



РЕГИСТРАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ЗАСВЕТКИ ОТ ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЙ ЖГУТ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ ЯРКОСТИ*

*С.М. Аракелян¹, В.Л. Евстигнеев², М.А. Казарян³, М.Н. Герке¹,
А.Ф. Галкин¹, С.В. Жирнова¹, А.В. Осипов¹,
Г.А. Евстюнин⁴, Е.Л. Шаманская¹*

¹«Владимирский государственный университет Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
д. 87, ул. Горького, Владимир, 600000, Россия
тел.: +7(4922)47-98-47; e-mail: arak@vlsu.ru

²АО «Научный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»
д. 95, Волоколамское ш., Москва, 125371, Россия
тел.: +7(495)491-17-11; e-mail: yarustovskaya@yandex.ru

³Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
д. 53, Ленинский просп., Москва, 119991, Россия
тел.: +7(499)132-64-32; e-mail: kazarmishik@yahoo.com

⁴ООО «Новые технологии лазерного термоупрочнения»
оф. 8, д. 4, ул. Песочная, Владимир, 600023, Россия
тел.: +7(4922)45-90-52; e-mail: lh1t33@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.071-085

Заключение совета рецензентов: 25.04.18 Заключение совета экспертов: 30.05.18 Принято к публикации: 09.10.18

В статье рассматривались модельные/тестовые эксперименты по лазерному термоупрочнению с регистрацией динамики модификации поверхности материала в реальном масштабе времени с использованием лазерного проекционного микроскопа (монитора) в геометрии «pump-probe». Упрочнение материалов с помощью лазерного излучения, а также размерная обработка по сравнению с традиционными методами намного экологичнее, так как происходит очень быстро, почти без выбросов вредных веществ. А возможность наблюдения поверхности в момент процесса упрочнения позволяет улучшать качество обрабатываемых изделий. С помощью лазерного проекционного микроскопа можно выявить момент появления переходной области, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с веществом, проследить за динамикой ее расширения, регистрировать возникновение теплового фронта, фронта плавления, окисных фронтов, что является актуальным при процессах термообработки. Важность и эффективность методов диагностики с использованием лазерного проекционного микроскопа для изучения различных динамических процессов при взаимодействии лазерного излучения с веществом подтверждается большим числом публикаций. В данной работе проведена модернизация лазерного проекционного микроскопа с включением в зондирующий канал оптического жгута.

*Аракелян С.М., Евстигнеев В.Л., Казарян М.А., Герке М.Н., Галкин А.Ф., Жирнова С.В., Осипов А.В., Евстюнин Г.А., Шаманская Е.Л. Регистрация динамических процессов лазерного термоупрочнения поверхности изделий в реальном масштабе времени в условиях засветки от лазерного факела при передаче оптического изображения через оптический жгут с помощью лазерного усилителя яркости // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;31-36:71-85.



Выявлены базовые физические принципы работы полученной системы и возникающие при этом проблемы, а также перспективы их преодоления в различных условиях конкретных процессов лазерного термоупрочнения, в том числе, с помощью компьютерной симуляции для поиска оптимальных оптических схем и режимов. Обсуждались проблемы с глубиной резкости для получаемого изображения через оптическое волокно/оптический жгут при регистрации таких динамических процессов и способы их решения путем выбора соответствующей оптической схемы. Анализ проводился и на основе компьютерного моделирования. Эти вопросы важны при реализации различных режимов термоупрочнения в экспериментах с однопучковым и многопучковым излучением силового лазера, воздействующим на объект при соответствующей настройке лазерного монитора в зондирующем канале.

Ключевые слова: лазерное термоупрочнение; динамические процессы; лазерный проекционный микроскоп; регистрация в реальном масштабе времени; глубина резкости изображения.

DETECTION OF DYNAMIC PROCESSES FOR LASER THERMOSTRENGTHENING OF THE MATERIAL SURFACE IN A REAL-TIME SCALE UNDER ILLUMINATION FROM LASER PLUME IN THE TRANSMISSION CHANNEL OF OPTICAL IMAGES VIA OPTICAL FIBER HARNESS USING A LASER BRIGHTNESS AMPLIFIER

*S.M. Arakelyan¹, V.L. Evstigneev², M.A. Kazaryan³, M.N. Gerke¹, A.F. Galkin¹,
S.V. Zhirnova¹, A.V. Osipov¹, G.A. Evstyunin³, E.L. Shamanskaya¹*

¹Vladimir state University Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs
87 Gorky Str., Vladimir, 600000, Russia
tel.: +7 (4922) 47 98 47, e-mail: arak@vlsu.ru

²JSC Scientific Center of Laser Systems and Complexes "Astrophysics"
95 Volokolamsk drive, Moscow, 125371, Russia
tel.: +7 (495) 491 17 11, e-mail: yarustovskaya@yandex.ru

³Physical Institute P.N. Lebedev Academy of Sciences
53 Leninsky Av., Moscow, 119991, Russia
tel.: +7(499)132-64-32, e-mail: kazarmishik@yahoo.com

⁴Company "New technologies of laser thermal hardening"
of. 8, 4 Pesochnaya Str., Vladimir, 600023, Russia
tel.: +7 (4922) 45 90 52, e-mail: lhit33@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.31-36.071-085

Referred 25 April 2018 Received in revised form 30 May 2018 Accepted 9 October 2018

The article deals with model/test experiments on laser thermal hardening with the registration of the dynamics of the material surface modification in real time using a laser projection microscope (monitor) in the geometry of "pump-probe". Hardening of materials by laser radiation, as well as dimensional processing compared to traditional methods is much more environmentally friendly because it happens very quickly and almost without emissions of harmful substances. And the possibility of observing the surface at the time of the hardening process can improve the quality of processed products. With the help of a laser projection microscope, it is possible to detect the moment of appearance of the transition region arising from the interaction of laser radiation with matter, to monitor the dynamics of its expansion, to register the appearance of the thermal front, the melting front, oxide fronts which is relevant in the heat treatment processes. A large number of publications are devoted to such methods and their modifications which confirms the importance and effectiveness of diagnostic methods using laser projection microscope to study various dynamic processes in the interaction of laser radiation with matter. In this work, the modernization of laser projection microscope with inclusion in the probing channel of optical harness is carried out. The basic physical principles of the obtained system and the existing problems, as well as the prospects of their overcoming in various conditions of specific processes of laser thermal hardening, including the use of computer simulation to find the optimal optical circuits and modes, are revealed. Depth-of-field problems are discussed for the resulting image through an optical fiber/optical bundle when recording such dynamic processes and how to overcome them by choosing the appropriate optical scheme. The analysis is also carried out on the basis of computer modeling. These issues are important in the implementation of various thermal hardening regimes in experiments with single- and multi-beam radiation of a power laser affecting the object at the appropriate setting of the laser monitor in the probing channel.

Keywords: laser thermostrengthening; dynamic processes; laser projection microscope; detection in a real-time scale; depth of the field image.



Сергей Мартиросович Аракелян
Sergei Arakelian

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики и прикладной математики Владимирского государственного университета им. А.Г и Н.Г. Столетовых.

Образование: Ереванский государственный университет (1971 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 300.

h-index15

ORCID: 0000-0003-1692-7356

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Chairman of Department of Physics and Applied Mathematics.

Education: Yerevan State University, 1971.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 300.



Светлана Викторовна Жирнова
Svetlana Zhirnova

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета.

Образование: Владимирский государственный университет (2005 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение.

Публикации: 29.

РИНЦ 1, Scopus 1;

ORCID: 0000-0002-7953-9353

Information about the author: Senior Lecturer at the Department of Physics and Applied Mathematics of Vladimir State University.

Education: Vladimir State University, 2005.

Research interests: Physics of Lasers and Applications.

Publications: 29.



Мишик Айразатович
Казарян
Mishik Kazaryan

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1970 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 600.

h-index 9, Scopus 9, РИНЦ 10, WoS 9;

ORCID: 0000-0002-7087-3419

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 600.



Елена Леонидовна Шаманская
Elena Shamanskaya

Сведения об авторе: старший преподаватель кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета.

Образование: Владимирский государственный университет (2005 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение.

Публикации: 23.

РИНЦ 1, Scopus 1;

ORCID: 0000-0002-9691-3853

Information about the author: Senior Lecturer of the Department of Physics and Applied Mathematics of Vladimir State University.

Education: Vladimir State University, 2005.

Research interests: physics of lasers and applications.

Publications: 23.



Аркадий Федорович Галкин
Arkadii Galkin

Сведения об авторе: профессор кафедры общей и прикладной физики Владимирского государственного университета.

Образование: Московский энергетический институт (1971 г.).

Область научных интересов: физика лазеров; низкотемпературная плазма.

Публикации: более 100.

Хирша 6;

ORCID: 0000-0002-6272-8270

Information about the author: Professor of the Department of General and Applied Physics of Vladimir State University.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1971.

Research interests: lasers, law temperature plasma.

Publications: more than 100.





Григорий Анатольевич Евстюнин
Grigoriy Evstyunin

Сведения об авторе: генеральный директор ООО «Новые технологии лазерного термоупрочнения».

Образование: Владимирский государственный педагогический университет (2002 г.).

Область научных интересов: лазерная обработка материалов.

Публикации: 11.
ORCID:0000-0002-4287-3729

Information about the author: General Director of Company “New Technologies of Laser Thermal Hardening”.

Education: Vladimir State Pedagogical University, 2002.

Research interests: laser treatment of materials.

Publications: 11.



Антон Владиславович Осипов
Anton Osipov

Сведения об авторе: инженер-исследователь кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета

Образование: Владимирский государственный университет, 2010

Область научных интересов: физика лазеров и их применение, физическая оптика.

Публикации: 81.
Scopus 5, РИНЦ 5, WoS 4;
ORCID:0000-0002-1968-8795

Information about the author: Leading Engineer at the Department of Physics and Applied Mathematics of Vladimir State University.

Education: Vladimir State University, 2010.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 130.



Владимир Львович Евстигнеев
Vladimir Evstigneev

Сведения об авторе: начальник отдела АО «Научный центр лазерных систем и комплексов “Астрофизика”».

Образование: МИФИ (1974 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; лазерная техника и технологии.

Публикации: более 50.
ORCID:0000-0003-0632-5589

Information about the author: Head of the Department of JSC Scientific Center of Laser Systems and Complexes “Astrophysics”.

Education: MIFI, 1974.

Research interests: physics of lasers and applications; laser technology and technology.

Publications: more than 50.



Мирон Николаевич Герке
Miron Gerke

Сведения об авторе: старший научный сотрудник кафедры физики и прикладной математики Владимирского государственного университета.

Образование: Ленинградский институт точной механики и оптики (1980 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 21.
ORCID: 0000-0003-3378-115X

Information about the author: Senior Researcher at the Department of Physics and Applied Mathematics of Vladimir State University.

Education: Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics, 1980.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 21.

1. Введение

Процессы, индуцированные лазерным излучением в области его взаимодействия с веществом, характеризуются высокой скоростью развития и исключают прямой контакт измеряющих детекторов в области взаимодействия. Кроме того, возможность структурной перестройки облучаемой поверхности материала требует регистрации временных характеристик этих динамических процессов, определяющих, по сути, структурные фазовые переходы. В связи с этим для их диагностики предпочтительны вы-

сокочувствительные, бесконтактные и безинерционные методы регистрации.

Наиболее перспективными в этом аспекте являются оптические методы регистрации, основанные на использовании, кроме силового лазера накачки, дополнительного/зондирующего лазерного излучения (один из вариантов «pump-probe technique»).

В работе [1] была предложена схема получения усиленного по яркости увеличенного изображения предмета с помощью среды с высоким коэффициентом усиления. На практике данный подход впервые был реализован в [2].

Важность и эффективность методов диагностики с его использованием для изучения различных динамических процессов при взаимодействии лазерного излучения с веществом подтверждается большим числом публикаций, посвященным подобным методам и их модификациям [3]. В работах [4–9] и [11–16] с помощью системы лазерного проекционного микроскопа и скоростной камеры проведена визуализация и диагностика лазерно-индуцированных процессов на поверхности различных материалов (например, стеклоглерод, пироуглерод, металлы) в режиме реального времени. В работе [10] с помощью системы лазерного проекционного микроскопа и скоростной камеры было зафиксировано плавление углерода в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4 000 К.

Основное преимущество применения усилителей яркости на основе активных сред лазеров на парах металлов (например Cu, $\lambda = 0,51$ мкм) в системах оптического диагностического канала заключается в том, что усилитель яркости выступает в качестве узкополосного селективного фильтра [17]. Активная среда усилителя яркости многократно усиливает проходящее через нее излучение, но только в узкой полосе частот, соответствующей собственному контуру усиления активной среды. В результате, если зондирование исследуемого объекта производится в отраженном свете с помощью излучения такой активной среды усилителя яркости, излучение, несущее полезную информацию, на приемном устройстве значительно превосходит по яркости различного рода фоновые/паразитные засветки.

Эта особенность применения усилителей яркости (иногда называют лазерными мониторами) инициировала их широкое применение. Для этого была сформулирована система требований к усилителям яркости для оптических систем (обзор приведен, на-

пример, в [17–25]). Так, активная среда должна: обладать оптической однородностью и достаточно большой выходной мощностью; работать в режиме, близком к насыщению (значительная часть); обеспечивать усиление в видимой области спектра в непрерывном или импульсном режиме с достаточно высокой частотой повторений, превышающей $20 \div 50$ Гц. Кроме того, геометрические размеры и угловая апертура активной среды должны обеспечивать прохождение через нее пучков света, несущих информацию об объекте; реальное усиление активной среды за один проход должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить значительное усиление яркости. Это общие требования к усилителям. К некоторым оптическим системам предъявляются дополнительные требования, однако в некоторых случаях необязательно выполнять все требования.

В настоящей работе впервые рассматривалась возможность передачи и регистрации динамических процессов лазерного термоупрочнения с соответствующими характеристиками пространственной структуры на поверхности объекта при передаче изображения через волоконно-оптическую систему/оптический жгут в реальных условиях многопучкового воздействия силового лазера на объект (такие многопучковые/волноводные лазеры наиболее эффективны для технологических приложений [26]).

Однако в этом случае возникает проблема с глубиной резкости изображения при регистрации динамики процесса лазерного термоупрочнения. Анализ возможных путей решения этой принципиальной проблемы представлен в настоящей статье.

Упрочнение лазерным методом, а также размерная обработка по сравнению с традиционными методами происходит очень быстро, почти без выбросов вредных веществ, то есть намного экологичнее.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
λ	Длина волны, мкм
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
CO ₂	Диоксид углерода
Cu	Медь
D	Диаметр активного элемента, мм
f	Фокусное расстояние, мм
L	Длина активного элемента, мм
P	Мощность лазерного излучения, Вт
R1, R2	Радиус кривизны линз
T	Температура образца в зоне воздействия лазерного излучения, °C
t	Время воздействия лазерного излучения, с
V	Скорость сканирования лазерного пучка по поверхности образца, мм/с
<i>Аббревиатуры</i>	
YAG	Алюмо-иттриевый гранат
АС	Активная среда
ГР	Глубина резкости
ЛПМ	Лазерный проекционный микроскоп
O ₁ , O ₂	Объективы и/или оптические конденсорные системы
ОЖ	Оптический жгут
П ₁	Плоскость предмета
П ₂	Плоскость изображения



2. Теоретический анализ

Экспериментальные исследования процессов, происходящих в области взаимодействия лазерного излучения с поверхностью образца, производятся по следующей методике. Лазерный монитор настраивается для наблюдения поверхности исследуемого об-

разца. Настройка может быть выполнена как с визуальным контролем – при этом на экране или дисплее наблюдается изображение поверхности материала с отчетливо различимым рельефом поверхности (рис. 1), – так и по максимуму отраженного от образца и усиленного активной средой лазера на парах атомов меди излучения.

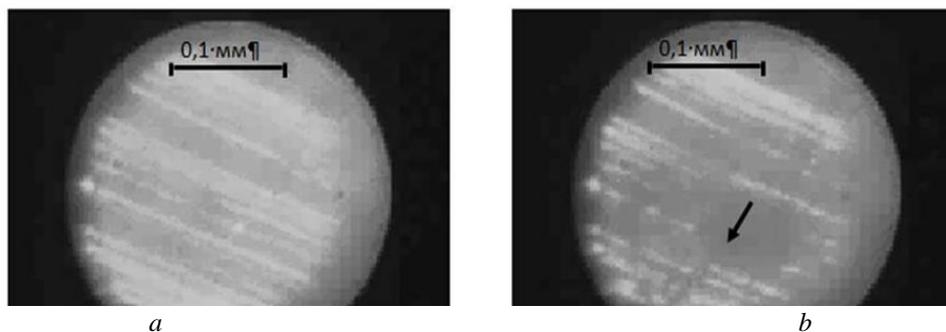


Рис. 1 – Изображения поверхности материала, полученные при помощи лазерного монитора: *a* – до воздействия силового лазера (отчетливо различается рельеф поверхности, наблюдаемый при настройке лазерного монитора на образец); *b* – во время воздействия силового лазера (стрелкой указана область лазерного воздействия)

Рис. 1 – The image of the surface of the material obtained with the help of a laser monitor: *a* – before the action of a power laser (the surface relief observed when the laser monitor is mounted on the sample differs distinctly); *b* – during the action of the power laser (the arrow indicates the laser action region)

Для улучшения контраста применяются как классические оптические методы устранения бликов, так и компьютерные методы последующей обработки изображений [18].

Возможности измерений иллюстрируются рис. 2. В качестве тестового объекта наблюдения использовалась отражательная решетка с периодом 4 мкм. Известно, что для такого рода лазерных проекционных микроскопов данное значение не является предельно достижимым, однако в наших экспериментах этого было достаточно для наблюдения исследуемых процессов лазерной обработки материалов.

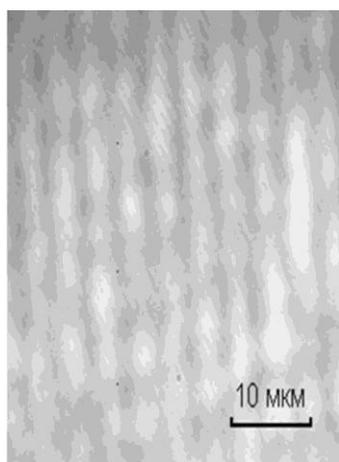


Рис. 2 – Изображение отражательной дифракционной решетки, полученное при помощи лазерного монитора (период решетки – 4 мкм)

Рис. 2 – The image of the reflective grating obtained by means of a laser monitor (grating period 4 μm)

После настройки лазерного монитора на мишень направляется излучение силового лазера (твердотельный YAG-лазер ($\lambda = 1,06$ мкм) и/или волоконный CO₂-лазер ($\lambda = 10,6$ мкм), и/или матрица полупроводников лазеров ($\lambda = 0,81$ мкм), и/или волоконный непрерывный лазер ($\lambda = 1,07$ мкм) и производится совместная юстировка силового и зондирующего/диагностического каналов установки. При этом точность совмещения осей не хуже 0,02 мм. Размер пятна излучения силового лазера на поверхности исследуемого образца независимо регулируется, что позволяет адаптироваться к условиям эксперимента по исследованию процессов как для практически однородной освещенности области воздействия, так и при неоднородной освещенности. Область воздействия излучения силового лазера легко идентифицировать по уменьшению отражательной способности (потемнению) поверхности образца и по разрушению первоначального микрорельефа (см. рис. 1*b*).

Далее устанавливается мощность излучения силового лазера, необходимая для инициирования исследуемого процесса. Интенсивность действующего на поверхность образца излучения и длительность воздействия зависят от того, до какой стадии и в каком режиме должно происходить взаимодействие лазерного излучения с материалом.

Действительно, под воздействием лазерного излучения изменяются оптические характеристики облучаемого материала, что приводит к изменению отражательной способности поверхности исследуемого образца, а также возникают различной природы поверхностные структуры, вызывающие изменение диаграммы отражения. Эти изменения условий от-



ражения приводят к изменению регистрируемого изображения зоны взаимодействия лазерного излучения с поверхностью образца и определяются при его компьютерной обработке.

Для этого полученные изображения оцифровываются (уровень яркости каждого элемента изображения преобразуется в соответствующий цифровой код) и в этом виде записываются в память компьютера. В результате в памяти компьютера формируются массивы кодов. При вычитании из базового массива, соответствующего определенному кадру изображения, другого массива, соответствующего предыдущему кадру изображения, остается только цифровая информация о произошедших изменениях на поверхности образца.

Подобная процедура применяется и для повышения контраста регистрируемых изображений объекта. Для этого оптический затвор, установленный между предметом и лазерным усилителем, последовательно открывается и закрывается синхронно с частотой кадров регистрирующей камеры (отраженное от затвора излучение лазерного усилителя направляются за пределы его апертуры). Это дает возможность в первом кадре записать изображение объекта и фона/паразитного излучения, а во втором кадре (при закрытом затворе) только изображение фона. При вычитании из массива, соответствующего первому кадру, следующего массива, соответствующего второму кадру, остается только цифровая информация об изменении в изображении объекта, которое выводится на дисплей компьютера в виде требуемых элементов (полученных при вычитании массива по обозначенной процедуре) для визуального наблюдения трансформации изображения объекта.

Преимущества обсуждаемой экспериментальной схемы при исследовании высокотемпературных процессов, развивающихся при взаимодействии лазерного излучения с материалами в условиях образования паразитной засветки от эрозионного факела (она экранирует область воздействия), наглядно проявились при проведении сравнительного эксперимента, в котором излучение лазера на парах меди, отраженное от поверхности материала, делилось пополам светоделителем, и часть излучения направлялась в регистрирующую камеру в обход активной среды лазера на парах меди. Этот канал представляет собой обычную стандартную проекционную оптическую

систему с лазером в качестве источника света. Оптические пути в обоих каналах были практически одинаковыми, и изображение фиксировалось камерой с одинаковым увеличением. Затем на образец направлялось излучение силового лазера, интенсивность которого постепенно увеличивалась. При интенсивности излучения силового лазера порядка $4 \cdot 10^5$ Вт/см² эрозионный факел развивался настолько сильно, что его свечение полностью экранировало область взаимодействия лазерного излучения с поверхностью материала. Это не позволяло производить ее наблюдение. На изображение же области взаимодействия, полученное в канале с усилителем яркости, это не оказывало влияния.

В нашем случае кадр, фиксирующий состояние поверхности в определенный момент времени действия лазерного пучка силового лазера, дает качественную картину условий отражения света в этой области взаимодействия. Детальное исследование производится по пространственному распределению яркости полученного изображения, построенному вдоль выбранной оси. При этом пространственное разрешение определяется как возможностями оптической системы лазерного монитора, так и возможностями компьютерной техники и программного обеспечения [27, 28].

По изменениям в распределении яркости изображения отслеживаются изменения в условиях отражения зондирующего излучения, являющиеся следствием изменения состояний поверхности материала под действием силового лазерного излучения.

Таким образом, возможно выявить момент появления переходной области, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с веществом, проследить за динамикой ее расширения, регистрировать появление теплового фронта, фронта плавления, окисных фронтов и т.п.

3. Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов по тематике данной статьи проведена модернизация лазерного проекционного микроскопа (ЛПМ) с включением в зондирующий канал оптического жгута.

Принципиальная схема эксперимента с оптическим жгутом приведена на рис. 3.

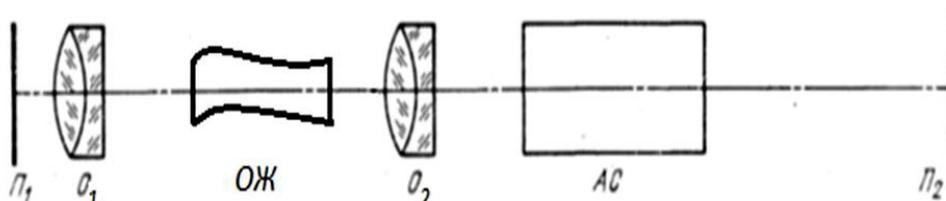


Рис. 3 – Схема лазерного проекционного микроскопа с волоконным/оптическим жгутом:

П₁ – плоскость предмета; П₂ – плоскость изображения; ОЖ – оптический жгут; АС – активная среда с большим коэффициентом усиления; О₁, О₂ – объективы и/или оптические конденсорные системы

Рис. 3 – Diagram of a laser projection microscope with a fiber/optical harness: П₁ – the plane of the object; П₂ – the plane of the image; ОЖ – optical harness; АС – active medium with a large gain; О₁, О₂ – lenses and / or optical condenser systems

Система в общей комплектации включает комплекс для визуализации лазерно-индуцированных процессов (лазерный монитор) с соответствующими характеристиками:

- возможность визуализации в реальном масштабе времени области лазерной обработки поверхности материала при наличии сильного теплового излучения возникающего эрозионного/лазерного факела непосредственно над обрабатываемой поверхностью;
- пространственное разрешение регистрируемого изображения порядка 10 мкм;
- временное разрешение системы регистрации не хуже 1 мс;
- длина волны зондирующего излучения 510 нм;
- коэффициент усиления рассеянного от визуализируемой поверхности излучения – порядка 10^4 .

Кроме того, для измерения температуры обрабатываемой поверхности используется высокотемпературный микропирометр, соответствующий следующим требованиям [29]:

- диапазон контролируемых температур от 2 000 °С до 5 000 °С;
- временное разрешение не хуже 0,5 мс.

Проблема заключается в том, что предмет, находящийся в плоскости Π_1 , не статичен, то есть его положение относительно оптической оси всей системы изменяется. При лазерной обработке поверхности, на которой обязательно присутствует источник/область воздействия мощного лазерного излучения, в зависимости от выбранной схемы лазерной обработки всегда существует взаимное перемещение предмета, ЛПМ и источника мощного лазерного излучения.

В простейшем модельном эксперименте по термоупрочнению плоской поверхности металлического материала удалось осуществить следующую схему: предмет (обрабатываемая поверхность) и вся схема ЛПМ в процессе эксперимента неподвижны; обрабатываемый пучок силового лазера с помощью робота-манипулятора перемещается с постоянной скоростью через поле зрения с изображением поверхности по прямой траектории. Зарегистрированный динамический процесс сохраняется в avi-файле. При этом авторами данной статьи была продемонстрирована визуализация поверхности материала и зарегистрировано её оплавление в ходе эксперимента.

Однако такой простой подход не является общим в современных лазерных технологиях, где движение мощного лазерного пучка относительно неподвижной (в лабораторной системе координат) обрабатываемой детали, как правило, происходит по сложной криволинейной траектории.

В связи с этим необходимо обеспечить синхронное движение двух лазерных пучков: мощного – силового лазера, воздействующего на поверхность, и зондирующего пучка ЛПМ. Если при этом исходить из предположения, что мощное лазерное излучение доставляется к соответствующей обрабатываемой поверхности оптической головкой с помощью опто-

волокна, то естественным представляется применение волоконных технологий и для передачи изображения в ЛПМ. Это показано на рис. 3, где в схему введен оптический жгут ОЖ [30], служащий для переноса изображения с одного своего торца на другой, а также дополнительный объектив O_2 . Объектив O_1 строит изображение предметной плоскости Π_1 на левом торце ОЖ. Жгут обеспечивает перенос изображения на свой правый торец в масштабе 1:1. Далее изображение этого торца переносится объективом O_2 в плоскость изображений Π_2 через АС с прежним увеличением и выводится на экран ЛПМ. Ввиду механической гибкости волоконного жгута объектив O_1 теперь не связан механически жёстко с остальной частью ЛПМ и может поворачиваться на произвольный угол в пределах определенного диапазона.

В общем случае регистрация динамических процессов в реальном масштабе времени требует не только модификации собственно оптической регистрационной схемы, но и использования более совершенных/ современных моделей скоростных усилителей яркости на индуцированных переходах в парах металлов [31].

4. Результаты и их обсуждение

Для экспериментов в обсуждаемой схеме с ЛПМ применялся лазер на парах меди (модель CVL-10). Активный элемент типа «Кулон» (ГЛ 206) имел диаметр $D = 14$ мм и длину $L = 770$ мм.

Сначала была собрана и апробирована стандартная/упрощенная схема (см. рис. 3), но без ОЖ и O_2 . В качестве объектива O_1 использовался штатный объектив комплекта лазера с фокусным расстоянием $f \sim 70$ мм и относительным отверстием $\sim 1:3$. Тестовым предметом служила пластина полированной нержавеющей стали, на которой методом лазерной гравировки был нанесён рисунок в виде периодически расположенных прямоугольников (рис. 4).

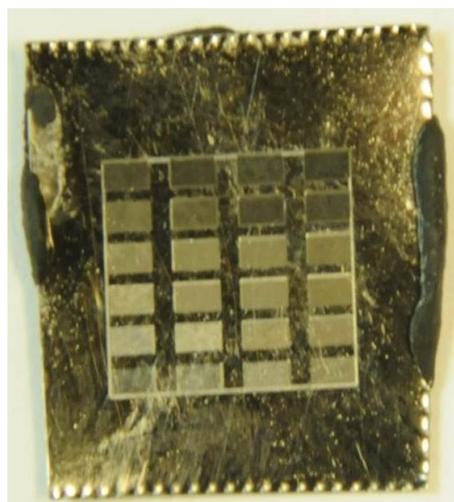


Рис. 4 – Тест-объект для работы с лазерным проекционным микроскопом

Рис. 4 – Test object for working with a laser projection microscope

Полученное изображение части тест-объекта приведено на рис. 5. Как видно, изображение имеет хорошее качество, границы прямоугольников чёткие, контраст высокий (показан один фрагмент прямоугольника с границей).

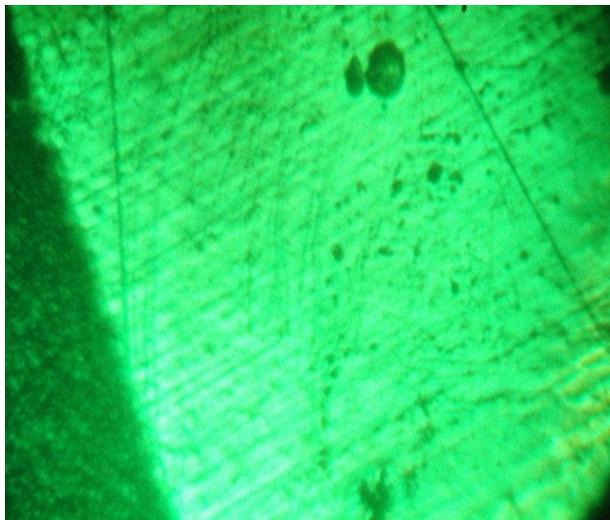


Рис. 5 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ в плоскости наилучшей фокусировки (показан фрагмент изображения на границе одного из прямоугольников)

Рис. 5 – The image of the test object on the LPM screen in the plane of the best focusing (the fragment of the image on the border of one of the rectangles is shown)

Экспериментально определена глубина резкости (ГР) для отображаемой ЛПМ поверхности обрабатываемого объекта. Для этого тест-объект устанавливался на столик с прецизионной подачей, после чего вращением дифференциального винта устанавливалась наилучшая резкость и наилучший контраст изображения (см. рис. 5). Затем тест-объект выводился из установленной плоскости наилучшего изображения до почти полного исчезновения контраста.

Визуально регистрировалась следующая картина: контраст изображения малый, мелкие детали (видимые ранее) неразличимы. В результате этих измерений получено, что глубина резкости составляет ± 200 мкм (ср. с рис. 6).

Столь небольшая ГР создаёт сложности в использовании такой упрощенной схемы (см. рис. 3) при условии её работы для регистрации динамических процессов (объект Π_1 движется относительно объектива O_1). Если перемещение производится некоторой механической системой (например, с помощью робота-манипулятора), которая всегда движется по программно-заданной траектории с некоторой погрешностью, то возникает вопрос о соотношении этой погрешности и величины ГР используемого ЛПМ.

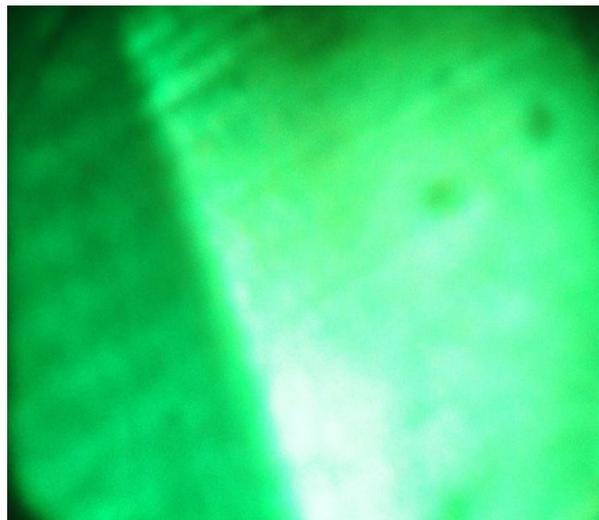


Рис. 6 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ в плоскости, отстоящей от положения наилучшей фокусировки на 160 мкм

Рис. 6 – The image of the test object on the LPM screen in a plane separated from the best focusing position by 160 μm

Однако фактические данные о том, с какой точностью поддерживается расстояние между объектом Π_1 и объективом O_1 при работе робота-манипулятора трудно оценить, поскольку его производитель необходимые для этого сведения обычно не приводит. По оценкам авторов данной статьи, на практике это расстояние сравнимо с ГР, поэтому в данной ситуации получить качественное изображение исследуемой динамической поверхности проблематично.

Один из простых вариантов улучшения ситуации с параметром глубины резкости – применение более длиннофокусных объективов O_1 . Эксперимент с более длиннофокусным объективом ($f \sim 100$ мм) привел к увеличению ГР приблизительно в 2 раза. Само это значение имеет смысл в сравнении с масштабом тех неоднородностей на поверхности обрабатываемого изделия, которые требуется визуализировать в процессе их трансформации под действием излучения силового лазера.

На рис. 7. представлена динамика изменения обрабатываемой поверхности стали в реальном эксперименте по термоупрочнению в условиях умеренной мощности силового лазера. Здесь для примера показаны последовательные стадии (1–4) модификации поверхности стали при воздействии многопучкового CO_2 -лазера с мощностью $P = 743$ Вт; скорость сканирования лазерного пучка по поверхности образца $V = 5$ мм/с; при этом температура образца в зоне облучения $T = 884$ °С, а структурные фазовые превращения происходили за время: $t_1 = 0,147$ с (начало процесса – картинка 1) и $t_2 = 0,154$ с (завершение процесса – картинка 4) после начала облучения.



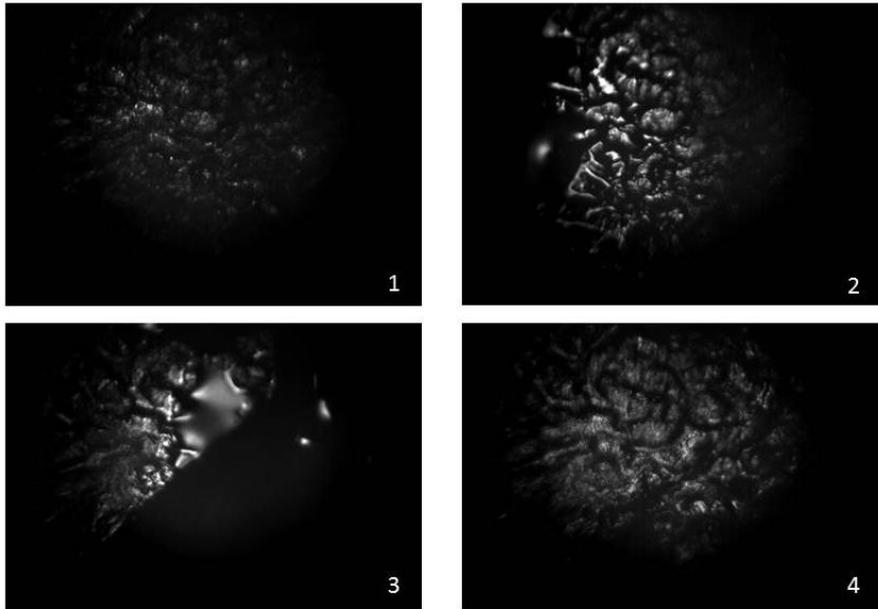


Рис. 7 – Динамическое изображение обрабатываемой поверхности в реальном масштабе времени: 1 – поверхность материала до воздействия лазерного излучения; 2 – время воздействия лазерного излучения $t_1 = 0,147$ с; 3 – время воздействия лазерного излучения $t_2 = 0,154$ с; 4 – поверхность материала после завершения воздействия лазерного излучения

Рис. 7 – Dynamic image of the processed surface in real time: 1 – the surface of the material before exposure to laser radiation; 2 – the time of exposure to laser radiation $t_1 = 0.147$ s; 3 – the time of exposure to laser radiation $t_2 = 0.154$ s; 4 – the surface of the material after exposure to laser radiation

Далее проведены эксперименты с включением в схему ОЖ (см. рис. 3). Объектив O_2 с фокусным расстоянием $f = 125$ мм. В качестве оптической системы O_1 использовалась плоско-выпуклая линза с фокусным расстоянием $f = 50$ мм, установленная на расстоянии 100 мм от торца ОЖ. Тестовым предметом служила пластина полированной нержавеющей стали, на которой методом лазерной гравировки нанесены штрихи с определенным количеством на один миллиметр.

На рис. 8 приведено изображение поверхности тест-объекта, полученное на экране ЛПМ без использования ОЖ. Количество штрихов на один миллиметр составило 2,5.

На изображении четко видна поверхность тест-объекта и периодичность полос.

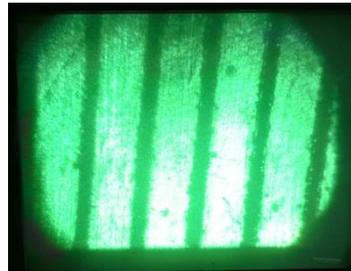


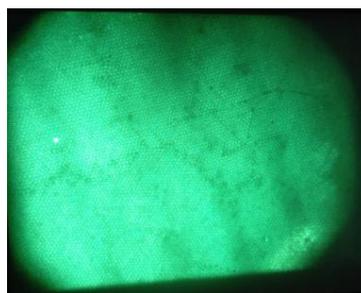
Рис. 8 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ

Рис. 8 – The image of the test object on the LPM screen

На рис. 9 приведено изображение тест-объекта, полученное на экране ЛПМ с использованием ОЖ. Тест-объект располагался на торце оптического жгута. Количество штрихов на один миллиметр – 5 (рис. 9a); количество штрихов на один миллиметр – 2,5 (рис. 9b).



a



b

Рис. 9 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ расположенного на торце оптического жгута:

a – 5 штрихов на один миллиметр;

b – 2,5 штриха на один миллиметр

Рис. 9 – The image of the test object on the LPM screen located at the end of the optical harness:

a – 5 strokes per millimeter;

b – 2.5 strokes per millimeter

При передаче изображения по ОЖ контраст изображения уменьшается.

На рис. 10 приведено изображение тест-объекта, расположенного на торце ОЖ с добавлением иммерсионной жидкости между жгутом и тест-объектом. В качестве иммерсионной жидкости использовался глицерин. Количество штрихов на один миллиметр – 5.

Контраст изображения в данном случае увеличивается.

На рис. 11 приведено изображение поверхности тест-объекта, расположенного после фокусирующей системы O_1 . В качестве фокусирующей системы O_1 использовалась плоско-выпуклая линза с фокусным расстоянием $f = 50$ мм.

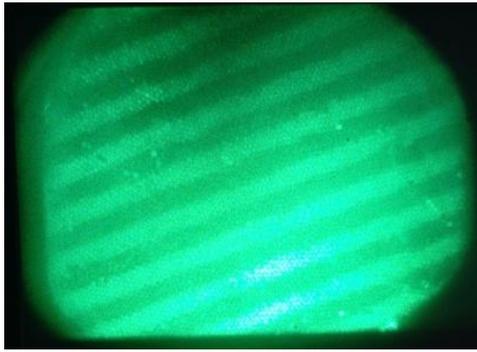


Рис. 10 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ, расположенного на торце оптического жгута (с использованием иммерсионной жидкости)

Рис. 10 – The image of the test object on the LPM screen located on the end of the optical harness (using immersion liquid)

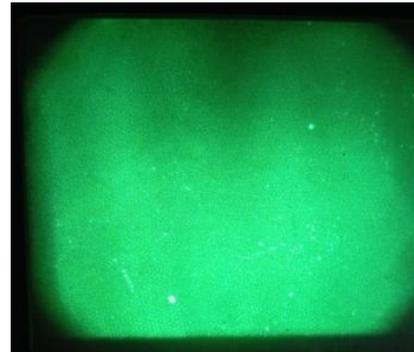


Рис. 11 – Изображение тест-объекта на экране ЛПМ, расположенного на расстоянии 100 мм от фокусирующей системы O_1

Рис. 11 – The image of the test object on the LPM screen located at a distance of 100 mm from the focusing system O_1



Изображение поверхности имеет низкий контраст. Часть излучения, участвующая в построении изображения, теряется при прохождении через ОЖ и оптическую систему O_1 .

Для расчетов возможностей монитора при передаче изображения обрабатываемой лазерным излучением поверхности образца по оптическому жгуту использовалась компьютерная программа ZEMAX. Не вдаваясь в детали, достаточно сказать, что эта система позволяет провести моделирование и анализ при проектировании и выборе различных оптимальных схем оптических систем, в том числе с оптическим волокном (жгутом).

В частности, речь идет о расчете оптической системы после оптического жгута перед тест-объектом O_1 . В работе проведен расчет двухлинзового конденсора, применение которого улучшает качество получаемого изображения. Рассмотрены следующие параметры системы в зондирующем канале:

- длина волны излучения 510 нм;
- диаметр линз 30 мм;
- расстояние между линзами 40 мм;
- толщина линз 6 мм;
- радиус кривизны линзы 1 $R_2 = -58,576$ мм;
- радиус кривизны линзы 2 $R_1 = 58,576$ мм;
- расстояние от волокна до линзы 69,714 мм;
- диаметр оптического волокна 0,6 мм;
- фокусное расстояние 80,265 мм;
- диаметр фокусного пятна 0,468 мм;
- показатель преломления стекла 1,568151.

Приведенные ниже результаты представляют один из этапов поиска приемлемых решений для визуализации изображения через оптическое волокно/жгут и являются предварительными с постепенным усложнением в дальнейшем оптической схемы ввода изображения для использования при работе реального лазерного технологического комплекса.

Компьютерная симуляция сделана для наглядности с помощью изображения из обычного текстового источника (рис. 12 – статичная картинка из книги).



Рис. 12 – Исходная статичная картинка из книги для проверки построения изображения конденсорной системой

Рис. 12 – The original static image from the book to check the construction of the image by the condenser system

При использовании конденсорной системы (вместо фокусирующей линзы O_1 – см. рис. 3) для передачи изображения поверхности обрабатываемого образца на вход жгута/оптического волокна, для статичной картинке полученное изображение было вполне высокого качества (рис. 13).



Рис. 13 – Полученное качественное изображение на выходе оптической системы с конденсором

Рис. 13 – A qualitative image obtained at the output of an optical system with a condenser



Напротив, в схеме, где используется только одна линза O_1 (с фокусным расстоянием 43,2 мм или 50 мм) качество полученного изображения было низким (рис. 14).



Рис. 14 – Изображение низкого качества при использовании системы только с одной линзой ($f = 50$ мм)

Рис. 14 – Low image quality when using a system with only one lens ($f = 50$ mm)

Следующий этап исследований – определение возможностей предлагаемой системы для передачи динамических изображений в случае перемещения как пучка силового лазера, так и самой мишени (это и происходит в реальном технологическом процессе на производстве), но уже для реального разрабатываемого лазерного технологического комплекса для конкретных режимов термоупрочнения.

Более точные сведения должны определяться реально используемым для технологических процессов силовым лазером и его соответствующими характеристиками. В данной статье речь идет о разработке новых высокоэффективных технологий кардинального повышения износостойкости ответственных деталей машиностроения на основе роботизированного универсального интеллектуального лазерного комплекса с диагностикой процессов упрочнения в реальном масштабе времени. Этот комплекс находится еще в стадии разработки и доведения/испытаний его параметров до требуемых значений для определенных технологических режимов лазерного термоупрочнения.

5. Заключение

Анализ системы мониторинга процесса лазерной обработки поверхности материалов в реальном масштабе времени, предназначенной для визуализации лазерно-индуцированных динамических процессов непосредственно во время лазерной обработки поверхности объекта, выявил базовые физические принципы работы системы: глубина резкости для отображаемой ЛПМ поверхности обрабатываемого объекта составляет ± 200 мкм; использование в схеме мониторинга оптического жгута для обеспечения синхронного движения двух лазерных пучков (сило-

вого лазера и зондирующего пучка ЛПМ) возможно совместно с конденсорной системой. При этом возникают следующие проблемы: небольшая глубина резкости, сопоставимая с погрешностью движения некоторой механической системы (например, робота-манипулятора); потеря части излучения, участвующего в построении изображения, при прохождении через оптический жгут и оптическую систему, что приводит к ухудшению качества получаемого изображения обрабатываемой поверхности. В различных условиях конкретных процессов лазерного термоупрочнения данные проблемы можно решить, в том числе, с применением длиннофокусных объективов (для фокусировки зондирующего пучка ЛПМ) и с помощью компьютерной симуляции для поиска оптимальных оптических схем и режимов.

Несмотря на сложность и требования для точной настройки представленного монитора, это устройство имеет, тем не менее, исключительное значение при реализации специальных операций при лазерном термоупрочнении ответственных деталей сложного и точного машиностроения, особенно 3D-изделий разного габарита и предназначения.

В стандартных задачах лазерного термоупрочнения при умеренных мощностях силового лазера (особенно для крупногабаритных изделий простого профиля) данный монитор дает избыточную информацию, требует более детальных измерений с соответствующим программно-аналитическим обеспечением высокого уровня и повышает общую цену реализуемого технологического процесса при коммерциализации лазерного комплекса для задач реального производства.

В этом случае можно применять другой, более простой, альтернативный метод решения задачи визуализации – стандартный метод спектральной фильтрации, основывающийся на том факте, что в фиолетовой части спектра для различных материалов (Al, Cu, Fe, Ti) и в синей части видимого диапазона (если не принимать во внимание титан), лазерный факел даёт весьма малый вклад. Поэтому, если подсветить область обработки фиолетовым полупроводниковым лазером (номинальная длина волны 405 нм) и наблюдать изображение через интерференционный фильтр, настроенный на данную длину волны, изображение, предположительно, может быть зарегистрировано с помощью типовой видеокамеры. Такая система является вполне коммерчески приемлемой как в формате цена/качество, так и для производственных условий. Предварительно проведенные авторами данной статьи демонстрационные тесты показали реальность такого подхода (по крайней мере при лазерной резке).

Однако в микрообработке локальных областей 3D-изделий сложного профиля использование данного монитора может дать принципиальные преимущества в аспекте управляемости технологического процесса непосредственно во время его проведения и достижения требуемой/рекордной точности обработки.



Благодарности

Работа выполнена в качестве тестовой основы проекта ВГУ-01(4480/14) по лазерному термоупрочнению с помощью роботизированного универсального интеллектуального лазерного комплекса с диагностикой процессов упрочнения в реальном масштабе времени в рамках формата конкурса по Постановлению Правительства №218 (от 9 апреля 2010 г.).

Acknowledgments

The work was performed as a test basis for the VGU-01 (4480/14) project on laser thermal strengthening with the help of a robotic universal intelligent laser complex with diagnostics of hardening processes in real time within the framework of the competition format according to Government Decision no.218 (dated April 9, 2010).

Список литературы

[1] Rabinovitz, P. Super-radiant illuminator projector / P. Rabinovitz, R. Chimenti // JOSA. – 1970. – No. 60. – P. 1577–1778.

[2] Земсков, К.И. Лазерный проекционный микроскоп [Текст] / К.И. Земсков [и др.] // Квантовая электроника. – 1974. – №1. – С. 14–15.

[3] Аракелян, С.М. Введение в фемто-нанопотонику. Фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов / С.М. Аракелян [и др.] – М.: Логос, 2015. – 744 с.

[4] Prokoshev, V.G. Real time diagnostics of the laser-induced thermochemical processes and nonlinear images on the surface of materials: experiment and mathematical modeling [Text] / V.G. Prokoshev [et al.] // Laser Physics. – 2001. – Vol. 11. – No.11. – P. 1167.

[5] Абрамов, Д.В. Лазерная диагностика эволюции поверхности углерода под воздействием мощных лазерных импульсов [Текст] / Д.В. Абрамов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 2. – С. 1–7.

[6] Абрамов, Д.В. Визуализация и восстановление рельефа области лазерного воздействия на поверхность графита [Текст] / Д.В. Абрамов [и др.] // Известия РАН, сер. физ. – 2006. – № 3. – С. 423–426.

[7] Zharenova, S.V. Visualization of interaction of laser radiation with a surface of glassy carbon and pirographite by means of the laser monitor / S.V. Zharenova, E.L. Shamanskaya // Third Russian-French Laser Symposium. The thesis's of the reports. St. Petersburg, 22–27 September. – 2008.

[8] Абрамов, Д.В. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода [Текст] / Д.В. Абрамов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. Математика и механика. Физика. – С. 97–101.

[9] Жаренова, С.В. Визуализация взаимодействия лазерного излучения с поверхностью углеродосодержащих материалов [Текст] / С.В. Жаренова, Е.Л. Шаманская // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 8. – С. 50.

[10] Абрамов, Д.В. Плавление углерода, нагреваем

мого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К [Текст] / Д.В. Абрамов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – № 5. – С. 315–319.

[11] Прокошев, В.Г. Нестационарные лазерные термохимические процессы на поверхности металлов и их визуализация при помощи лазерного усилителя яркости [Текст] / В.Г. Прокошев [и др.] // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 337–340.

[12] Abramov, D.V. A Laser-Induced Process on the Surface of a Substance and Their Laser Diagnostics in Real Time [Text] / D.V. Abramov [et al.] // Laser Physics. – 2005. – Vol. 15. – No. 9. – P. 1313–1318.

[13] Багаев, С.Н. Гидродинамика расплава поверхности металла при лазерном воздействии; наблюдение смены режимов в реальном времени [Текст] / С.Н. Багаев [и др.] // Доклады Академии наук (ДАН). – 2004. – Т. 395. – № 2. – С. 183–186.

[14] Абрамов, Д.В. Реконструкция рельефа поверхности области лазерного воздействия на основе обработки оптических изображений полученных при помощи лазерного монитора [Текст] / Д.В. Абрамов [и др.] // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 8. – P. 73–77.

[15] Prokoshev, V.G. Diagnostic of laser modification of a graphite surface / V.G. Prokoshev [et al.] // Materials of international conference “Laser Matter Interaction-XI”. – 30.06.03-04.07.03. – Pushkin, Russia. – P. 26.

[16] Prokoshev, V.G. Diagnostic system on basis of laser brightness amplifier for monitoring and controlling the laser technological processes [Text] / V.G. Prokoshev [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4644. – P. 168–175.

[17] Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / под ред. В.М. Батенина. – М.: Физматлит, 2009. – 544с.

[18] Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / под ред. В.М. Батенина. – М.: Физматлит, 2011. – Т. 2. – 616 с.

[19] Пат. 2162616 С1 Российская Федерация, МПКG02B21 25/00, 27/28 Штамм Микроскопы G01B 9/04, G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 – лазерный проекционный микроскоп / Батенин В.М., Климовский И.И., Калинин С.В., Галкин А.Ф., Данилов С.Ю., Прокошев В.Г., Абрамов Д.В., Аракелян С.М.; заявители и патентообладатели Батенин В.М., Климовский И.И., Калинин С.В., Галкин А.Ф., Данилов С.Ю., Прокошев В.Г., Абрамов Д.В., Аракелян С.М. - № 9810644510; заявл.27.02.00; опубл. 2001/02/27, 2 с: 2 ил.

[20] Пат. 98111965А Российская Федерация МПК G02B21/00 Штамм Микроскопы G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - микроскоп с усилителем яркости / Прокошев В.Г., Климовский И.И., Абрамов Д.В., Тараненко М.А., Аракелян С.М.; заявители и патентообладатели Прокошев В.Г., Климовский И.И., Абрамов Д.В., Тараненко М.А., Аракелян С.М. - № 98111965; заявл.17.06.98; опубл. 2000/03/10, 2 с: 1 ил.

[21] Пат. 2144204 С1 Российская Федерация МПК G02B21/00 (2006.01) Штамм Микроскопы G01B 9/04,



G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - лазерный проекционный микроскоп / Прокошев В.Г., Климовский И.И., Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Григорьев А.В.; заявители и патентообладатели Прокошев В.Г., Климовский И.И., Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Григорьев А.В. - № 96122043. заявл.20.01.99; опубл. 2000/01/10, 2 с: 1 ил

[22] Земсков, К.И. В сб. Оптические системы с усилителями яркости / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Труды ФИАН. – М., Наука. – 1991. – Т. 206. – С. 3–62.

[23] Земсков, К.И. В сб. Оптические системы с усилителями яркости / К.И. Земсков [и др.] // Труды ФИАН. – М., Наука, 1991. – 206. - С. 63–100.

[24] Кузнецова, Т.И. В сб. Оптические системы с усилителями яркости / Т.И. Кузнецова, Д.Ю. Кузнецов // Труды ФИАН. – М., Наука. – 1991. – 206. С. 101–115.

[25] Васильев, Ю.П. В сб. Оптические системы с усилителями яркости / Ю.П. Васильев [и др.] // Труды ФИАН. – М., Наука. – 1991. – 206. – С. 136–148.

[26] Александров, В.О. Новые технологические волноводные CO₂-лазеры килловаттного уровня мощности с высоким качеством излучения [Электронный ресурс] / В.О. Александров [и др.] // Научно-технический «Оптический журнал». – 2014. – № 4 (81). – Режим доступа: <http://www.technolaser.ru/russian/history.html> – (Дата обращения: 14.03.2018).

[27] Голубев, В.С. Анализ моделей динамики глубокого проплавления материалов лазерным излучением [Текст] / В.С. Голубев // Препринт ИПЛИТ РАН. – 1999. – № 83. – 161 с.

[28] Ринкевичюс, Б.С. Лазерная диагностика потоков (Lazernaja diagnostika potokov) / Б.С. Ринкевичюс. – М.: Издательство МЭИ, 1990. – 288 с.

[29] Аракелян, С.М. Определение яркостной температуры плавления стеклогуглерода [Текст] / С.М. Аракелян [и др.] // Динамика сложных систем. – 2015. – Т. 9. – №1. – С. 48–50.

[30] Жгуты для передачи изображения Лыткаринского завода оптического стекла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lzos.ru/content/view/23/43/> – (Дата обращения: 14.03.2018).

[31] Евтушенко, Г.С. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов / Г.С. Евтушенко [и др.]. – Томск: STT. – 2016. – 245 с.

Referents

[1] Rabinovitz P., Chimenti R. Super-radiant illuminator projector. *JOSA*, 1970;(60):1577–1778.

[2] Zemskov K.I. Laser projective microscope (Lazernyi proektsionnyi mikroskop). *Quantum Electronics*, 1974;(1):14–15 (in Russ.).

[3] Arakeljan S.M. Introduction to femto-nanophotonics. Fundamental basics and laser methods of controlled acquisition and diagnostics of nanostructured materials (Vvedenie v femto-nanofotoniku. Fundamental'nye osnovy i lazernye metody upravljajemogo

poluchenija i diagnostiki nanostrukturirovannyh materialov). Moscow: Logos Publ., 2015; 744 p. (in Russ.).

[5] Abramov D.V., Arakeljan S.M., Galkin A.F., Klimovskij I.I., Kucherik A.O., Prokoshev V.G. Laser diagnostics of the evolution of the surface of carbon under the influence of high-power laser pulses (Lazernaya diagnostika evolyucii poverhnosti ugleroda pod vozdeistviem moshhnyh lazernyh impul'sov). *Pribory i tehnika eksperimenta*, 2006;(2):1–7 (in Russ.).

[6] Abramov D.V., Arakeljan S.M., Klimovskij I.I., Kucherik A.O., Prokoshev V.G. Visualization and restoration of the relief of the region of laser action on the graphite surface (Vizualizacija i vosstanovlenie rel'efa oblasti lazernogo vozdeystvija na poverhnost' grafita). *Izvestija RAN, ser.fiz.*, 2006;(3):423–426 (in Russ.).

[7] Zharenova S.V., Shamanskaja E.L. Visualization of interaction of laser radiation with a surface of glassy carbon and pirographite by means of the laser monitor. *Third Russian-French Laser Symposium*. The thesis's of the reports. St. Petersburg, September 22–27. – 2008.

[8] Abramov D.V., Galkin A.F., Zharjonova S.V., Klimovskij I.I., Prokoshev V.G., Shamanskaja E.L. Visualization of the interaction of laser radiation with the surface of glass and pyrolytic carbon by means of a laser monitor (Vizualizacija s pomoshh'ju lazernogo monitora vzaimodeystvija lazernogo izlucheniya s poverhnost'ju steklo- i pirougleroda). *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2008;(312)2. Matematika i mehanika. Fizika:97–101 (in Russ.).

[9] Zharenova S.V., Shamanskaja E.L. Visualization of the interaction of laser radiation with the surface of carbon-containing materials (Vizualizacija vzaimodeystvija lazernogo izlucheniya s poverhnost'ju uglerodosoderzhashhih materialov). *Uspehi sovremenno estvestvoznaniya*, 2008;(8):50 (in Russ.).

[10] Abramov D.V., Arakeljan S.M., Galkin A.F. Melting of carbon heated by concentrated laser radiation in air at atmospheric pressure and at a temperature not exceeding 4000 K (Plavlenie ugleroda, nagrevaemogo skontsentrirannym lazernym izlucheniem v vozdukh pri atmosfernom davlenii i temperature, ne prevyshaiushchei 4000 K). *Pis'ma v ZhETF*, 2006;(84): 315–319 (in Russ.).

[11] Prokoshev V.G., Galkin A.F., Klimovskii I.I., Danilov S.Iu., Abramov D.V., Arakeljan S.M. Non-stationary laser thermochemical processes on the surface of metals and their visualization using a laser brightness amplifier (Nestatsionarnye lazernye termokhicheskie protsessy na poverkhnosti metallov i ikh vizualizatsiia pri pomoshchi lazernogo usilitelia iarkosti). *Kvantovaya elektronika*, 1998;25(4):337–340 (in Russ.).

[12] Abramov D.V., Arakeljan S.M., Galkin A.F. A Laser-Induced Process on the Surface of a Substance and Their Laser Diagnostics in Real Time. *Laser Physics*, 2005;15(9):1313–1318.

[13] Bagaev S.N., Prokoshev V.G., Kucherik A.O., Abramov D.V., Arakeljan S.M., Klimovskii I.I. Hydrodynamics of the melt of the metal surface under laser action; Monitoring of real-time mode change



(Gidrodinamika rasplava poverkhnosti metalla pri lazernom vozdeistvii; nabludenie smeny rezhimov v real'nom vremeni). *Doklady Akademii nauk (DAN)*, 2004;395(2):83–186 (in Russ).

[14] Abramov D.V., Arakelian S.M., Klimovskii I.I., Kucherik A.O., Prokoshev V.G. Reconstruction of the surface relief of the laser exposure region based on the processing of optical images obtained with a laser monitor (Rekonstruktsiia rel'efa poverkhnosti oblasti lazernogo vozdeistviia na osnove obrabotki opticheskikh izobrazhenii poluchennykh pri pomoshchi lazernogo monitora). *Opticheskii zhurnal*, 2007;74(8):73–77 (in Russ).

[15] Prokoshev V.G., Kucherik A.O., Abramov D.V., Klimovskii I.I., Galkin A.F., Arakelian S.M. Diagnostic of laser modification of a graphite surface. *Materials of international conference "Laser Matter Interaction-XI"*, Pushkin, Russia, 2003; p. 26.

[16] Prokoshev V.G., Abramov D.V., Klimovskii I.I., Galkin A.F. Diagnostic system on basis of laser brightness amplifier for monitoring and controlling the laser technological processes. *Proceedings of SPIE*, 2002;4644:168–175.

[17] Boichenko A.M. [and others] Lasers on self-limited transitions of metal atoms (Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov), pod red. V.M. Batenina, M.: Fizmatlit, 2009; 544 p. (in Russ).

[18] Batenin V.M., Boichenko A.M., Buchanov V.V. Lasers on self-limited transitions of metal atoms (Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov) / Ed. V.M. Batenina. Moscow: Fizmatlit Publ., 2011;(2):616 (in Russ).

[19] Batenin V.M., Klimovskii I.I., Kalinin S.V., Galkin A.F., Danilov S.Yu., Prokoshev V.G., Abramov D.V., Arakelyan S.M. Patent 2162616 C1 Russian Federation, IPCG02B 25/00, 27/28 Strain Microscope G01B 9/04, G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - laser projection microscope (Shtamm Mikroskop G01B 9/04, G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - lazernyi proektsionnyi mikroskop) / 2001 (in Russ).

[20] Prokoshev V.G., Klimovskii I.I., Abramov D.V., Taranenko M.A., Arakelyan S.M. Patent 98111965A Russian Federation, IPCG02B21/00 Strain Microscope G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - microscope with a brightness amplifier (Shtamm Mikroskop G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - mikroskop s usilitelem yarkosti) / 2000 (in Russ).

[21] Prokoshev V.G., Klimovskii I.I., Abramov D.V., Arakelyan S.M., Galkin A.F., Grigor'ev A.V. Patent 2144204 C1 Russian Federation, IPC G02B21/00 (2006.01) Strain Microscope G01B 9/04, G01N 1/06, G01N 13/10; G12B 21/00 - laser projection microscope (Shtamm Mikroskop G01B 9/04, G01N 1/06, G01N

13/10; G12B 21/00 - lazernyi proektsionnyi mikroskop) / 2000 (in Russ).

[22] Zemskov K.I., Kazaryan M.A., Petrash G.G. In the collection *Optical systems with amplifiers of brightness (V sb. Opticheskie sistemy s usilitel'yami yarkosti)*, 1991;206(3):62 (in Russ).

[23] Zemskov K.I., Kazaryan M.A., Matveev V.M., Petrash G.G. In the collection *Optical systems with luminance amplifiers (Opticheskie sistemy s usilitel'yami yarkosti)*, 1991;206:63–100 (in Russ).

[24] Kuznetsova T.I., Kuznetsov D.Yu. In the collection *Optical systems with amplifiers of brightness (V sb. Opticheskie sistemy s usilitel'yami yarkosti) M.*, Nauka, 1991;206:101–115 (in Russ).

[25] Vasil'ev Yu.P., Zemskov K.I., Ivanov A.V., Kazaryan M.A., Petrash G.G., Chvykov V.V. In the collection *Optical systems with amplifiers of brightness (V sb. Opticheskie sistemy s usilitel'yami yarkosti)*, 1991;206:136–148 (in Russ).

[26] Aleksandrov V.O., Budanov V.V.; Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., Golubev V.S., Egorov E.N., Zelenov E.V., Panchenko V.Ya., Semenov A.N., Chashkin E.V. New technological waveguide CO₂ lasers with a willy-watt power level with high radiation quality [E-resource] (Novye tekhnologicheskie volnovodnye CO₂-lazery killovattного urovnya moshchnosti s vysokim kachestvom izlucheniya). *Scientific and technical "Optical Journal"*, 2014;4(81). Available on: <http://www.technolaser.ru/russian/album.html> (03.14.2018) (in Russ).

[27] Golubev V.S. Analysis of models of the dynamics of deep penetration of materials by laser radiation (Analiz modelei dinamiki glubokogo proplavleniya materialov lazernym izlucheniem). *Preprint IPLIT RAN Shatura*, 1999;(83):161 (in Russ).

[28] Rinkevichyus B.S. Laser diagnostics of flows (Lazernaya diagnostika potokov). Moscow: Izdatel'stvo MEI Publ., 1990; 288 p. (in Russ).

[29] Arakelyan S.M., Galkin A.F., Zhirnova S.V., Osipov A.V. Determination of brightness temperature of melting of glassy carbon (Opreделение yarkostnoi temperatury plavleniya steklogl'eroda). *Journal "Dynamics of complex systems"*, 2015;9(1):48–50 (in Russ).

[30] Wire harnesses for image transmission of the Lytkarinsky optical glass plant (Zhguty dlya peredachi izobrazheniya Lytkarinskogo zavoda opticheskogo stekla) [E-resource]. Available on: <http://lzos.ru/content/view/23/43/> (03.14.2018).

[31] Evtushenko G.S., Kazaryan M.A., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyarov D.V. High-speed luminance amplifiers on induced transitions in metal vapors (Skorostnye usiliteli yarkosti na indutsirovannykh perekhodakh v parakh metallov). Tomsk: STT Publ., 2016; 245 p. (in Russ).

Транслитерация по BSI

