АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ANALYSIS OF DEFECTS IN CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS USING DIGITAL MICROSCOPE

УДК 67.02, ВАК 05.11.07, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.75.4.52.63

М.Чупов*

M.Chupov*

Использование углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), обладающих уникальными термическими, механическими и эрозионными свойствами, открывает широкие возможности для развития ракетостроения, авиационной, космической и машиностроительной техники, металлургии, судостроения. В настоящей статье рассматривается методика контроля дефектов поверхности углерод-углеродного композиционного материала "Арголон – 4DL" с помощью программно-аппаратного комплекса на базе цифрового микроскопа.

The use of carbon composite materials with unique thermal, mechanical and erosional properties offers great opportunities for the development of rocketry, aviation, space technology, engineering, metallurgy and shipbuilding. This paper considers methodology of control of surface defects in Argolon – 4DL carbon composite material by use of hardware and software system based on digital microscope.

Современные научные достижения создают предпосылки к проектированию и производству принципиально новых и модернизации существующих измерительных комплексов. В частности, благодаря внедрению последних технологических новшеств в ракетно-космической отрасли рутинной задачей становится контроль геометрических дефектов и размеров.

В свою очередь, использование углерод-углеродных, композиционных материалов (УУКМ), обладающих уникальными термическими, механическими и эрозионными свойствами, открывает широкие возможности развития ракетостроения, авиационной, космической и машиностроительной техники, металлургии и судостроения. За счет снижения веса конструкции, УУКМ дают возможность увеличить скорость и дальность полетов ракет, космических и авиационных летательных аппаратов, а также позволяют повысить рабочую температуру и ресурс подшипников, поднять удельную нагрузку

и температуру при горячем прессовании тугоплавких металлов и соединений. К промышленным УУКМ относятся материалы на основе объемных армированных структур из углеродных полиакрилонитрильных, гидратцеллюлозных и пековых волокон, связанных пироуглеродной, коксовой и гибридной матрицей.

В ОАО "Композит" разработан новый объемно-армированный УУКМ "Арголон – 4DL", который обладает уникальными свойствами стойкости в агрессивных средах и сохранения прочностных свойств при повышенных температурах. Поскольку данный композиционный материал используется для изготовления наконечников и других частей ракет, особые требования предъявляются к качеству поверхности.

Качество поверхностного слоя характеризуется не только шероховатостью, но и физико-механическими параметрами, наличием инородных включений, прожогов, трещин, сколов, выкрашиваний и других дефектов. Заготовительные

* Технологический университет, г. Королев, Московская область / University of technology, Korolev, Moscow region.

операции (этап изготовления заготовки) не позволяют обеспечить требуемую точность и качество поверхности, поэтому используются различные способы механической обработки.

Такие показатели качества, как оценка шероховатости и профиля поверхности, не дают исчерпывающих сведений о характере ее дефектов и не полностью отвечают техническим условиям, отражающим требования заказчика, в том числе не позволяют адекватно оценить морфологию (форму и глубину) характерных дефектов. Поэтому актуальной задачей является совершенствование системы показателей качества поверхности композиционных материалов, а также обоснование методов контроля и разработка программно-аппаратной методики выявления и оценки бесконтактным способом геометрических дефектов поверхности изделий из УУКМ.

На основе проведенного аналитического обзора средств бесконтактного контроля, применяемых в настоящее время, был выбран метод цифровой микроскопии. С целью анализа адекватности разрабатываемой методики контроля дефектов поверхности, частично смоделирована последовательность технологических процессов производства изделия.

На контрольных образцах изучались следующие технологические этапы получения изделия из материала "Арголон – 4DL" (рис.1):

- механическая обработка резанием на станке с ЧПУ в различных режимах (от рабочих до форсированных);

Рис.1. Модель проведения технологических операций с образцом материала "Арголон – 4DL"

Fig.1. Model of processing of sample of Argolon – 4DL

- нанесение антиокислительного покрытия пиролитического карбида кремния из газовой фазы метилсилана. На все образцы необходимо нанести одинаковое покрытие. Данный технологический этап обусловлен необходимостью защитить изделие от окисления максимальное время, что замедляет процесс сгорания от воздушного трения при полете изделия;
- высокотемпературная обработка образцов с нанесенным покрытием в одном температурном режиме, чтобы нивелировать влияющие эффекты термоудара и быстрого отслоения

Scientific advances are creating the preconditions for the design and manufacture of fundamentally new and modernization of existing measuring systems. In particular, thanks to the introduction of the latest technological innovations in the aerospace industry, the control of geometrical defects and sizes becomes a routine task.

In turn, the use of carbon-carbon composite materials (CCCM) with unique thermal, mechanical and erosive properties opens up wide possibilities for the development of

rocketry, aerospace and engineering machinery, metallurgy and shipbuilding. By reducing the weight of the construction, CCCM provide an opportunity to increase the speed and the flight range of the missile, space and aviation aircrafts, and also allow to increase the operating temperature and service life of bearings, to raise the specific strain and temperature during hot pressing of refractory metals and compounds. Industrial CCCM include materials on the basis of the 3D reinforced structures of carbon polyacrylonitrile, hydrocellulose

and pitch fibers bound by pyrocarbon, coke and hybrid matrix.

Kompozit JSC has developed a new 3D reinforced CCCM, Argolon – 4DL, which has unique properties of durability in aggressive environments and of the preservation of the strength properties at elevated temperatures. Since this composite material is used for the manufacture of arrowheads and other parts of missiles, special requirements are imposed on surface quality.

The quality of the surface layer is characterized by not only roughness, but also by the

Показатели качества поверхности материала "Арголон – 4DL" после проведения технологических операций

Quality of surface of Argolon – 4DL after processing

Технологические этапы Technological stages	Механическая обработка Mechanical processing	Нанесение антиокислительного покрытия Anti-oxidation coating	Высокотемпературная обработка High-temperature processing
Показатели качества Quality indicators	<ul style="list-style-type: none"> Количество сколов на кромках; Number of chips on edges; количество выкрашиваний пековой матрицы и их средний размер; number of chippings in pitch matrix and their average size; количество пор на поверхности и их средний размер; number of pores on surface and their average size; наличие трещин и их размер; presence of cracks and their size; выкрашивание стержней; spalling of the rods; наличие раковин; presence of holes; наличие посторонних включений; presence of impurities; ошибочное фрезерование (непараллельно структуре углеродных стержней) incorrect milling (not parallel to structure of carbon rods) 	<ul style="list-style-type: none"> Количество углублений и их средний размер; Number of cavities and their average size; количество выступов и их средний размер; number of projections and their average size; количество линий наложения рельефа; number of lines of relief overlaps; наличие отслоений; presence of delamination; наличие посторонних включений presence of impurities 	<ul style="list-style-type: none"> Время горения материала; Burning time; время абляции time of ablation

материала, а также для возможности дальнейшей математической обработки результатов эксперимента.

После завершения каждого из вышеописанных технологических этапов проводится контроль качества поверхности изделия. Автором обоснован комплекс показателей качества поверхности исследуемого материала после завершения

каждого из технологических этапов в последовательности, указанной на рис.1.

Заготовки изготавливаются путем уплотнения стержневого каркаса, собранного из углепластиковых стержней диаметром 0,7 мм, каменноугольным пеком по ГОСТ 10200 с последующей карбонизацией и высокотемпературной обработкой. В плоскости, перпендикулярной

physical-mechanical parameters, the presence of foreign inclusions, burns, cracks, chips, fractures and other defects. Procurement operations (the stage of manufacturing the workpiece) do not provide the required accuracy and surface quality, therefore various machining methods are used.

Such quality indicators as estimated roughness and surface profile do not give the exhaustive information about the nature of the defects, and do not fully meet the specifications reflecting customer

requirements, including don't allow to estimate adequately the morphology (shape and depth) of characteristic defects. Therefore, the urgent task is improving the system of indicators of surface quality of composite materials, explanation of methods of control and development of software and hardware non-contact methods of identification and assessment of geometric defects of the surface of products of CCCM.

Based on the analytical overview of the currently used contactless control methods, the digital microscopy is chosen.

To analyze the adequacy of the developed methods of control of surface defects, the sequence of technological processes of manufacture of the product is partially simulated.

Using control samples, the following process steps of obtaining the product of Argolon – 4DL (Fig.1) were studied:

- mechanical CNC machining in different modes (from operating to forced);
- deposition of the anti-oxidation coating of pyrolytic silicon carbide from the gas phase of methylsilane.

Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,8–1,95
Предел прочности при растяжении, МПа Ultimate tensile strength, MPa	50–120
Предел прочности при сжатии, МПа Ultimate compression strength, MPa	100–140
Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	20–140
Теплоемкость, Дж/(кг·К) Heat capacity, J/(kg·K)	680–2000
Температурный коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Thermal linear expansion coefficient, $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,03–2,50

Рис.2. 3D-модель стержневой структуры материала "Арголон – 4DL" и его свойства

Fig.2. 3D-model of core structure of Argolon – 4DL and its properties

оси Z, стержни имеют послойную укладку (рис.2). В каждом отдельном слое стержни ориентированы вдоль одной из осей: X, X', X'', углы между которыми составляют 120°. Слои с различными направлениями армирования следуют друг за другом поочередно. Поверхностный слой карбида кремния или кремния может наследовать рисунок, характерный для поверхности исходной заготовки материала "Арголон – 4DL", обусловленный его стержневой структурой.

Существующая система контроля использует, в основном, качественные показатели.

Предлагаемый комплекс включает также количественные показатели, в том числе новые, которые не контролировались согласно требованиям применяемых технических условий (ТУ), что является его принципиальной особенностью.

При анализе ТУ было выявлено, что контроль дефектов ведется универсальными СИ и частично проводится визуально.

После проведения механической обработки предлагается контролировать следующие дефекты:

The same coating should be deposited on all samples. This process step is caused by the need to protect the product from oxidation during maximum time, which slows down the combustion due to air friction during the flight of the product;

- high temperature processing of the samples with coating in the same temperature regime to neutralize the effect of thermal shock and rapid delamination of the material and to further mathematical processing of experimental results.

After completing each of the above-described process steps, the quality control of the product surface is carried out. The author explains the set of indicators of the quality of the surface of the test material after each of the process steps in the sequence shown in Fig.1.

Workpieces are made by compacting the frame that is assembled from CFRP rods with a diameter of 0.7 mm by coal-tar pitch according to GOST 10200 with followed carbonization and high temperature treatment. In the plane perpendicular to the Z-axis, the rods have

a layer-by-layer stacking (Fig.2). In each layer the rods are oriented along one of the axes X, X', X'', angles between them are 120°. Layers with different reinforcement directions follow each other alternately. The surface layer of silicon carbide or silicon can inherit the pattern of the surface of the initial billet of Argolon – 4DL caused by its core structure.

The existing control system uses mainly qualitative indicators. The proposed complex also includes quantitative indicators, including new ones that were not controlled

Рис. 3. Образец материала "Арголон – 4DL" с выкрашиваниями на кромке и характерными дефектами на поверхности после механической обработки резанием на станке с ЧПУ
Fig.3. Sample of Argolon – 4DL with chippings on edge and typical defects of surface after NC machining

- выкрашивание материала – нарушение геометрических параметров заготовки детали (в частности, на кромках), обусловленное свойством материала;
- выкрашивание стержней – удаление с поверхности заготовки детали отдельных стержней при механическом воздействии;

- раковина – пустоты в материале размером более структурной ячейки;
- скол – нарушение геометрических параметров заготовки детали (в частности, на кромках), обусловленное механическим воздействием;
- поверхностная трещина – нарушение сплошности материала на поверхности заготовки, не являющееся структурной особенностью материала. Длина трещины в десятки раз превышает ширину;
- посторонние включения – нехарактерные для материала элементы, которые невозможно отделить от поверхности без использования механических средств.

Согласно используемым в настоящее время ТУ, качество поверхности контролируется на наличие трещин, пор и сколов визуально и с использованием штангенциркуля по ГОСТ 166 с погрешностью измерения не более $\pm 0,05$ мм, а также с помощью глубиномера индикаторного по ГОСТ 7661.

Средствами микроскопического и программно-математического анализа результатов приведенных выше технологических этапов целесообразно выявить корреляцию или же функциональную зависимость между характеристиками режимов механической обработки изделий из материала "Арголон – 4DL", качеством нанесения антиокислительного покрытия и временем уноса (эрозионной стойкости) материала при высокотемпературной обработке.

in accordance with the requirements of used technical specifications (TS), which is its principal feature.

The analysis of TS have revealed that control of defects is implemented with use of universal means of measurement and partly is carried out visually.

It is proposed to control the following defects after mechanical treatment:

- chipping of material – violation of geometry of the workpiece (particularly on the edges) due to the material property;

- chipping of rods – removal from the surface of the workpiece of the individual rods during mechanical action;
- holes in the material that are larger than the structural cells;
- chip – a violation of geometry of the workpiece (particularly on the edges) due to mechanical action;
- surface crack – a discontinuity of material on the surface of the workpiece, which is not a structural feature of the material. Crack length tens of times exceeds width;
- impurities – elements that are not typical for the material

and cannot be separated from the surface without the use of mechanical means.

According to the currently used specifications, the surface quality is monitored for the presence of cracks, pores and chips visually and using a vernier calliper according to GOST 166 with a measurement error not more than ± 0.05 mm, and indicator depth gage according to GOST 7661.

By means of microscopic and mathematical analysis of the results of the given above process steps, it is advisable to determine the correlation or

Рис.4. Трехмерные модели поверхности, представленной на рис.3

Fig.4. 3D model of surface presented in Fig.3

Для проведения эксперимента было отобрано 20 образцов материала "Арголон – 4DL".

До проведения экспериментальных исследований был произведен предварительный анализ поверхностных дефектов на исследуемых образцах по фотографиям, полученным с помощью цифрового микроскопа. Дефекты были классифицированы для определения четких критериев их оценки в контексте разработки метрологического программно-математического обеспечения. Изображения дефектов представлены на рис.3.

Для более наглядного представления дефектов предлагается рассмотреть трехмерную визуализацию цифровой фотографии исследуемой поверхности. С помощью разрабатываемого программного обеспечения фотография была преобразована в монохромный вид, затем из нее были извлечены значения яркости каждого пикселя (от 0 до 255). Значения яркости были отложены по оси аппликат, а оси абсцисс и ординат соответствовали координатной сетке цифровой фотографии.

functional dependence between the modes of mechanical processing of Argolon – 4DL, quality of the anti-oxidation coating and the erosion resistance of the material at high temperature processing.

20 samples of the Argolon – 4DL were selected for the experiment.

Before experimental study, a preliminary analysis of surface defects on test samples using the photographs obtained with a digital microscope was performed. The defects were classified to define criteria of evaluation in the context of the

development of metrological software. Image defects are represented in Fig.3.

For a better visual representation of defects, it is proposed to consider three-dimensional visualization of digital photographs of the sample surface. Using the developed software, the photograph was converted to monochrome, then was extracted brightness values of each pixel (0 to 255). Brightness values were deferred on the applicate axis, and the abscissa and ordinate axes correspond to the grid of digital photography.

Presented in Fig.4 data shows that the brightness of the rod elements of the frame that are on the surface, provides a significant contribution to the values on the applicate axis. Sections of the core frame have a greater lightness relative to the rest of the image. In reality, however, these elements correspond to smooth, flat areas (roughness $R_a = 0.16 \mu\text{m}$), obtained by mechanical machining. Thus, the identification of "true" surface defects may be difficult during interpreting and processing of such diagrams.

Рис.5. Поверхность образца материала: а – цифровая фотография; б – двумерная модель; с – трехмерная модель; д – двумерное представление в сечении

Fig.5. Surface of sample: a – digital photo; b – 2D model; c – 3D model; d – 2D view in cross-section

Из представленных на рис.4 данных видно, что яркость элементов стержневого каркаса, которые находятся на исследуемой поверхности, обеспечивает существенный вклад в значения по оси аппликат. Сечения стержневого каркаса имеют большую светлоту относительно остального снимка. Однако в действительности эти элементы соответствуют гладким плоским

участкам (шероховатость $R_a = 0,16$ мкм), полученным в результате механической обработки резанием. Таким образом, при интерпретации и обработке таких графиков выявление "истинных" поверхностных дефектов может быть затруднено.

Учитывая вышеизложенное, целесообразна разработка программно-аппаратного алгоритма, который позволил бы получать изображение, пригодное для количественного анализа дефектов поверхности УУКМ.

На рис.5а представлена фотография поверхности образца материала с единичным дефектом. Рис.5б – двумерное представление фотографии поверхности, где ось Y – яркость (от 0 до 255 единиц), ось X – порядковый номер пикселя фотографии (отсчет значений начинается с верхнего левого угла цифрового снимка и идет по строкам). Рис.5с – трехмерное представление фотографии поверхности, где ось X – порядковый номер пикселя фотографии по горизонтали, ось Y – порядковый номер пикселя фотографии по вертикали, ось Z – яркость (от 0 до 255). Рис.5д – двумерное представление в сечении, где ось Y – яркость (от 0 до 255), ось X – порядковый номер пикселя фотографии по горизонтали.

Из рис.5б видно, что диапазон значений с наименьшей яркостью соответствует наличию дефекта, таким образом, на снимке можно подсчитать количество дефектных областей по всей контролируемой поверхности, а по

Given the above, the development of hardware and software algorithm, which would allow to obtain an image suitable for quantitative analysis of surface defects of CCCM is appropriate.

Fig.5a shows a photograph of the surface of a material specimen with single defect. Fig.5b shows a 2D representation of pictures of the surface where the Y axis is the brightness (form 0 to 255 units), the X axis is the sequence number of the pixel (counting of values starts from the top left corner of the picture and goes across rows). Fig.5c is a 3D representation of

the surface where the X axis is the horizontal sequence number of the pixel in the photo, Y axis is the vertical sequence number of the pixel, the Z axis is the brightness (0 to 255). Fig.5d shows a 2D view in cross-section, where the Y axis is the brightness (0 to 255), the X axis is the horizontal sequence number of the pixel.

Fig.5b shows that the range of values with the lowest brightness corresponds to the existence of the defect, so in the picture you can count the number of defective areas across the controlled surface, and the

nature of the graph allows to determine the characteristic averaged shape of the detected defects.

Fig.5d shows a cross-section in the center of the defect. It is seen that the lowest brightness (19 units), that is, the darkest area of the object on the digital image, corresponds to the deepest point on the sample surface. In addition, the presented graphical model allows to identify the boundaries of the chipping, which, in this experiment range from 40 to 70 pixels.

In addition to the digital microphotography, the contact

Рис.6. Переносной координатно-измерительный манипулятор FAROArm (a) и игольчатый щуп (b)

Fig.6. Portable coordinate measuring manipulator FAROArm (a) and a needle probe (b)

характеру графика – определить характерную усредненную форму выявленных дефектов.

На рис.5d представлен разрез по центру дефекта. Видно, что наименьшая яркость (19 единиц), то есть самый темный участок объекта на цифровой фотографии, соответствует самой глубокой точке впадины на исследуемой поверхности. Кроме того, представленная графическая модель позволяет выявить

Рис.7. Область измерения

Fig.7. Measurement area

границы выкрашиваний, которые в данном эксперименте составляют от 40 до 70 пикселей.

Кроме метода цифровой микрофотографии, применялся контактный метод с использованием сертифицированного в государственном реестре средств измерений устройства FARO ARM (рис.6). Данный метод позволил провести

method using FARO ARM device (Fig.6) that is certified in the state register of measuring devices was used. This method allowed a comparative assessment of the conformity of the actual brightness values to the depths and protrusions on the surface. The FARO ARM accuracy is ± 0.035 mm, but in a small area of measurements it can be reduced to ± 0.015 mm, which is sufficient for experiments. In the future, it is proposed to solve the problem of reliable determination of defects depth by entering the calibration operation,

the method for which is being developed.

Using ARM FARO coordinate measuring manipulator, the primary data were obtained in Delcam PowerInspect software. In digital microscope, the primary data were obtained using Python and Octave programming systems. Mathematical processing of data was performed in Excel.

For a comparative assessment, measuring the surface topography was performed by the contact method (needle probe) on the same line from the edge of the object (Fig.7).

The length of the measurement field is 8.39 mm.

Fig.8a shows the result of measuring the depth of the hollows by contact method, and Fig.8b – data obtained with the digital microscope. In both cases, the step of measurement was 0.01 mm. In these graphs it is seen that in general, the nature of the curves in the trend lines coincides. The scatter of the data obtained with the digital microscopy is probably caused by the noise of registered matrix, not optimal exposition and glares on the surface of the material (it is possible

Рис.8. Экспериментальные данные, полученные контактным (а) и бесконтактным (б) способами

Fig.8. Experimental data obtained by contact (a) and contactless (b) methods

сравнительную оценку соответствия яркости фактическим величинам глубин и выступов на поверхности. Погрешность FARO ARM составляет $\pm 0,035$ мм, но на небольшом участке измерений ее можно снизить до $\pm 0,015$ мм, этого достаточно для проведения экспериментов. Проблему достоверного определения глубины дефектов в будущем предлагается решить с помощью ввода калибровочной операции, методика которой разрабатывается.

Первичные данные с координатно-измерительного манипулятора FARO ARM

получены в программном обеспечении Delcam PowerInspect. Первичные данные с цифрового микроскопа получены с помощью сред программирования Python и Octave. Математическая обработка данных проводилась в Excel.

Для сравнительной оценки было выполнено измерение рельефа поверхности контактным методом (игольчатым щупом) по одной линии от кромки объекта (рис.7). Длина области измерения – 8,39 мм.

На рис.8а приведены результаты измерения глубины впадинок контактным способом,

that the material should be matted by a special spray). To bring the contact measuring and photographic data in the same coordinate system, a scale measure was used upon receipt of data from the microscope, and then the weight per pixel was determined, which is taken for the sampling rate of the receive data, or a step, and is equal to the indicated above 0.01 mm. A graph obtained using the contact method of measurement, originally had uneven step (from 0.02 to 0.07 mm), so the data were fitted using the method of piecewise linear approximation in Excel.

The measurement data were mapped in such a way that the X axis represents the measured depths and ledges, and the Y axis – the brightness of pixels in photos, which can take values from 0 to 255.

Fig.9a shows some scatter of the data. To simplify the presentation, 839 obtained values were averaged to 42 values with intervals of averaging comprising 20 values. The formulas for the average values for the intervals are presented below:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n}, \quad \bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{ij}}{n}$$

where x_i and y_i are the values of depths (or heights of protrusions) and brightness with step of 0.01 mm at the same distance from the edge of the test material, respectively.

The coefficient of determination R^2 is calculated by the formula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

where y_i are real values of y in each observation, $\hat{y}_i$ is the value predicted by the model, $\bar{y}$ is the average of all actual values of y_i .

а на рис.8b – данные, полученные с цифрового микроскопа. В обоих случаях шаг измерения составлял 0,01 мм. На указанных графиках видно, что в целом характер кривых по линиям тренда совпадает. Разброс данных, полученных с цифрового микроскопа, вероятно, обусловлен шумами регистрирующей матрицы, не оптимально выставленным освещением и бликами поверхности материала (возможно, что материал целесообразно матировать специальным спреем).

Для приведения контактных измерительных и фотографических данных в одну систему координат, при получении данных с микроскопа была использована масштабная мера, и затем был определен вес одного пикселя, который и принимается за частоту дискретизации получения данных или шаг и составляет указанные выше 0,01 мм. График, полученный контактным методом измерений, изначально имел неравномерный шаг (от 0,02 до 0,07 мм), поэтому данные были аппроксимированы методом кусочно-линейной аппроксимации в Excel.

Данные измерений были сопоставлены таким образом, что по оси абсцисс были представлены измеренные глубины и выступы, а по оси ординат – яркость пикселей фотографии, которые могут принимать значения от 0 до 255.

На рис.9а виден некоторый разброс данных. Полученные 839 значений для упрощения представления были усреднены до 42 значений

с интервалами усреднения, включающими 20 значений. Ниже представлены формулы для получения средних значений по интервалам:

$$\bar{X}_i = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad \bar{Y}_i = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n},$$

где x_i и y_i – значения глубин впадин (или высот выступов) и яркостей с шагом 0,01 мм на одинаковом расстоянии от кромки исследуемого материала, соответственно.

Коэффициент детерминации R^2 вычисляется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

где: y_i – реальные значения y в каждом наблюдении; $\hat{y}_i$ – значения, предсказанные моделью; $\bar{y}$ – среднее по всем реальным значениям y_i .

R^2 показывает, насколько условная дисперсия модели отличается от дисперсии реальных значений y . Если этот коэффициент близок к 1, то условная дисперсия модели достаточно мала и весьма вероятно, что модель хорошо описывает данные. Если же коэффициент R^2 много меньше, то модель скорее всего не отражает реальное положение вещей.

В нашем случае $R^2 = 0,89$, что в целом свидетельствует о верности предположения о функциональной взаимосвязи увеличения глубины с уменьшением яркости пикселя и увеличения высоты с увеличением яркости пикселя.

R^2 shows how the conditional variance of the model differs from the dispersion of the actual y values. If this ratio is close to 1, then conditional variance of model is fairly small and it is highly likely that the model well describes the data. If the R^2 is much less than 1, the model likely does not reflect the real situation.

In our case, $R^2 = 0,89$, which generally indicates the correctness of the assumptions about the functional relationship between increase of depth and decrease of brightness of the pixel and increase of height and

the increase of brightness of the pixel.

The conditions for obtaining images with optimal information about the defects can be summarized as follows:

The defect must fully get into the field of view of the microscope, starting from the borders to the deepest cavity.

The sensitivity needs to be configured to show threshold values of brightness at the boundaries and at the deepest point of the object (the same is true for projections).

Due to aberrations due to inaccuracies of manufacture of

the lenses of the microscope, the defective area must be placed in a central area of the field of view of the microscope.

The whole analyzed range of values of the depths and heights must be within the specified depth-of-field.

For detailed measurement of defects, the designed measurement system should have the possibility to move the microscope relative to the sample surface. Accordingly, the amount of movement of the center of the CCD should be monitored by special automated measuring arrays.

Рис.9. Графическое представление экспериментальных данных

Fig.9. Graphical representation of experimental data

Условия получения изображений с оптимальной информативностью о дефектах можно сформулировать следующим образом:

- дефект должен полностью попадать в поле зрения микроскопа, начиная с границ до самой глубокой впадины;

Lighting should be set for elimination of glares and shadows, which are one of the main problems to obtain the correct input data for the analysis. It may be appropriate matting the surface of the material using the spray.

To simplify the measurement system and make it more efficient, it makes sense to use machine learning techniques, which will classify the objects. It is also advisable to program the search algorithm and counting of the defects and of their metric characteristics. In certain approaches (neural network), the

classification, identification and quantification of surface defects can be conducted in an automated mode that will provide a significant advantage over conventional measuring systems.

Thus, the results of these studies are as follows:

- definition of the studied parameters of quality of surface of Argolon - 4DL: roughness, cracks, cavities, chipping, porosity, waviness;
- definition of the task of identifying the impact of these parameters on quality of the anti-oxidation coating;

- definition of the task of software development to get the correct data about the object and to quantify the most typical surface defects;
- definition of the task of assessing the internal structure of the material on digital images of faces of the workpiece;
- definition of the task of development of methods of metrological control based on the data of digital photos;
- definition of the task of the analysis of errors of the received data. ■

- светочувствительность должна быть настроена таким образом, чтобы были видны пороговые значения яркости на границах и в самой глубокой точке объекта (то же справедливо для выступов);
- ввиду аберраций из-за неточности выполнения линзы микроскопа, дефектная область должна помещаться в центральную зону поля зрения микроскопа;
- весь анализируемый диапазон значений глубин и высот должен находиться в пределах установленной глубины резкости;
- при детальном измерении дефектов проектируемая измерительная система должна иметь возможность перемещения микроскопа относительно исследуемой поверхности. Соответственно, величина перемещения центра ПЗС-матрицы должна отслеживаться специальными измерительными автоматизированными линейками;
- освещение должно быть выставлено таким образом, чтобы отсутствовали блики и тени, которые являются одной из основных проблем для получения корректных входных данных для анализа. Может быть целесообразным матирование поверхности материала с помощью спрея.

Чтобы упростить и сделать более эффективной проектируемую измерительную систему, имеет смысл воспользоваться методами машинного обучения, которые позволяют классифицировать объекты. Также можно запрограммировать алгоритм поиска и подсчета дефектов и их метрических характеристик. При определенных подходах (нейронные сети) классификация, определение и подсчет поверхностных дефектов могут вестись в автоматизированном режиме, что обеспечит весомое преимущество перед традиционными измерительными системами.

Таким образом, результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

- определены исследуемые параметры качества поверхности изделия из материала "Арголон-4DL": шероховатость, трещины, углубления, выкрашивания, пористость, волнистость;
- определена задача выявления влияния указанных параметров на качество нанесения антиокислительного покрытия;
- поставлена задача по разработке программного обеспечения для получения корректных для анализа данных об объекте и количественной оценке наиболее характерных дефектов поверхности;
- определена задача оценки внутренней структуры материала по цифровым изображениям граней заготовки;
- поставлена задача по разработке методики метрологического контроля на основе данных цифровой фотографии;
- поставлена задача по анализу погрешности полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Е.И., Ридгер В.В., Ткачев Л.А. Расчет двухзеркального сканера с осями, не лежащими в плоскости зеркала. ОМП. 1984. № 2. С. 67.
2. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. – М.: Наука, 1982. С. 97.
3. Бабаев А.А. Авиационный тепловизор с круговой разверткой визирного луча // ОМП. 1980. №1. С. 17.
4. Бабаев А.А. Пяти-зеркальный узел сканирования тепловизора с мозаичным приемником // ОМП. 1984. № 4. С. 58.
5. Бахмутский В.Ф., Гореликов Н.И. Оптоэлектроника в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1979. С. 272.
6. Батаян П.В., Коняхин И.А., Панков Э.Д. Контрольные элементы автоколлимационных угломеров с улучшенными метрологическими характеристиками // ОЖ. Т. 64. № 1. С. 61.
7. Брусков А.М., Брусков В.М. Конструирование зеркально-призмных оптико-механических узлов. – М.: Машиностроение, 1987. С. 144.
8. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. С. 145.
9. Васильева И.И. Механические и оптико-механические приборы для линейных измерений. – Л.: СЗПИ, 1978. С. 80.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012. 1104 с.
11. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. Учеб. пособ. для студ. приборостроительных специальностей вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1981. С. 89.
12. Неизвестный С.И. Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы // Специальная техника. 1999. №4. Электронный ресурс. <http://st.ess.ru/publications/articles/nikulin2/nikulin.htm>.
13. Скворцов Г.Е., Панов В.А, Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы. – Л.: Издательство "Машиностроение", 1969. Электронный ресурс: <http://ccd.apollophone.ru/index.php>.