



Неразрушающий контроль изделий из пластика посредством активной термографии при импульсном лазерном нагреве

Е. В. Кузнецов, П. Ю. Лобанов, И. С. Мануйлович,
М. Н. Мешков, О. Е. Сидорюк, Л. А. Скворцов
АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

В статье показаны возможности неразрушающего контроля подповерхностной структуры различных объектов методом импульсной термографии. Представлен ряд примеров, и проведен анализ их структуры. Метод включает нагрев поверхности объекта лазерным излучением и пирометрическое исследование локальных изменений температуры поверхности. Информация извлекается из результатов термографии, полученных как в течение принудительного нагрева, так и во время последующего охлаждения образца. Основное внимание в статье уделено деталям, выполненным из пластмасс, применяемых в качестве конструкционных материалов в широком круге изделий.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, подповерхностная структура, лазерный нагрев, активная термография

Статья получена: 15.06.2021

Статья принята к публикации: 19.08.2021

ВВЕДЕНИЕ

В многочисленных работах по неразрушающему контролю подповерхностной структуры различных объектов заметное внимание уделяется методу импульсной термографии, который

Non-Destructive Control of Plastic Products by Means of Active Thermography With Pulse Laser Heating

E. V. Kuznetsov, P. Yu. Lobanov, I. S. Manuylovich,
M. N. Meshkov, O. E. Sidoryuk, L. A. Skvortsov M. F. Stelmakh
Research Institute «Polyus» JSC, Moscow, Russia

The article shows the possibilities of non-destructive testing of the subsurface structure of various objects by means of pulse thermography technique. A number of examples are presented and their structure is analyzed. The technique includes heating the surface of an object with laser radiation and pyrometric investigation of local changes in surface temperature. Information is extracted from thermography results obtained both during forced heating and during subsequent cooling of the sample. The main attention in the article is paid to parts made of plastics used as structural materials in a wide range of products.

Key words: non-destructive testing, subsurface structure, laser heating, active thermography

Received on: 15.06.2021

Accepted on: 19.08.2021

INTRODUCTION

In numerous researches on non-destructive testing of the subsurface structure of various objects, noticeable attention is paid to the pulse thermography technique, which consists in pyrometric recording of surface temperature changes under conditions of forced heating and during subsequent cooling [1, 2]. Differences in thermal diffusion in different parts of the sample due to the peculiarities of the structure and its inhomogeneities form a picture of the object, which reflects the nature, composition and location of individual components of the inner subsurface layer.



заключается в пирометрической регистрации изменений температуры поверхности в условиях принудительного ее нагрева и во время последующего охлаждения [1, 2]. Отличия термодиффузии в разных местах образца из-за особенностей структуры и ее неоднородностей формируют картину объекта, которая отражает характер, состав и расположение отдельных компонентов внутреннего подповерхностного слоя.

Современные возможности математического моделирования нагрева образцов со встроенной неоднородностью позволяют производить количественный анализ отклика поверхности, подвергнутой импульсному нагреву. Результаты расчетов для объектов с разной структурой поверхностного слоя могут быть взяты за основу при интерпретации термографических изображений, получаемых экспериментально. Прогресс в области численных методов анализа нестационарных процессов теплопереноса обеспечивает возможности распространения импульсной термографии на исследование широкого круга объектов, различных по свойствам и назначению.

Одновременно развитию этого метода способствуют достижения в производстве ИК-видеокамер, повышения их чувствительности, разрешения и быстродействия. Снижение цен этих изделий делает доступным применение термографических исследований все в более широких областях.

Появление новых технических средств импульсного нагрева образцов также открывает новые возможности ИК-термографии в решении прикладных задач неразрушающего контроля. В частности, заслуживает внимания бурный рост количества предлагаемых полупроводниковых источников света и значительное увеличение их мощности. На сегодняшний день интенсивность излучения коммерческих светодиодов и полупроводниковых лазеров достаточна для эффективного нагрева облучаемой поверхности в различных приложениях метода активной термографии. При этом дополнительными преимуществами являются возможности удаленного воздействия и его пространственной локализации, временной модуляции и необходимой синхронизации импульсов, выбора оптимального спектрального диапазона излучения.

В настоящей работе рассмотрены примеры практических приложений метода активной термографии для анализа скрытой структуры объектов при использовании импульсного нагрева лазерным излучением. Основное внимание

Modern possibilities of mathematical modeling of heating samples with built-in inhomogeneity make it possible to quantitatively analyze the response of a surface subjected to pulsed heating. The results of calculations for objects with different structures of the surface layer can be taken as a basis for interpreting thermographic images obtained experimentally. The progress in the field of numerical methods for the analysis of non-stationary heat transfer processes provides the possibility of extending pulse thermography to the study of a wide range of objects, different in properties and purpose.

At the same time, the development of this technique is facilitated by advances in the production of infrared video cameras, increasing their sensitivity, resolution and speed. The decline in the prices of these products makes the use of thermographic research available in increasingly wide areas.

The emergence of new technical means of pulse heating of samples also opens up new possibilities of IR thermography in solving applied problems of non-destructive testing. In particular, the rapid growth in the number of proposed semiconductor light sources and a significant increase in their power deserve attention. Today, the radiation intensity of commercial LEDs and semiconductor lasers is sufficient for efficient heating of the irradiated surface in various applications of the active thermography technique. In this case, additional advantages are the possibility of remote exposure and its spatial localization, temporal modulation and the necessary synchronization of pulses, and the choice of the optimal spectral range of radiation.

In this paper, we consider examples of practical applications of the active thermography technique for analyzing the hidden structure of objects using pulse heating by laser radiation. The main attention is paid to samples of plastics used as structural materials in mechanical engineering, chemical industry, medicine, etc.

MATHEMATICAL MODELING

Techniques for calculating the surface temperature of an object under study in conditions of its heating by external radiation are well known to those skilled in the art [2]. In this case, the specific features of the internal structure of the sample and the set of its thermophysical characteristics determine the characteristic pattern of the thermal field of the surface and the dynamics of its change in time both during the period of exposure to radiation and during



уделено образцам из пластмасс, применяемых в качестве конструкционных материалов в машиностроении, химической промышленности, медицине и т. д.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Методики расчета температуры поверхности исследуемого объекта в условиях его нагрева внешним излучением хорошо известны специалистам [2]. При этом конкретные особенности внутренней структуры образца и набор его теплофизических характеристик определяют характерную именно для него картину теплового поля поверхности и динамику ее изменения во времени как в период воздействия излучения, так и при остывании. Задача математического моделирования состоит в расчете реакций объекта на внешнее воздействие для всего спектра возможных вариантов его внутренней структуры. Сопоставление итогов таких расчетов с экспериментальными данными ИК-термографии является основой для выводов о внутреннем строении изучаемых деталей.

При рассмотрении образца с плоской фронтальной поверхностью система координат выбирается таким образом, что лазерное излучение воздействует перпендикулярно ей вдоль оси z в положительном направлении, а координата плоскости равна $z=0$.

Распределение температуры $T(x, y, z, t)$ в образце подчиняется уравнению теплопроводности, которое имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, C – удельная теплоемкость материала, k – коэффициент теплопроводности. Начальное условие в рассматриваемом случае соответствует постоянному значению температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

Лазерный нагрев моделируется заданным потоком тепла через переднюю поверхность, что соответствует граничному условию второго рода:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(t), \quad (3)$$

где $q(t)$ – функция плотности мощности поглощенного лазерного излучения, имеющая вид:

$$q(t) = \begin{cases} \alpha \cdot W_p, & t < \tau \\ 0, & t \geq \tau \end{cases},$$

cooling. The task of mathematical modeling is to calculate the reactions of an object to an external influence for the entire spectrum of possible variants of its internal structure. Comparison of the results of such calculations with the experimental data of IR thermography is the basis for conclusions about the internal structure of the studied parts.

When considering a sample with a flat frontal surface, the coordinate system is selected in such a way that the laser radiation acts perpendicular to it along the z axis in the positive direction, and the plane coordinate is $z=0$.

The temperature distribution $T(x, y, z, t)$ in the sample obeys the heat conduction equation, which has the form:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

where ρ is the density of the material, C is the specific heat of the material, k is the coefficient of thermal conductivity. The initial condition in the case under consideration corresponds to a constant temperature value:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

Laser heating is simulated by a given heat flux through the «front» surface, which corresponds to the boundary condition of the second kind:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(t), \quad (3)$$

where $q(t)$ is the power density function of the absorbed laser radiation, which has the form

$$q(t) = \begin{cases} \alpha \cdot W_p, & t < \tau \\ 0, & t \geq \tau \end{cases},$$

where W is the power density of laser radiation, α is the absorption coefficient, and τ is the time of laser exposure. On the remaining surfaces of the sample, a boundary condition of the second kind is set, corresponding to thermal insulation:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = 0, \quad (4)$$

where n is the normal to the surface S of the sample.

Equation (1) together with the initial condition (2) and boundary conditions (3,4) is the Neumann problem, which is solved numerically using a finite element numerical scheme on a tetrahedral computational grid. The numerical solution uses a standard library for solving sparse systems of linear algebraic equations.

где W – плотность мощности лазерного излучения, α – коэффициент поглощения, τ – время лазерного воздействия. На остальных поверхностях образца выставляется граничное условие второго рода, соответствующее теплоизоляции:

$$\frac{\partial T}{\partial n_s} = 0, \quad (4)$$

где n – нормаль к поверхности S образца.

Уравнение (1) совместно с начальным условием (2) и граничными условиями (3, 4) представляет собой задачу Неймана, которая решается численно с использованием конечно-элементной численной схемы на тетраэдрической расчетной сетке. При численном решении используется стандартная библиотека для решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений.

На рис. 1 в качестве примеров представлены расчетные распределения поверхностных температур для двух деталей из АБС-пластика, сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом ($\rho=1040$ кг/м³; $k=0,258$ Дж/м·с·К; $C=1720$ Дж/кг·К), который широко применяется в конструировании объектов сложной формы посредством аддитивных технологий. Первый образец представляет собой пластину толщиной 30 мм с пазами шириной 12 мм и различной глубиной от 29 до 25 мм (в последовательности с интервалом 1 мм для позиций от a до e), а второй – блок той же толщины с отверстиями диаметром 12 мм и аналогичным распределением по их глубине.

Рисунки отражают динамику процессов остывания деталей после предварительного нагрева поверхности импульсом лазерного излучения длительностью 60 с. При этом для первого образца запечатлены фрагменты (от 1 до 10), следующие друг за другом с интервалом 60 с, а для второго представлена аналогичная последовательность термограмм через каждые 40 с. Существенно, что наблюдаемые модуляции температурного поля для каждого фрагмента нормированы независимо.

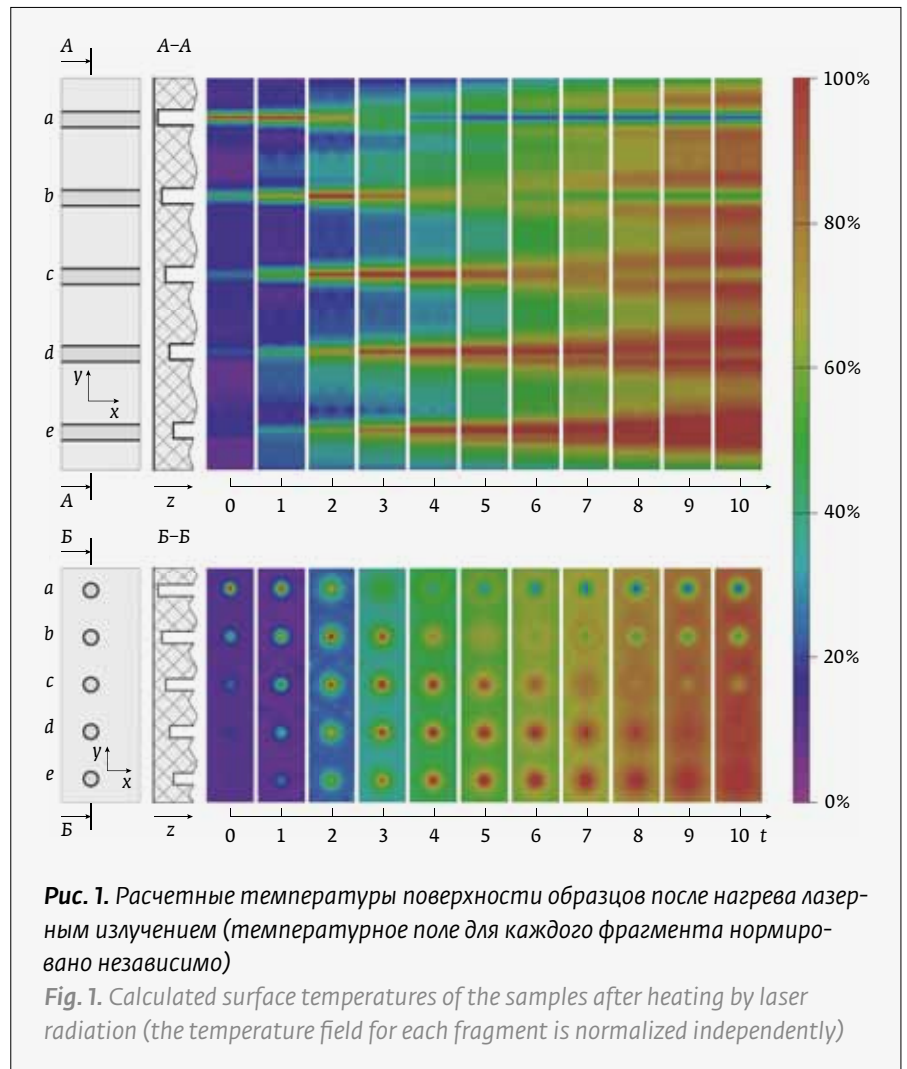


Рис. 1. Расчетные температуры поверхности образцов после нагрева лазерным излучением (температурное поле для каждого фрагмента нормировано независимо)

Fig. 1. Calculated surface temperatures of the samples after heating by laser radiation (the temperature field for each fragment is normalized independently)

Fig. 1 shows, as examples, the calculated distributions of surface temperatures for two parts made of ABS plastic, a copolymer of acrylonitrile with butadiene and styrene ($\rho=1040$ kg/m³; $k=0.258$ J/m·s·K; $C=1720$ J/kg·K), which is widely used in the design of objects of complex shapes using additive technologies. The first sample is a 30 mm thick plate with 12 mm wide slots and varying depths from 29 to 25 mm (in sequence at 1 mm intervals for positions a to e), and the second is a block of the same thickness with 12 mm diameter holes and similar distribution over their depth.

The figures reflect the dynamics of the cooling processes of parts after preliminary heating of the surface by a laser pulse with a duration of 60 s. In this case, for the first sample, fragments (from 1 to 10) are captured, following each other with an interval of 60 s, and for the second, a similar sequence of thermograms is shown every 40 s. It is essential that the observed modulations of the temperature field for

Если в каждый i -ый момент времени локальные температуры T^i находятся в диапазоне от минимальных значений T_{min}^i до максимальных T_{max}^i , то величины относительных неоднородностей их распределения могут быть выражены как

$$\Delta T_{norm}^i = \frac{(T^i - T_{min}^i)}{(T_{max}^i - T_{min}^i)} \cdot 100\% \quad (5)$$

и показаны с использованием цветовой шкалы, представленной справа на рис. 1.

Более тонкие поверхностные слои (позиции 1а) первоначально оказываются нагретыми до более высоких температур (отображаются красным цветом), однако быстрее остывают, что на рис. 1 отражается смещением окраски в синюю область спектра. С течением времени наблюдается перераспределение относительных изменений температур в локальных зонах. Неразличимые первоначально отстоящие дальше от поверхности нарушения целостности материала могут быть обнаружены при регистрации термограмм с временной задержкой, оптимальная величина которой определяется его теплофизическими характеристиками.

Хотя рис. 1 иллюстрирует результат моделирования процессов активной термографии для одного из материалов, в частности АБС-пластика, аналогичные результаты характерны и для других случаев с соответствующей корректировкой временной шкалы рассматриваемых явлений. Например, для полиэтилена высокого давления (ПВД) остывание образцов описанной выше геометрии протекает в среднем быстрее на 20% из-за более высокой теплопроводности.

Отметим также, что в общем случае отличия термодиффузии в разных областях могут формировать и более сложную картину исследуемого объекта. Использование инструментов математического моделирования позволяет выбрать условия максимальной ее контрастности с последующей расшифровкой состава и расположения отдельных компонентов внутреннего подповерхностного слоя.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Общий вид экспериментальной установки, используемой для неразрушающего контроля изделий из пластика посредством активной термографии, представлен схематично на рис. 2.

Исследуемый образец (1) подвергается нагреву с использованием лазерных источников, имеющих оптоволоконные выходы излучения (2).

each fragment are normalized independently. If at each i -th moment of time the local temperatures T^i are in the range from the minimum values T_{min}^i to the maximum ones T_{max}^i , then the values of the relative inhomogeneities of their distribution can be expressed as

$$\Delta T_{norm}^i = \frac{(T^i - T_{min}^i)}{(T_{max}^i - T_{min}^i)} \cdot 100\% \quad (5)$$

and shown using the color scale shown on the right in Fig. 1.

Thinner surface layers (positions 1а) are initially heated to higher temperatures (displayed in red), but they cool faster, which is reflected in Fig. 1 by a shift in color to the blue area of the spectrum. Over time, a redistribution of relative temperature changes in local zones is observed. Indistinguishable, initially farther from the surface, violations of the integrity of the material can be detected when recording thermograms with a time delay, the optimal value of which is determined by its thermophysical characteristics.

Although Fig. 1 illustrates the result of modeling active thermography processes for one of the materials, in particular, ABS plastic, similar results are typical for other cases with a corresponding adjustment to the time scale of the phenomena under consideration. For example, for low density polyethylene (LDPE), the cooling of the samples of the geometry described above proceeds on average 20% faster due to the higher thermal conductivity.

We should also note that in general case the differences of thermal diffusion in different areas can form a more complex picture of the investigated object. The use of mathematical modeling tools allows us to select the conditions for its maximum contrast, followed by decoding of the composition and location of individual components of the inner subsurface layer.

TECHNICAL MEANS OF LASER THERMOGRAPHY

A general view of the experimental setup used for non-destructive testing of plastic products by means of active thermography is shown schematically in Fig. 2.

The sample under study (1) is heated using laser sources with fiber-optic radiation outputs (2). The temperature distributions of its surface are recorded by means of a thermal imager (3) both during exposure to laser radiation and during cooling of the observed object. In this case, a continuous analysis of thermograms and their temporal dynamics

Распределения температуры его поверхности регистрируются посредством тепловизора (3) как во время воздействия лазерного излучения, так и в процессе охлаждения наблюдаемого объекта. При этом производится непрерывный анализ термограмм и их временной динамики посредством компьютера (4), который одновременно управляет электронным блоком (5), задающим параметры лазерного излучения и длительность нагрева.

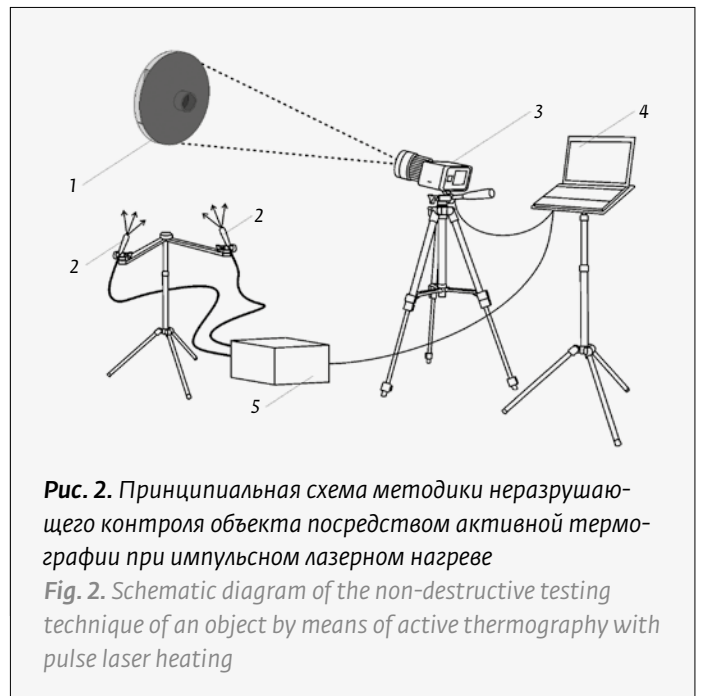
В настоящей работе использовались модули на основе сборок лазерных диодов общей мощностью до 300 Вт, излучающие в области 915 нм. Сопряженные с ними оптоволоконные кабели на выходе имели оптические блоки, формирующие поле излучения в плоскости исследуемого образца. С целью обеспечения равномерности нагрева объектов больших размеров использовались источники лазерного излучения с несколькими оптоволоконными выходами. В этих случаях также дополнительно применялась пространственная развертка лазерного пучка с частотой 10 Гц посредством электромеханического сканатора. При этом юстировкой достигалась однородность засветки посредством наблюдений с видеокамерой в ближнем ИК-диапазоне (на рисунке не показана). Существенно, что оптоволоконный кабель одновременно являлся эффективным фильтром от теплового излучения активных областей лазерных диодов, претерпевающих естественный нагрев в процессе работы.

Регистрации теплового излучения от образца производились посредством цифровой видеокамеры FLIR Tau2 с чувствительностью 0,05 °C и частотой кадров 30 Гц.

Специальная компьютерная программа использовалась для анализа термограмм и презентации результатов их обработки.

КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ РЕБЕР И ПОЛОСТЕЙ

Исследования, основанные на термографии поверхности детали при ее нагреве излучением и в период последующего остывания, позволяют производить анализ подповерхностной структуры, обнаруживать наличие внутри объекта ребер и полых областей, определяя их основные геометрические характеристики. Актуальность такого контроля возрастает в связи с расширением ассортимента изделий из пластмасс, усложнением их конструкций благодаря развитию технологий производства полимерных материалов и деталей на их основе.



is carried out by means of a computer (4), which simultaneously controls an electronic unit (5), which sets the parameters of laser radiation and the duration of heating.

In this paper, we used modules based on laser diode assemblies with a total power of up to 300 W, emitting in the 915 nm area. The fiber optic cables associated with them had optical blocks at the output, which form the radiation field in the plane of the sample under study. In order to ensure uniform heating of large objects, laser radiation sources with several fiber-optic outputs were used. In this case, the alignment achieved uniformity of illumination by observing with a video camera in the near infrared range (not shown in the figure). It is essential that the fiber-optic cable simultaneously served as an effective filter against thermal radiation from the active areas of laser diodes, which undergo natural heating during operation.

Thermal radiation from the sample was recorded using a FLIR Tau2 digital video camera with a sensitivity of 0.05 °C and a frame rate of 30 Hz.

A special computer program was used to analyze the thermograms and present the results of their processing.

INNER FINNS AND CAVITIES CONTROL

Studies based on thermography of the surface of a part when it is heated by radiation and during the period of subsequent cooling, make it possible to analyze the subsurface structure, detect the presence of fins

Большие возможности для новых приложений активной термографии связаны с прогрессом в области аддитивных технологий, формованием различных деталей из пластика посредством 3D печати. Среди изделий со сложной внутренней структурой заметное место занимают различные акустические детали с множеством полых резонаторов [3], антенны и пассивные элементы в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения [4], крыльчатки насосов для перекачки жидкостей и воздушных вентиляторов [5] и т. д.

Примеры анализа аналогичных изделий представлены на рис. 3 и рис. 4.

Деталь на рис. 3 имеет внутренние ребра, которые отражены на фотографии ее обратной стороны (рис. 3а). В то же время ее лицевая сторона представляет собой ровную плоскую поверхность. Материалом служит ПВД-пластик черного цвета.

При необходимости контроля структуры образца со стороны передней поверхности, когда внутренняя структура недоступна для наблюдения, решение задачи может быть обеспечено применением метода активной термографии. Результат иллюстрирует рис. 3б, на котором представлен вид фронтальной плоскости детали в инфракрасном диапазоне после того, как она была подвергнута кратковременному воздействию лазерного излучения.

Оптическая система формировала поле равномерной засветки исследуемой области с плотностью мощности до $0,3 \text{ Вт/см}^2$. Регистрация теплового излучения от образца производилась с помощью цифровой видеокамеры по окончании лазерного воздействия длительностью 7 с. Предварительные исследования показали, что такая величина периода нагрева соответствует максимальной контрастности термограммы. Уменьшение времени нагрева приводит к снижению интенсивности теплового излучения, а увеличение времени нагрева неоправданно из-за размытия очертаний внутренней структуры исследуемого образца.

На поверхности областей, сопряженных с внутренними

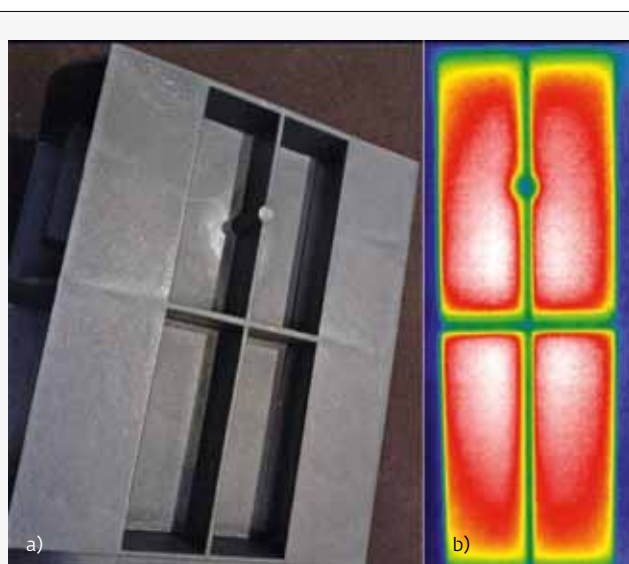


Рис. 3. Результаты анализа изделия из ПВД-пластика методом активной термографии: а) – обратная сторона контролируемой детали с полыми областями и разделяющими их ребрами; б) – термограмма, регистрируемая тепловой видеокамерой на фронтальной поверхности изделия после воздействия на нее импульса лазерного излучения

Fig. 3. Results of the analysis of a product made of LDPE plastic by the active thermography technique: a) – the reverse side of the controlled part with hollow areas and fins separating them; b) – thermogram recorded by a thermal video camera on the front surface of the product after exposure to a laser pulse

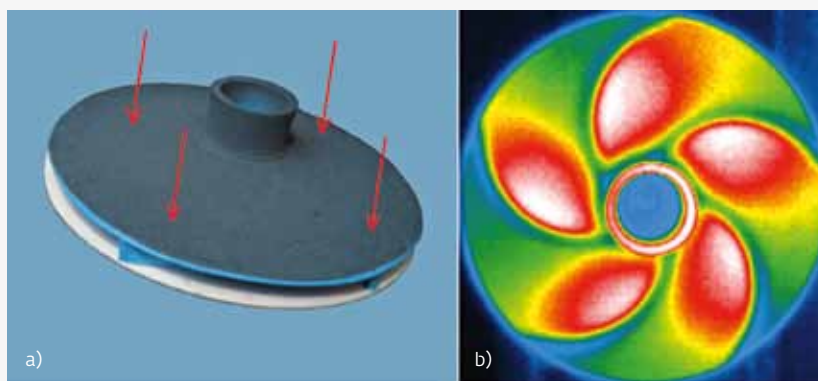


Рис. 4. Контроль внутренней структуры крыльчатки посредством активной термографии: а) – внешний вид детали (стрелками показано лазерное излучение), б) – термограмма, регистрируемая тепловой видеокамерой после нагрева лазерным импульсом

Fig. 4. Inspection of the internal impeller structure by active thermography: a) – view of the part (arrows show laser radiation), b) – thermogram recorded by a thermal video camera after heating by a laser pulse

ребрами, в силу более эффективной теплоотдачи, температура оказывается ниже. Согласно принятой цветовой шкале (см. рис. 1), они имеют синюю окраску и контрастно выделяются на фоне красных зон, лишенных теплоотвода в материал из-за наличия обширных полостей.

А на рис. 4 представлен аналогичный результат контроля лопастей крыльчатки из АБС-пластика для водяного насоса. Они являются частью внутренней структуры, закрытой для визуального наблюдения. При этом технические средства активной термографии, режимы воздействия и параметры анализа использованы те же, что и в предыдущем примере.

Естественно, вопрос интерпретации полученных термограмм не вызывает затруднений лишь при относительно простой конструкции исследуемого изделия. В более сложных случаях расшифровка экспериментальных данных, как указывалось выше, может производиться посредством многоступенчатого сопоставления термограмм для расчетных моделей с прогнозируемой структурой и последовательностью возможных от нее отклонений. Однако часто может оказаться более рационален подход, основанный на оценке контролируемого объекта посредством сравнения его термограмм (рис. 5а) с аналогичными для контрольного образца (рис. 5б), получаемыми при тех же условиях лазерного воздействия. Результат разностного анализа цифровых изображений представлен на рис. 5с и выявляет отличия, характерные для исследуемой детали.

В частности, пример на рис. 5 отражает обнаружение структурного дефекта (пузыря) в приповерхностной области. Такая диагностика может быть востребована в условиях производства однотипных деталей для выявления брака.

КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РЕМОНТНЫХ РАБОТ

Методики контроля изделий из полимерных материалов, основанные на применении лазерной активной термографии, могут быть успешно использованы для проверки качества сварных соединений.

В частности, они оказываются эффективными при оценке результатов точечной ультразву-

and hollow areas inside the object, and determine their main geometric characteristics. The relevance of such control is increasing due to the expansion of the range of plastic products, the complication of their designs due to the development of technologies for the production of polymeric materials and parts based on them.

Great opportunities for new applications of active thermography are associated with the progress in the field of additive technologies, the shaping of various plastic parts through 3D printing. Among products with a complex internal structure, a prominent place is occupied by various acoustic parts with many hollow resonators [3], antennas and passive elements in the microwave range of electromagnetic radiation [4], impellers of pumps for pumping liquids and air fans [5], etc.

Examples of analysis of similar products are shown in Fig. 3. and Fig. 4.

The detail in Fig. 3 has internal fins, which are reflected in the photograph of its reverse side (Fig. 3a). At the same time, its front side is a flat, flat surface. The material is black LDPE plastic.

If it is necessary to control the structure of the sample from the front surface, when the internal structure is inaccessible for observation, the solution to the problem can be ensured by using the active thermography technique. The result is illustrated in Fig. 3b., Which shows the frontal plane of the part in the infrared range after it has been exposed to short-term exposure to laser radiation.

The optical system formed a field of uniform illumination of the investigated area with a power

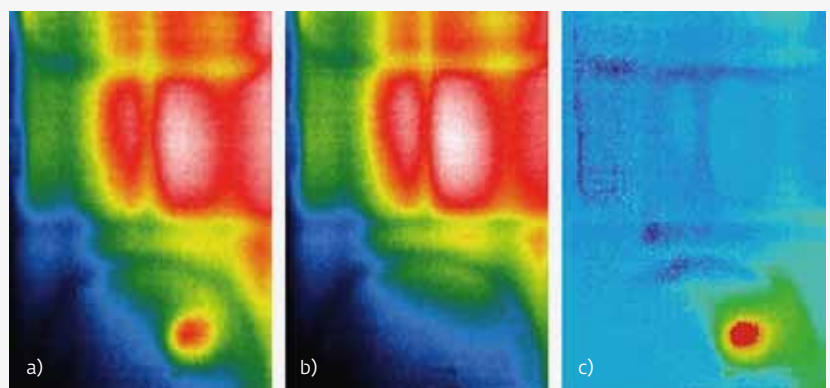


Рис. 5. Сравнительный анализ цифровых изображений: а) – термограмма исследуемой детали, б) – термограмма контрольного образца, в) – разностный результат.

Fig. 5. Comparative analysis of digital images: a) – thermogram of the investigated part, b) – thermogram of the control sample, c) – difference result.

ковой сварки. Такой пример отражен на рис. 6. Термограмма представляет фрагмент образца, где внахлест соединены два листа ПВД толщиной 2,5 мм. Средний диаметр отдельного сварного соединения составляет 5 мм.

Результат с наибольшей контрастностью зафиксирован через 5 с после прекращения воздействия на поверхность изделия в течение 10 с лазерного излучения с длиной волны 915 нм и плотностью мощности 0,3 Вт/см². На термограмме при этом выявляются различия в качестве соединения материала на различных участках исследуемого шва: дефектные зоны (5 и 8 на рис. 6) оказываются нагретыми до более высоких температур в сравнении с аналогичными (1-4, 6-7) в условиях хорошего контакта.

Лазерная активная термография может быть также использована для регистрации скрытых швов на деталях из пластика, применяемых в ремонтных работах для ликвидации трещин посредством наплавки присадочного прутка из того же материала. Проявление их на лицевой стороне детали аналогично наблюдаемому для изделий с наличием внутренних ребер и уже описано выше.

Обсуждаемый метод является эффективным инструментом контроля и ряда других видов ремонтных работ, производимых на деталях из полимерных материалов. Один из примеров представлен на рис. 7. В качестве образца служит пластиковый задний бампер автомобиля с вмятиной в левом углу после аварии (рис. 7а). После ремонта деталь не имеет дефектов, которые могли бы быть обнаружены визуально (рис. 7б), но они выявляются посредством активной лазерной термографии.

Изменением длительности нагрева и времени охлаждения можно добиваться максимальной контрастности термографического изображения. Оптимальный результат представлен на рис. 7с – это изображение, регистрируемое тепловизором через 20 с после прекращения лазерного воздействия с плотностью мощности 0,2 Вт/см² продолжительностью 8 с. Отчетливо проявляются скрытые дефекты. Их регистрация раскрывает аварийную историю исследуемой детали.

Использование описанного метода повышает возможности диагностики компонентов корпуса автомобиля. Его преимущество будет становиться более значимым с расширением в автомобилях ассортимента неметаллических деталей. Кроме того, аналогично он может быть эффективен при анализе подобных деталей корпусов

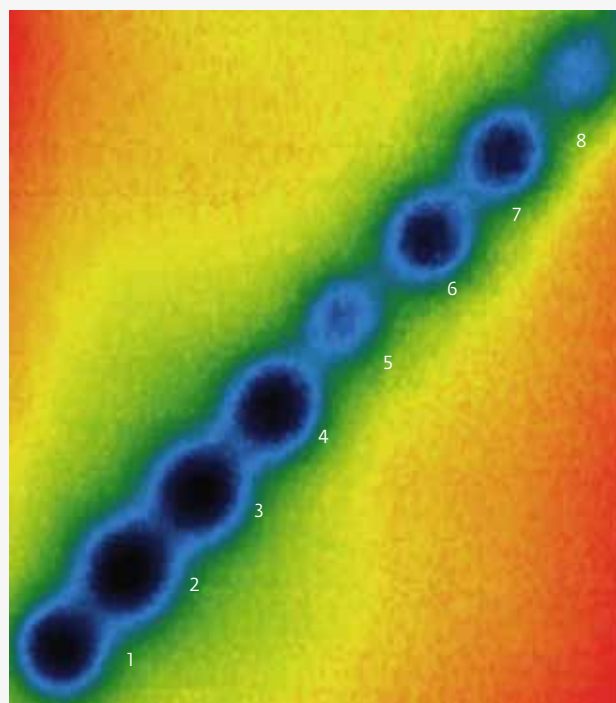


Рис. 6. Применение лазерной активной термографии для контроля качества соединения пластиков посредством точечной ультразвуковой сварки

Fig. 6. Application of laser active thermography for quality control of plastics joining by means of ultrasonic spot welding

density of up to 0.3 W/cm². Registration of thermal radiation from the sample was carried out using a digital video camera at the end of the laser exposure lasting 7 seconds.

On the surface of the areas conjugated with the inner fins, due to the more efficient heat transfer, the temperature turns out to be lower. According to the accepted color scale (see Fig. 1), they are blue in color and stand out in contrast against the background of red zones, which are devoid of heat removal into the material due to the presence of extensive cavities.

And Fig. 4 shows a similar result of monitoring the impeller blades made of ABS plastic for a water pump. They are part of an internal structure that is closed to visual observation. In this case, the technical means of active thermography, exposure modes and analysis parameters were used the same as in the previous example.

Naturally, the question of interpreting the obtained thermograms does not cause difficulties only with a relatively simple design of the

18–21.10.2021



В рамках проекта «Наука-Технологии-Инновации Экспо»
международная политехническая выставка

ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.technoforum-expo.ru

Организатор

 **ЭКСПОЦЕНТР**

При поддержке:

- Государственной Думы Федерального Собрания РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ

Реклама



**«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»**

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

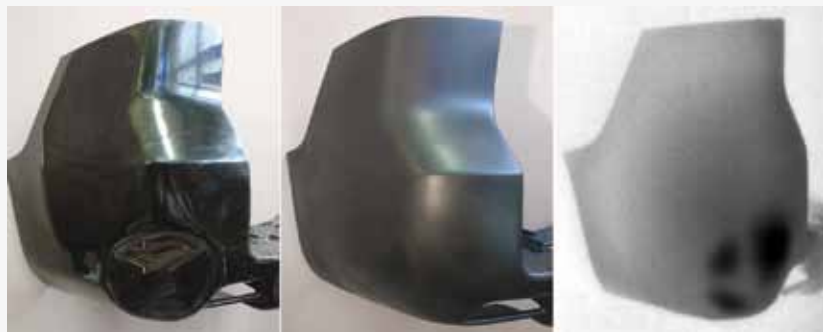


Рис. 7. Применение лазерной активной термографии для выявления скрытых дефектов реставрированной детали кузова автомобиля

Fig. 7. Use of laser active thermography to detect hidden defects in a restored car body part

воздушного и водного транспорта, иных изделий из пластика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведен ряд примеров использования активной термографии для анализа внутренней структуры деталей из пластика. В рамках известных и широко используемых подходов [1,2] акцент сделан на демонстрации методик с применением лазерного нагрева поверхности. Существенно, что появление эффективных источников лазерного излучения относительно невысокой стоимости дает новые импульсы развитию этого направления неразрушающего контроля. В связи с этим метод имеет хорошие перспективы широкого применения в промышленности и других отраслях.

Дополнительные возможности открываются с использованием дистанционного контроля, недостижимого в той же степени при других вариантах активной термографии.

Сопряжение источников излучения с оптоволоконными элементами позволяет полностью исключать помехи отражений побочных источников теплового излучения, наличие которых приходится учитывать в активной термографии с иными средствами нагрева поверхности.

Достижению той же цели способствует и необходимая в ряде случаев локализация воздействия на исследуемый образец для исключения помех от сторонних окружающих объектов. Правда, эта особенность лазерного воздействия может иметь и негативный эффект при исследовании крупногабаритных деталей. Очевидно, что неравномерность плотности лучистой энергии, совмещенная

исследованного продукта. В более сложных случаях, декодирование экспериментальных данных, как указано выше, может быть выполнено с помощью многоступенчатого сравнения термограмм для вычисления модели с предсказанной структурой и последовательности возможных отклонений от нее. Однако, в частности, подход, основанный на оценке контролируемого объекта путем сравнения его термограмм (рис. 5а) с аналогичными для контрольного образца (рис. 5б), полученными в одинаковых условиях лазерного облучения, может оказаться более рациональным. Результат дифференциального анализа цифровых изображений показан на рис. 5с и выявляет различия, характерные для исследуемого объекта.

В частности, пример на рис. 5 отражает обнаружение структурного дефекта (пузырька) в поверхностной области. Такие диагностики могут быть востребованы в условиях производства аналогичных изделий для выявления дефектов.

В частности, пример на рис. 5 отражает обнаружение структурного дефекта (пузырька) в поверхностной области. Такие диагностики могут быть востребованы в условиях производства аналогичных изделий для выявления дефектов.

INSPECTION OF WELDED CONNECTIONS AND REPAIR WORKS

Техники для проверки изделий, изготовленных из полимерных материалов с помощью лазерной активной термографии, могут успешно использоваться для проверки качества сварных соединений.

В частности, они оказываются эффективными при оценке результатов ультразвуковой точечной сварки. Такой пример показан на рис. 6. Термограмма представляет фрагмент образца, где два листа ЛДПЭ толщиной 2,5 мм перекрываются. Средний диаметр отдельного сварного шва составляет 5 мм.

Результат с самым высоким контрастом был зафиксирован через 5 секунд после прекращения облучения поверхности изделия на протяжении 10 секунд лазерным излучением с длиной волны 915 нм и мощностью 0,3 Вт/см². В то же время термограмма выявляет различия в качестве соединения материала в различных участках сварки: дефектные зоны (5 и 8 на рис. 6) оказались нагретыми до более высоких температур по сравнению с аналогичными (1-4, 6-7) в условиях хорошего контакта.

Лазерная активная термография может также использоваться для регистрации скрытых швов на пластиковых деталях, применяемых в ремонтных работах для устранения трещин путем нанесения наполнителя.

weldex

россварка

21-я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ

12-15
ОКТАБРЯ 2021

МОСКВА
МВЦ
КРОКУС ЭКСПО

ПОЛУЧИТЕ БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ ПО ПРОМОКОДУ
wlx21i0NTU

WELDEX.RU

0+

+7 (499) 750-08-28
weldex@hyve.group

Официальная
поддержка:



Генеральный
информационный
партнер:



Журнал
«Сварочное производство»





с дефектами контролируемой структуры, способна внести ошибку в получаемый результат.

В этом вопросе решение заключается в обеспечении равномерности средней плотности мощности если не по всей поверхности образца, то по крайней мере в области, заметно превышающей характерные размеры исследуемых особенностей подповерхностной структуры. В описанных выше примерах деталей на рис. 2 (размером 10×17 см) и рис. 3 (диаметром 13 см) нетрудно обеспечивается равномерность облучения разведением лазерного пучка. А в случае контроля качества шва точечной сварки (рис. 6) такая цель вообще не ставится. Процесс контроля разбивается на последовательность отдельных стандартных процедур термографического анализа при дискретных сдвигах вдоль линии сварки. Фактически лазерному пучку при этом достаточно иметь равномерность интенсивности в областях, соразмерных с длиной в несколько шагов, характерных для исследуемого соединения листов пластика посредством точечной сварки.

Еще более упрощается задача пространственной однородности лазерного нагрева при использовании алгоритмов разностного анализа (рис. 5), если обеспечены одинаковые условия лазерного воздействия на исследуемый образец и контрольный образец сравнения. Понятно, что итоговая картина замеченных структурных отклонений при этом не может быть искажена особенностями пространственного распределения плотности мощности в сечении тестирующего лазерного пучка.

Наконец, в случае крупногабаритной детали (рис. 7) хороший результат достигается применением пространственного сканирования лазерных пучков по исследуемой поверхности при настройке однородности результирующего светового воздействия посредством видеокамеры ближнего ИК-диапазона с соответствующим по кадровым усреднением. В условиях медленных процессов теплопередачи относительно высокая частота развертки 10 Гц обеспечивает идентичность наблюдаемого результата соответствующему при однородном пространственном распределении и той же средней плотности мощности лазерного излучения. Существенно, что эта процедура применима для образцов любой формы.

Таким образом, активная термография с применением лазерного излучения для нестационарного нагрева поверхности имеет ряд преимуществ и может быть успешно использована для

the same material. Their manifestation on the front side of the part is similar to that observed for products with the presence of internal fins and has already been described above.

The discussed technique is an effective tool for control and a number of other types of repair work performed on parts made of polymer materials. One example is shown in Fig. 7. As a sample, a plastic rear bumper of a car with a dent in the left corner after an accident serves as a sample (Fig. 7a). After repair, the part has no defects that could be detected visually (Fig. 7b), but they are detected by active laser thermography. Figure 7c shows an image recorded by a thermal imager 20 seconds after the termination of laser exposure with a power density of 0.2 W/cm² for 8 seconds. Hidden defects are clearly visible. Their registration reveals the emergency history of the investigated part.

Using the described technique increases the diagnostic capabilities of vehicle body components. Its advantage will become more significant as the range of non-metallic parts in automobiles expands. In addition, it can be similarly effective in the analysis of similar parts of the hulls of air and water transport, and other plastic products.

CONCLUSION

This paper provides a number of examples of using active thermography to analyze the internal structure of plastic parts. Within the framework of well-known and widely used approaches [1, 2], the emphasis is placed on demonstrating techniques using laser surface heating. It is essential that the appearance of efficient sources of laser radiation of relatively low cost gives new impulses to the development of this direction of non-destructive testing. In this regard, the technique has good prospects for widespread use in industry and other industries.

Additional possibilities are opened up with the use of remote control, which is equally unattainable with other types of active thermography.

Coupling of radiation sources with fiber-optic elements makes it possible to completely exclude interference from reflections of secondary sources of thermal radiation, the presence of which must be taken into account in active thermography with other means of surface heating. The achievement of the same goal is also facilitated by the localization of the impact on the sample under study, which is necessary in some cases, in order to exclude interference from third-party surrounding objects. And the additional equipment of the laser source with a radiation scanning system is able to ensure the

RUS WELD

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

18-21.10.21



Международная специализированная выставка
«Оборудование, технологии и материалы
для процессов сварки и резки»

www.rusweld-expo.ru

Организатор



При поддержке



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



Под патронатом



Реклама 12+





анализа подповерхностной структуры различных образцов.

Бурное развитие лазерной техники с появлением новых эффективных излучателей [6] позволяет прогнозировать дальнейший рост потенциальных возможностей лазерной термографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скворцов Л. А.** Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии. – М.: Техносфера. 2017. 218 с. ISBN 978-5-94836-493-3.
2. **Вавилов В. П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр. 2009. 544 с. ISBN 978-5-904270-05-6.
3. **Kumar S., Lee H. P.** Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances. *Crystals*. 2020; 10(8):1–22. DOI:10.3390/cryst10080686.
4. **Харалгин С. В., Куликов Г. В., Котельников А. Б., Снастин М. В., Добычина Е. М.** Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати. *Российский технологический журнал*. 2019; 7(1): 80–101. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101.
5. **Prabha K. A., Rohit P. S., Nitturil S. Ch., Nithin B.** Manufacturing of 3D shrouded impeller of a centrifugal compressor on 3D-printing machine using FDM technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1012(012039):1–7. DOI:10.1088/1757-899X/1012/1/012039.
6. **Скворцов Л. А.** Применение квантово-каскадных лазеров: состояние и перспективы. – М.: Техносфера. 2020. 270 с. ISBN 978-5-94836-608-1.

ОБ АВТОРАХ:

- Е. В. Кузнецов, генеральный директор АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-3489-6805
- П. Ю. Лобанов, ведущий инженер АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-8034-7773
- И. С. Мануйлович, с. н. с. АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-1737-3554
- М. Н. Мешков, инженер I кат. АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-1708-416X
- О. Е. Сидорюк, начальник лаборатории АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-9641-4667
- Л. А. Скворцов, lskvortsov@mail.ru, начальник лаборатории АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-7504-4778

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива: Е. В. Кузнецов – организация работы, обсуждение результатов; П. Ю. Лобанов – проведение экспериментов, обработка результатов; И. С. Мануйлович – математическое моделирование, обработка результатов; М. Н. Мешков – математическое моделирование, обработка результатов; О. Е. Сидорюк – проведение экспериментов, обработка результатов; Л. А. Скворцов – организация работы, обработка и обсуждение результатов.

Разработка и исследования выполнены за счет собственных средств АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании рукописи в части вклада каждого из них в работу и согласны с полным текстом рукописи.

spatial uniformity of illumination over the surface of a sample of any shape.

The rapid development of laser technology with the advent of new efficient emitters [6] makes it possible to predict a further increase in the potential of laser thermography.

REFERENCES

1. **Skvortsov L. A.** Osnovi fototermicheskoi radiometrii i lazernoi termografii. – M.: Technosphaera. 2017. 218 p. (In Russ.). ISBN 978-5-94836-493-3.
2. **Vavilov V. P.** Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'. – M.: Spektr. 2009. 544 p. (In Russ.). ISBN 978-5-904270-05-6.
3. **Kumar S., Lee H. P.** Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances. *Crystals*. 2020; 10(8):1–22. DOI:10.3390/cryst10080686.
4. **Kharalgin S. V., Kulikov G. V., Kotelnikov A. B., Snastin M. V., Dobychina E. M.** Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal (Russian Technological Journal)*. 2019; 7(1): 80–101. (In Russ.). DOI: 10.32362 / 2500-316X-2019-7-1-80-101.
5. **Prabha K. A., Rohit P. S., Nitturil S. Ch., Nithin B.** Manufacturing of 3D shrouded impeller of a centrifugal compressor on 3D-printing machine using FDM technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1012(012039):1–7. DOI:10.1088/1757-899X/1012/1/012039.
6. **Skvortsov L. A.** Primenenie kvantovo-kaskadnih lazerov: sostoyanie i perspektivi. – M.: Technosphaera. 2017. 270 p. (In Russ.). ISBN 978-5-94836-608-1.

ABOUT THE AUTHORS:

- E. V. Kuznetsov, General Director of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-3489-6805
- P. Yu. Lobanov, Leading Engineer of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-8034-7773
- I. S. Manuylovich, Senior Researcher of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-1737-3554
- M. N. Meshkov, First Cat. Engineer of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-1708-416X
- O. E. Sidoryuk, Head of the Laboratory of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-9641-4667
- L. A. Skvortsov, Head of the Laboratory of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-7504-4778

CONTRIBUTION OF THE MEMBERS OF AUTHOR'S TEAM

The article was prepared on the basis of the work of all members of the team of authors: E. V. Kuznetsov – organization of work, discussion of results; P. Yu. Lobanov – conducting experiments, processing the results; I. S. Manuylovich – mathematical modeling, processing of results; M. N. Meshkov – mathematical modeling, processing of results; O. E. Sidoryuk – conducting experiments, processing the results; L. A. Skvortsov – organization of work, processing and discussion of results.

Development and research were carried out at the expense of Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no conflict of interests. All authors took part in the writing of the manuscript in terms of the contribution of each of them to the paper and agree with the full text of the manuscript.



INTERPOLITEX



ЮБИЛЕЙНАЯ
XXV МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СРЕДСТВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА



19–22 ОКТЯБРЯ 2021, МОСКВА, МВЦ «КРОКУС ЭКСПО»

О выставке

Форум

Программа

Заявка

Проект ОВК «БИЗОН»

Официальный партнер
по организации Форума
«Интерполитех: цифровая
трансформация
безопасности государства»



При поддержке



Минцифры
России

СВЯЗИСТ

ФГБУ «Связист» Минцифры
России

WWW.INTERPOLITEX.RU/MAIN



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphere.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru