Фрейдин А. Я., Парфенов В. А. Трехмерное лазерное сканирование и его применение для съемки архитектурных сооружений и реставрации памятников // Оптический журн. 2007. Т. 74, № 8. С. 44–49.
3. Information Technologies for Epigraphy and Cultural Heritage // Proc. of the First International Conf. of the Information Technologies for Epigraphy and Digital Cultural Heritage in the Ancient World. Paris: Sapienza Università, 2014.
4. Barmpoutis A., Bozia E., Wagman R. S. A novel framework for 3D reconstruction and analysis of ancient inscriptions // Machine Vision and Applications. 2010. Vol. 21. P. 989–998.
5. Басаргина Е. Ю. Русский археологический институт в Константинополе. Очерки истории. СПб: Дмитрий Буланин, 1999. 246 с.
6. Создание архива 3D-моделей эстампажей из собрания СПбФ АРАН (исследования по разработке технологии их реставрации) / В. А. Парфенов, А. А. Галушкин, С. Л. Гонобоблева, А. Д. Власов, Н. М. Доведова, Т. С. Ткаченко, Л. М. Швиль // Сб. тез. VII Междунар. науч.-практ. семинара «ЛИКИ ПАМЯТИ». Ереван: Ин-т древних рукописей имени св. Месропа Маштоца, 2017. С. 74–75.
7. Парфенов В. А. Лазерное 3D-сканирование скульптурных памятников: метод. указания. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 28 с.
8. Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F. State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation // Sensors. 2009. Vol. 9. P. 568–601.
9. Миловская О. С. Дизайн архитектуры и интерьеров в 3DSmax. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 240 с.
10. Онлайн-самоучитель по моделированию в 3DSMax // Иллюстрированный самоучитель по 3ds max 7. URL: http://3d.demiart.ru/book/3D-Max-7/Glava_03/Index05.htm (дата обращения: 22.02.2018).
11. Siltanen P., Woodward C. Normal orientation methods for 3D offset curves, sweep surfaces and skinning // Computer graphics forum. 1992. № 11 (3). P. 449–457.
12. Погорелов А. И. Дифференциальная геометрия. 6-е изд. М.: Наука, 1974. 176 с.
13. Аддитивные технологии в машиностроении / сост.: М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. М.: Изд-во ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
14. Применение лазерного 3D-сканирования для мониторинга скульптурных памятников / В. А. Парфенов, О. В. Франк-Каменецкая, И. А. Леонова, С. Л. Мошкина, Е. Е. Мошников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 3. С. 73–79.

A. A. Galushkin, S. L. Gonobobleva
SPbF ARAN

A. A. Zhuravlev, V. A. Parfenov, Yu. V. Filatov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE USE OF 3D-SCANNING AND ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR DOCUMENTATION AND CREATING PHYSICAL COPIES OF PRINTS FROM THE COLLECTION OF SPBF ARAN

The paper describes the creation of a 3D archive and physical copies of prints. A way of restoring prints is proposed, based on creation of a special matrix that is obtained by a combined use of 3D scanning technology and additive technologies. Print sampling was performed using an optical 3D-scanner operating on the basis of structured light. The technique of computer processing, necessary for loading the 3D model, obtained as a result of 3D-scanning, into the 3D-printer microprocessor is discussed in detail. The creation of a print replica and a restoration matrix was performed by using the laser 3D printers employing the technology of laser stereolithography. The print reproducing accuracy was estimated by comparing its 3D model with 3D model of the replica. The experiments proved the basic capability of creating 3D archives and prints reproducing.

3D archive, print reproducing, 3D-scanning, additive technology

УДК 3937.525

В. Ю. Венедиктов, К. Н. Гаврильева, А. В. Горелая, А. А. Севрюгин, Е. В. Шубенкова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Д. И. Дмитриев, А. Д. Цветков
Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения

Исследование распространения оптического вихря по укрытой атмосферной трассе

Рассмотрена динамика распространения оптического вихря через искусственную укрытую атмосферную трассу. Продемонстрирован метод генерации оптических пучков с ненулевым орбитальным моментом с помощью жидко-кристаллического модулятора света HoloEye LC-2002, проведены испытания различных методов регистрации оптических вихрей, в том числе с помощью интерферометров сдвига различных конфигураций и датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Определено расстояние, при котором происходит распад структуры вихревого пучка для технически возможной в условиях стенда апертуры принимающей интерференционной системы. Представлены результаты экспериментальных исследований размеров пучков на различных дистанциях. Проведены расчеты угла расходимости пучка и сингулярности оптического вихря в зависимости от длины атмосферной трассы. Рассмотрено влияние турбулентной среды на способность принимающей системы зарегистрировать оптический вихрь.

Оптический вихрь, атмосферная трасса, угол расходимости, топологический заряд, турбулентность, сингулярность

В настоящее время установлено, что вихревые, а также близкие к ним по форме винтовые или спиралевидные структурные элементы проявляются не только на молекулярном уровне, но и в глобальных процессах, которые происходят как в атмосфере, так и в океане и космосе. В последние годы внимание исследователей привлекают

световые поля с винтовыми возмущениями волнового фронта. Возмущения такого рода обуславливают вихревой характер распространения света, а следовательно, позволяют говорить о существовании оптических вихрей.

В силу важных аспектов фундаментального и прикладного характера изучение оптических вих-