

с нарушенной адгезией твердых тел // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии. 2003. Вып. 1. С. 10–17.

6. Теплякова А. В. Дифракция на цилиндрической однородности с несимметричной структурой в твердой среде // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборо-

строение и информационные технологии. 2006. Вып. 1. С. 23–28.

7. Berenger J. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comput. Phys. 1994. Т. 114, № 2. С. 185–200.

B. Ch. Ee

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INFLUENCE OF NONRIGID CONTACT ON A SCATTERING ACOUSTIC FIELD GENERATED BY SOLID CYLINDRICAL INCLUSION

Diffraction of a plane ultrasonic wave incident normally to a cylindrical solid defect in a solid isotropic space are considered. In a sector at the boundary between the defect and the solid isotropic space there is nonrigid contact. Boundary conditions are given for a boundary with a rigid contact and for a boundary with a nonrigid contact. Finite element method is used. For the created model numerical values of material parameters, geometrical sizes of the considered area are presented. The boundary conditions and initial values, are described. The solution for various states of the defect-isotropic space boundary and for different sizes of the sector with a non-rigid bond, are given. The plots of the displacement amplitude of the scattered wave are plotted. It is shown that, for small size of the sector with broken adhesion, a plane ultrasonic wave «does not notice» a sector with a soft bond. As the size of the sector increases, various resonant phenomena appear.

Diffraction, cylindrical defect, finite element method, nonrigid connection

УДК 621.373.826

С. В. Титов, В. А. Парфенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Технико-технологические аспекты лазерной очистки книг и документов на бумажной основе

Рассматриваются технико-технологические аспекты лазерной очистки бумаги. Предложен и экспериментально проверен метод количественной оценки эффективности лазерной очистки, основанный на анализе цифрового оптического изображения исследуемого участка книги или документа до и после обработки излучением лазера. Для получения количественных данных осуществляется компьютерная обработка цифрового изображения и измеряется его RGB-характеристика. Помимо этого предложен метод избирательной лазерной очистки книг и документов, позволяющий решить проблему удаления текста и графики с поверхности бумаги в процессе ее обработки излучением лазера. Для решения данной задачи предложено использовать высокоточные сканирующие системы, что позволяет исключить из зоны лазерной обработки те участки документов, которые содержат типографскую краску и чернила. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность предложенных технических решений, что позволяет рекомендовать их для выполнения практических реставрационных работ.

Лазерная очистка, реставрация, книги, документы, бумага, избирательная очистка, RGB-характеристика, Nd:YAG-лазер, фоксинги

Рассматриваются технико-технологические аспекты лазерной очистки книг и документов на бумажной основе. В последние годы лазерные технологии все более активно используются в задачах сохранения памятников истории и куль-

туры [1]–[3]. Одной из основных областей применения лазеров в данной сфере является очистка поверхности памятников от природных наслоений и антропогенных загрязнений. По сравнению с традиционно используемыми в реставрации

методами механической и химической очистки технология лазерной очистки имеет ряд важных преимуществ, поскольку позволяет обеспечить высокую эффективность и «деликатность» удаления загрязнений [1], [2]. В настоящее время наиболее отработана лазерная реставрация памятников из камня и металлов. Что касается очистки книг и документов, то данная область применений лазеров все еще находится в стадии экспериментальных исследований [4]–[10].

Данная статья посвящена решению двух актуальных задач, связанных с лазерной очисткой книг и документов. Одна из них состоит в разработке методов объективной количественной оценки эффективности очистки. Актуальность этой задачи связана с тем, что в настоящее время в отечественной реставрационной практике почти не используются современные аналитические приборные методы контроля. При проведении работ по очистке документов и книг специалисты-реставраторы обычно оценивают качество проведенной работы, руководствуясь соображениями художественного и эстетического характера, базирующимися исключительно на визуальной оценке. Но при работе с таким современным инструментарием, как лазер, подобный подход является недопустимым. Это ставит на повестку дня вопрос о разработке сравнительно простых и не требующих использования дорогостоящего оборудования объективных методов контроля лазерной очистки, которые могут использоваться реставраторами, не имеющими специального физико-технического образования.

Другой актуальной задачей является контроль самого процесса лазерной очистки бумаги. Дело в том, что под воздействием лазерного излучения наряду с удалением загрязнений может происходить удаление типографской краски и чернил, составляющих текст и графические изображения. Это является одной из причин, сдерживающих внедрение технологии лазерной очистки в область реставрации книг и документов. Для решения этой проблемы требуется разработка технологии избирательной очистки, которая позволяет исключить из зоны воздействия лазера те участки документов, которые содержат типографскую краску и чернила.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований авторов, посвященных решению указанных задач.

Количественная оценка результатов лазерной очистки бумаги. Для количественной оценки эффективности работ по лазерной очистке бу-

маги в данной статье предложено использовать методику, основанную на определении разницы цветовой интенсивности загрязненной области до и после ее обработки излучением лазера. Для этого предлагается использовать сравнение значений усредненной RGB-характеристики (red, green, blue) массива пикселей цифрового оптического изображения поверхности бумаги в границах загрязненного участка до и после очистки. Для упрощения представления этих данных целесообразно свести полученную RGB-характеристику для данного конкретного изображения к обобщенному параметру эквивалентной интенсивности, который может быть вычислен с помощью формулы, используемой для перехода от цветовой модели RGB к градации серого [11], [12]:

$$Y = 0.299R + 0.597G + 0.114B. \quad (1)$$

Коэффициенты для каждого компонента (R, G и B) в (1) характеризуют различную чувствительность зрения человека к соответствующим цветам. Данная формула используется для преобразования цветного изображения в черно-белое в телевизионных и дисплейных технологиях.

Следует заметить, что данный метод оценки применим только для таких изображений бумаги, которые были зарегистрированы до и после очистки при одном и том же уровне освещенности и одинаковой цветности. Поэтому для получения цифрового оптического изображения поверхности бумаги целесообразно использовать оптический сканер высокого разрешения.

В случае если при вычислениях по (1) изменения показателя эквивалентной интенсивности в градации серого (в дальнейшем будем обозначаться эту величину символом ΔY) будет принимать положительное значение, это равносильно изменению в яркую сторону цветовых компонентов, составляющих его RGB-характеристику. Следовательно, в этом случае можно говорить об освещении анализируемого участка изображения и интерпретировать параметр ΔY как показатель эффективности проведенной очистки. И наоборот, отрицательное значение изменения данного показателя будет означать потемнение обрабатываемой области. Оно может быть вызвано изменением пигментации обработанного участка вследствие химических реакций или его обугливанием под воздействием лазерного излучения.

В качестве примера рассмотрим экспериментальные результаты, представленные на рис. 1, 2. В ходе работы проводились эксперименты по лазерной очистке бумаги, пораженной фоксинговыми пятнами. Фоксинги – это специфичный вид загрязнений бумажной поверхности, представляющий собой пятна ржаво-красного оттенка неправильной формы, возникающие на бумаге, возраст которой превосходит 20–30 лет [13]. Удаление фоксингов осуществлялось при помощи импульсного твердотельного Nd:YAG-лазера (модель LS-2131M производства «LOTIS ТП», Беларусь). При измерении RGB-характеристики использовался пакет программ Adobe Photoshop CS5. Анализируемый участок выбирался строго в границах загрязненного пятна. Как видно из рис. 1, анализируемое изображение имеет ряд характерных для фоксингов особенностей: яркое пятно в центре, а вокруг него – более светлый ореол. Анализ производился в двух точках цифрового фотографического изображения: в пределах яркого центрально пятна (точка 1) и в пределах более светлого ореола (точка 2).

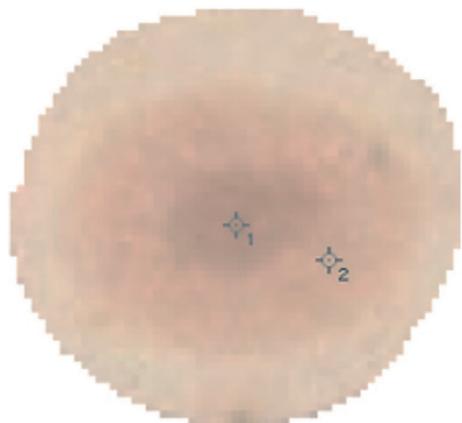


Рис. 1



Рис. 2

Значения цветовых компонентов RGB-характеристики представлены в таблице.

Анализируемые цветовые компоненты	В центре пятна		В пределах ореола	
	до очистки	после очистки	до очистки	после очистки
R	185	207	220	226
G	150	182	193	211
B	128	162	166	195

Для пятна, представленного на рис. 1 и 2, были получены следующие данные по осветлению центральной области фоксингового пятна в результате ее лазерной обработки:

$$Y = 185 \cdot 0.299 + 150 \cdot 0.587 + 128 \cdot 0.114 = 157.957$$

– эквивалентная интенсивность центра пятна до очистки;

$$Y = 207 \cdot 0.299 + 182 \cdot 0.587 + 162 \cdot 0.114 = 187.195$$

– эквивалентная интенсивность центра пятна после очистки;

$$\Delta Y = 29.238$$

– оценка степени осветления анализируемого участка в центре пятна.

Оценка степени осветления периферийной области:

$$Y = 201 \cdot 0.299 + 174 \cdot 0.587 + 147 \cdot 0.114 = 178.995$$

– эквивалентная интенсивность ореола пятна до очистки;

$$Y = 212 \cdot 0.299 + 192 \cdot 0.587 + 167 \cdot 0.114 = 195.13$$

– эквивалентная интенсивность ореола пятна после очистки;

$$\Delta Y = 16.135$$

– оценка осветления анализируемого участка в пределах ореола пятна.

Как было отмечено, изменение значения коэффициента ΔY означает осветление анализируемого участка бумаги. Таким образом, можно утверждать, что центральное пятно и ореол вокруг него были в значительной степени осветлены. Этот вывод хорошо согласуется и с визуальной оценкой полученных результатов. Аналогичные результаты были получены при лазерной обработке большого количества фоксинговых пятен, что позволяет говорить о том, что предложенный метод оценки эффективности лазерной очистки бумаги дает объективные данные о результатах лазерной очистки, а следовательно, может быть рекомендован для практического использования в реставрации книг и документов.

Избирательная лазерная очистка бумаги. Одной из актуальных проблем, связанных с использованием лазерной очистки книг и документов на бумажной основе как повседневного инструмента реставрации, является тот факт, что в процессе лазерной обработки наряду с удалением

загрязнений происходит удаление типографской краски и чернил, составляющих текст и графику документа. Дальнейшее успешное развитие лазерной реставрации книг и документов требует разработки метода избирательной лазерной очистки, который позволяет исключить из зоны воздействия лазера участки, содержащие текст и графику.

Для решения задачи избирательной лазерной очистки книг и документов авторами было предложено использовать лазерную установку, оснащенную высокоскоростной сканирующей системой. Поскольку современные системы сканирования позволяют осуществлять высокоточное перемещение лазерного пучка в заданной плоскости, основная идея использования сканатора заключается в управлении траекторией движения луча лазера таким образом, чтобы вывести из зоны воздействия лазерного излучения те участки бумаги, которые содержат типографский текст и/или чернила. Именно в этом случае можно говорить об избирательной очистке.

Для проверки возможности практической реализации данной идеи для экспериментов был выбран твердотельный иттербиевый волоконный лазер (модель IPG-YLPM 30W производства «IPG Photonics», США). Выбор данного лазера был связан со следующими обстоятельствами. Как было показано в [14], все основные виды бумаги имеют высокое значение коэффициента отражения вблизи длины волны 1 мкм. Поскольку лазер YLPM имеет длину волны 1063 нм, работа с ним позволяет минимизировать риск повреждения бумаги. С другой стороны, как было показано в [7], [14], для очистки бумаги целесообразно использовать режим многоимпульсной лазерной микрообработки, который достигается при высоких частотах повторения малоэнергетических импульсов. Это в еще большей степени уменьшает риск повреждения бумаги. В экспериментах использовался лазерный комплекс F Mark, предназначенный для промышленной маркировки материалов, в состав которого входит указанный лазер IPG-YLPM 30W и сканирующая система Raylase Miniscan II-10 с фокусирующим объективом Linos Ronar (с длиной фокуса 163 мм).

На начальном этапе работы проводились эксперименты с использованием модельных образцов, представлявших собой листы современной офисной бумаги с имитацией загрязнений (для этого использовалась угольная пыль). В ходе экспериментов выходные параметры лазера варьиро-

вались для того, чтобы выбрать такие режимы лазерной обработки, при которых происходит эффективное удаление поверхностных загрязнений без повреждения бумаги.

В ходе экспериментов искусственно загрязненный лист бумаги обрабатывался сфокусированным пучком лазера (размер пятна в фокусе – 60 мкм). Сканирование осуществлялось односторонним горизонтальным перемещением пучка лазера со скоростью 500 мм/с при помощи системы из двух оптических зеркал и гальванометрического сканатора. Смещение лазерного пучка при каждом новом проходе по листу бумаги составляло 50 мкм. Энергия импульса лазерного излучения варьировалась в диапазоне 25...250 мкДж с шагом 25 мкДж, а частота повторения импульсов – в диапазоне 10...55 кГц с шагом 5 кГц. В итоге были выбраны следующие выходные параметры: энергия импульса – 150 мкДж; частота повторения импульсов – 35 кГц.

Следующим этапом работы была проверка возможности избирательной очистки листов бумаги с напечатанным на принтере текстом. Для этого в программу управления системы сканирования загружалось инвертированное векторное изображение обрабатываемого участка с текстом (далее будем называть его изображение-маска), что позволяло обеспечить такую траекторию движения лазерного пучка, при которой из зоны обработки исключался типографский шрифт. Создание изображения-маски осуществлялась кадрированием исходного изображения и его преобразованием с помощью программы CorelDraw X7.

При подготовке к проведению работ по избирательной лазерной очистке необходимо обеспечить точное совмещение обрабатываемой области листа бумаги с рабочим полем сканирования лазерного пучка, чтобы исключить повреждения текстовой и графической информации. Для этого совмещались специальные реперные метки, предварительно нанесенные на обрабатываемый участок бумаги, и так называемая габаритная рамка. Реперные метки и габаритная рамка – это общепринятая терминология в задачах лазерной маркировки. Реперные метки – это знаки, которые при проведении работ по лазерной маркировке наносят на поверхность обрабатываемого объекта для правильной ориентации габаритной рамки в плоскости и ее совмещения с рабочей зоной лазера. Что касается габаритной рамки, то этим термином называют изображение, которое формиру-

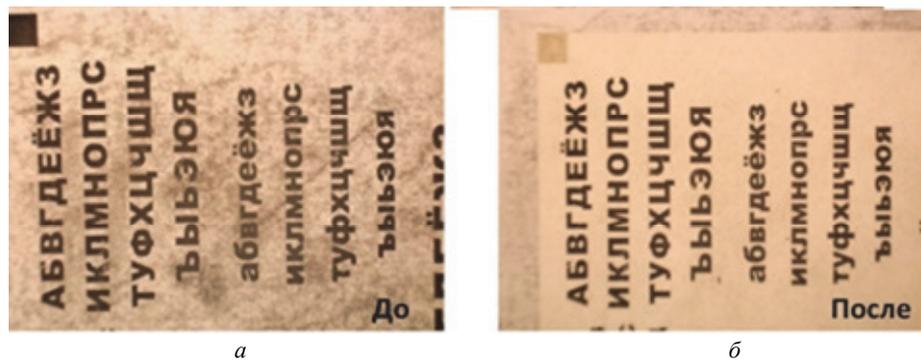


Рис. 3

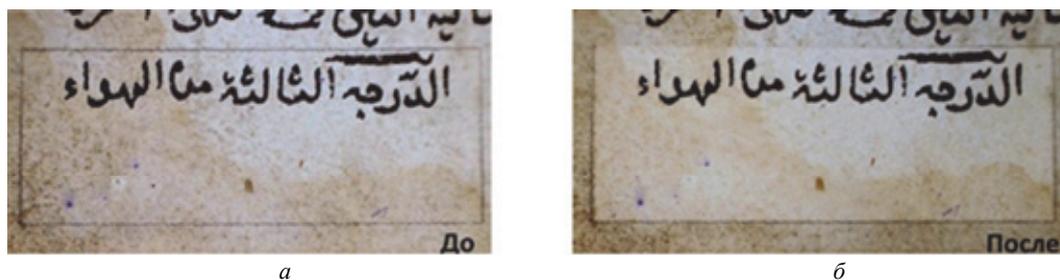


Рис. 4

ется на поверхности обрабатываемого лазером объекта в результате сканирования пучка вспомогательного (так называемого пилотного) лазера, работающего в видимой области спектра. Габаритная рамка визуализирует границы области, в пределах которой в процессе маркировки осуществляется перемещение луча основного (инфракрасного) лазера. В рассматриваемом случае ни о какой маркировке речи не было, но для очистки бумаги использовалась стандартное оборудование для лазерной маркировки и общепринятые в данной области техники приемы.

Результаты лазерной обработки листа бумаги с текстом представлены на рис. 3. Как видно из этих фотографий (*а* – лист бумаги в исходном состоянии, *б* – после очистки лазером), загрязнения были удалены, но типографский текст остался без изменений. Это подтверждает эффективность предложенного технического решения.

На заключительном этапе работы были проведены эксперименты по избирательной очистке подлинных исторических документов. Для этого была использована страница арабской книги начала XX в. Для очистки была выбрана небольшая область листа с текстом. Границы области, которую предполагалось очистить и по которой было произведено позиционирование рабочей зоны лазера, была размечена при помощи тонкого карандаша с использованием специальной маски, изготовленной по технологии лазерной резки из акрилового стекла.

Далее документ был отсканирован при помощи офисного сканера для создания изображения-маски, с помощью которого предполагалось произвести очистку. Изображение было кадрировано в соответствии с зоной обработки, обозначенной карандашной рамкой при помощи маски из акрилового стекла, после чего с использованием программы CorelDRAW X7 оно было преобразовано в инвертированное векторное изображение-маску, по которому в итоге и производилась очистка.

После завершения всех подготовительных технологических этапов необходимо было осуществить точное позиционирование выбранной на листе бумаги зоны обработки относительно рабочей зоны лазера, задаваемой с помощью указанной габаритной рамки. Зона обработки представляла собой нарисованный карандашом прямоугольник (рис. 4, *а*), который выполнял роль упомянутых реперных меток. Для этого использовалось изображение-маска, которое загружали в микропроцессор сканатора. Размеры этого изображения предварительно были отмасштабированы в программе CorelDRAW X7 для соответствия действительным размерам обрабатываемого участка документа.

Для очистки выбранного фрагмента книжного листа использовались те же параметры лазерного излучения, которые были использованы при работе с модельными образцами бумаги. Как видно из рис. 4, *б*, в ходе эксперимента удалось успешно осуществить избирательную очистку – лист кни-

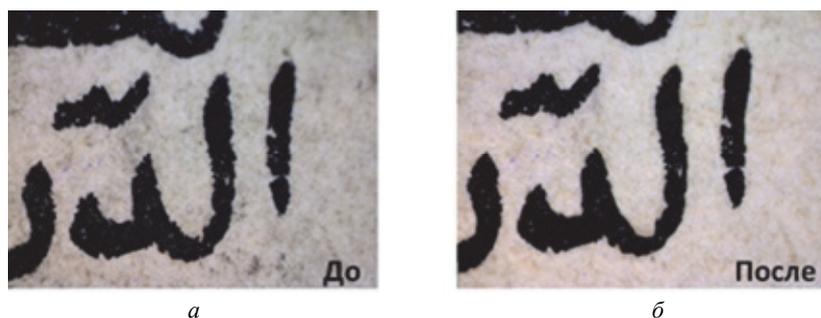


Рис. 5

ги был очищен от поверхностных загрязнений, но при этом в зоне лазерной обработки был сохранен исходный текст.

Анализ результатов очистки оценивался визуально. На рис. 5 представлена фотография фрагмента листа книги с типографским текстом до (а) и после очистки (б), на которой хорошо видно, что в процессе лазерной обработки действительно сохранена целостность и читаемость букв типографского текста.

Таким образом, в результате проведенных исследований был предложен и экспериментально проверен метод количественной оценки эффективности лазерной очистки бумаги, основанный на измерении ее RGB-характеристики. Другим важным результатом работы является разработка метода избирательной лазерной очистки книг и документов. Оба метода показали свою эффективность и могут быть рекомендованы для практического применения при использовании технологии лазерной очистки в реставрации книжных памятников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cooper M., Larson J. Laser Cleaning in Conservation: An Introduction. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 98 с.
2. Парфенов В. А. Лазерная очистка памятников истории и культуры. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
3. Асмус Дж., Парфенов В. А. Лазерные и оптоэлектронные методы документирования, анализа и создания копий произведений искусства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 168 с.
4. Removal of fungi and stains from paper substrates using laser cleaning strategies / T. R. Friberg, V. Zafirooulos, Y. Petrakis, C. Fotakis // Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA I). Vienna, 1997. P. 79–82.
5. Near-UV, visible and IR pulsed laser light interaction with cellulose / J. Kolar, M. Strlic, S. Pentzien, W. Kautek // Appl. Phys. 2000. Vol. 71. P. 87–90.
6. Парфенов В. А. Лазерная очистка бумаги и пергамента // Основы реставрации западноевропейского переплета и сохранности фотодокументов. М.: Центр книги ВГБИЛ им. М. И. Рудомино, 2008. 128 с. (С. 37–43).
7. Мокрушин Ю. М., Парфенов В. А. Использование лазера на парах меди для реставрации произведений искусства // Оптич. журн. 2008. № 7. С. 88–90.
8. ATR-FTIR and FT Raman Spectroscopy and Laser Cleaning of Old Paper Samples with Foxings / N. N. Brandt, A. Y. Chikishev, K. Itoh, N. L. Rebrikova // Laser Physics. 2009. № 3. P. 483–492.
9. Лазерные технологии в очистке документов на бумажной основе: теоретические и методические аспекты / А. А. Галушкин, В. А. Парфенов, Л. Г. Левашова, Т. С. Ткаченко // Исследования в консервации культурного наследия: материалы Междунар. науч.-метод. конф. М.: Индрик, 2012. Вып. 3. С. 61–65.
10. Laser removal of mold and foxing stains from paper artifacts: pre-liminary investigation / D. Ciofini, I. Osticioli, S. Micheli, L. Montalbano, S. Siano // SPIE Proceedings. 2013. Vol. 9065. Doi:10.1117/12.2052820.
11. Порев В. Н. Компьютерная графика: учеб. пособие. СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2002. 432 с.
12. Gomes J., Velho L. Image Processing for Computer Graphics. Berlin: Springer Science+Business Media, 1997. 351 с.
13. Choi S. Foxings on Paper: A Literature Review // American Institute for Conservation. 2007. Vol. 46, № 1. P. 137–152.
14. Геращенко А. Н., Геращенко М. Д., Парфенов В. А. Технология реставрации книг лазерным лучом // Вестн. библиотечной ассамблеи Евразии. 2013. № 2. С. 68–73.

S. V. Titov, V. A. Parfenov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF LASER CLEANING OF BOOKS AND DOCUMENTS WITH A PAPER SUBSTRATE

The work is devoted to laser cleaning of books and documents. Technical and technological aspects of laser paper cleaning are considered. A method for the quantitative evaluation of the efficiency of laser cleaning based on the analysis of the digital optical image of the section of a book or document under study before and after its treatment by laser radiation is proposed and experimentally tested. To obtain quantitative data, the digital image is computer processed and its RGB-characteristic is measured. In addition, the article proposes a method of selective laser cleaning of books and documents that allows solving the problem of removing text and graphics from the paper surface in the process of its processing with laser radiation. To solve this problem, it is suggested to use high-precision scanning systems, which makes it possible to exclude from the laser processing area those parts of documents that contain printing paints and inks. The results of the carried out experimental studies confirmed the high efficiency of the proposed technical solutions, which allows them to be recommended for performing practical restoration works.

Laser cleaning, restoration, books, documentation, paper, selective purification, RGB-characteristic, Nd: YAG laser, foxing

УДК 620.179.16

К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Волновые процессы в мелкослоистой среде

Рассмотрен вопрос о распространении упругих волн в мелкослоистой среде «сталь-графит». Исследовано распространение продольной волны в мелкослоистой среде с однородными граничными условиями параллельно слоям различной толщины. Выведено и решено относительно волнового числа новое дисперсионное уравнение с ранее не учитываемыми поправками для определения скорости распространения продольной волны в мелкослоистой среде. Полученное уравнение используется применительно к задачам нахождения основных физико-механических характеристик среды. Получено выражение для скорости продольной волны в мелкослоистой среде путем замены тригонометрических функций их аргументами. Проанализированы и сопоставлены с результатами, полученными ранее в журнальных статьях и монографиях, графические зависимости эффективных скоростей волн сжатия от относительной толщины слоев. Расчеты проводились для общей толщины слоя «сталь-графит», равной 1 мм, на частоте ультразвука 1 МГц.

Дисперсионное уравнение, упругие волны, волновое число, мелкослоистая среда, скорость распространения

Одним из важнейших направлений неразрушающего контроля качества материалов, деталей, изделий и конструкций является структуроскопия, заключающаяся в контроле физико-механических свойств исследуемых материалов. Контроль физико-механических характеристик акустическими методами контроля основан на аналитических связях измеренных акустических параметров с оцениваемыми свойствами материала. При четкой аналитической связи контролируемое свойство может быть определено с высокой точностью. Так,

все три упругих постоянных материала (модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона) однозначно определяются по измеренным значениям скоростей распространения продольной и поперечной волн. Мелкослоистые среды, изготовление которых несложно, а свойства могут быть очень разнообразны (анизотропия скоростей распространения и поглощений как для волн сжатия, так и для волн сдвига), представляют практический интерес в акустике (проблемы виброизоляции, ультраакустика) и сейсмологии.