

ISSN: 2603-4018
eISSN: 2603-4646

INTERNATIONAL JOURNAL

for science, techniques and innovation
for non-destructive inspection
and material evaluation for the industries



NDT DAYS

Volume V / Issue 5

Year 2022

Published by Bulgarian Society for Non-Destructive Testing
Member of ICNDT and EFNDT

International Journal “NDT Days”

ISSN: 2603-4018, eISSN: 2603-4646

PUBLISHER: Bulgarian Society for NDT (BG S NDT)

FOUNDERS: Bulgarian Society for NDT, Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences

The scope of the journal is aimed to all methods and techniques of non-destructive and destructive testing, as well as evaluation of materials and structures in all areas of technical activities. It is an opportunity to publish research and development results, together with good practices and recommendations for standardization.

Submitted manuscripts should not have been published previously and should not be currently under consideration for publishing elsewhere. They should be prepared in accordance with the Instructions for Authors, published on the journal site.

The articles appearing in the Journal are indexed in NDT Net.

THEMATIC FIELDS

1. Non-destructive inspection methods

- Non-destructive testing methods (ultrasonic, penetrant, magnetic, visual, infrared thermography, radiography, leak, etc.);
- Non-destructive and destructive inspection of the integrity, structure and physico-mechanical properties of materials;
- Application of non-destructive and destructive testing methods for inspection in energy, transport, engineering, construction, chemical industry, etc.;
- Structural health monitoring of equipment and structures with non-destructive testing methods (vibration diagnostics, acoustic emission, infrared thermography, etc.);
- Advanced non-destructive testing methods and techniques (phased array, TOFD, computer and digital radiography, tomography, automatic system for inspection, shearography, etc.);
- Training, certification, accreditation and standardization in scope of non-destructive inspection and conformity assessment of materials, equipment and structures.

2. Techniques for material processing and condition monitoring of equipment

- Design and construction;
- Life cycle condition monitoring;
- Material sciences;
- Manufacturing, exploitation, maintenance and repair;
- Innovation methods and techniques for modernization;
- Metal casting, welding, soldering bonding, machining, surface treatment;
- Mathematical modeling of technological processes;
- Load treatment and deformation;
- Training.

OFFICIAL LANGUAGES: Bulgarian, English and Russian

EDITORIAL BOARD

EDITOR IN CHIEF

Yordan MIRCHEV, Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

DEPUTY EDITOR IN CHIEF

Emil MANOACH, Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

SCIENTIFIC SECRETARY

Krassimira IVANOVA, Institute of Mathematics and Informatics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

MEMBERS

Victor CHIRIKOV, Technical University of Varna, Varna, Bulgaria

Pavel CHUKACHEV, Multitest Ltd., Varna, Bulgaria

Dimitar DIMOV, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria

Hristo DRAGANCHEV, Technical University – Varna, Varna, Bulgaria

Grigori DVMKIN, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

Borislav GENOV, Defence Institute “Prof. Tsvetan Lazarov”, Sofia, Bulgaria

Ivan GEORGIEV, Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Janez GRUM, University of Ljubljana, Slovenia

Yonka IVANOVA, Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Vasil KAVARDJIKOV, Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Ivan KOLAROV, Todor Kableshkov University of Transport, Sofia, Bulgaria

Vladimir KOSTIN, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; Yekaterinburg, Russia

Vadim KOVTUN, Gomel Branch of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Rep. of Belarus, Gomel, Belarus

Sergey KRIVOSHEEV, Peter the Great Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Svetozar MARGENOV, Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Boris MIHAYLOV, SPECTRI Ltd, Sofia, Bulgaria

Giuseppe NARDONI, International Academy on NDT, Brescia, Italy

Amos NOTEA, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Hristo PIROVSKI, Technical University of Varna, Varna, Bulgaria

Anna POVOLOTSKAYA, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

Vladimir PROHOROVICH, ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Nikolay RAZYGRAEV, State Reseach Center of Russian Federation CNIITMASH, Moscow, Russia

Vladimir SERGIENKO, V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus”, Gomel, Belarus

Yossi SHOEf, Israeli National Society for NDT, Tel Aviv, Israel

Marin STOYCHEV, Institute of Metal Science, Equipment, and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”, Sofia, Bulgaria

Maciej SULOWSKI, AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland

Alexey TADJIBAEV, Federal State Educational Establishment “PEIPK”, Saint Petersburg, Russia

Vasilii TITKOV, Peter the Great Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Vladimir TROITSKY, E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Valeriy VENGRIKOVICH, Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

EDITORIAL OFFICE: International Journal “NDT Days”
Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences
Acad. G. Bonchev Str., Block 4, Sofia – 1113, Bulgaria
phone: +359 2 9797120
e-mail: ndtdays@abv.bg
<http://www.bg-s-ndt.org/journal.html>

Publishing of Volume V (2022) of the International Journal “NDT Days” is partially financed by NPP Kozloduy and TU-Varna under the project HФ6/2022.

Table of Contents

Algorithm for Precision Determination of Amplitudes and Phases of Poly-harmonic Signals Harmonic Components in Eddy Current Non-destructive Testing	255
Victor BAZHENOV, Yuriy KALENYCHENKO, Aleksandr KALENYCHENKO, Sergiy RATSEBARSKIY	
The Automated Smoke Detection System	264
Halina BOHDAN, Mykhailo HLUSHCHENKO, Ivan BOHDAN	
Автоматизированная система детектирования дыма	
Галина БОГДАН, Михаил ГЛУЩЕНКО, Иван БОГДАН	
Automated Eddy Current System for Express Monitoring	269
Yurii KUTS, Iuliia LYSENKO, Anatolii PROTASOV, Valentyn PETRYK, Alexander ALEXIEV	
Автоматизированная вихретоковая система экспресс мониторинга объектов	
Юрий КУЦ, Юлия ЛЫСЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ, Валентин ПЕТРИК, Александр АЛЕКСИЕВ	
Experience in the Use of Surface NDT for the Diagnostics of Military Equipment During Full-scale Military Operations	277
Andrii PODDUBCHENKO, Iuliia LYSENKO, Serhii HLABETS, Yurii POSYPAIKO, Oleksandr PAVLYI	
Опыт применения методов поверхностного неразрушающего контроля для диагностики военной техники в условиях полномасштабных боевых действий	
Андрей ПОДДУБЧЕНКО, Юлия ЛЫСЕНКО, Сергей ГЛАБЕЦ, Юрий ПОСЫПАЙКО, Александр ПАВЛИЙ	
CT Analysis of Samples Consolidated by Spark Plasma Sintering of the Ti - TiC Powder	283
Rositza DIMITROVA, Plamen TASHEV	
СТ анализ на образци, получени чрез плазмено-искрово синтероване на прах Ti – TiC	
Росица ДИМИТРОВА, Пламен ТАШЕВ	
Influence of Friction Stir Welding Modes on the Mechanical Properties of Polyethylene Joints.....	291
Danail GOSPODINOV, Nikolay FERDINANDOV	
Влияние на режимите на заваряване чрез триене с разбъркване върху механичните свойства на съединения от полиетилен	
Данаил ГОСПОДИНОВ, Николай ФЕРДИНАНДОВ	

Preparation of Compacts from Aluminum Alloys and Study of the Influence of Thermodeformation Parameters on Their Mechanical Properties	298
Stoyan VELEV	
Получаване на компакти от алуминиеви сплави и изследване влиянието на термодформационните параметри върху механичните им свойства	
Стоян БЕЛЕВ	
Examination of Specimens of Aluminum Alloy AL5083 Welded by the TIG Method with Modified Welding Wire Obtained by Friction Extrusion Technology	305
Yasen HADJITODOROV, Desislava KRUSTEVA, Plamen TASHEV	
Изследване на образци от алуминиева сплав AL5083, заварени по метода ВИГ с модифициран заваръчен тел, получен по технологията екструдирание чрез триене	
Ясен ХАДЖИТОДОРОВ, Десислава КРЪСТЕВА, Пламен ТАШЕВ	
In memoriam Александър Скордев.....	310



Algorithm for Precision Determination of Amplitudes and Phases of Poly-harmonic Signals Harmonic Components in Eddy Current Non-destructive Testing

Victor BAZHENOV, Yuriy KALENYCHENKO, Aleksandr KALENYCHENKO,
Sergiy RATSEBARSKIY

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine,
e-mail: ygbazhenov@gmail.com

Abstract

The development of electronic systems in recent years has made 14-bit field-programmable gate array (FPGA), digital-to-analog converters (DAC) and analog-to-digital converters (ADC) available for mass commercial operation. This created the conditions for the development and application of software and hardware implemented on FPGA algorithms for fast processing of digital signals. Such solutions, in turn, have opened up new opportunities for the proliferation of multi-frequency eddy current systems (MFEC) of non-destructive testing (NDT) in the form of simultaneous processing of different frequencies digital signals, which allows MFEC to compete effectively with pulsed eddy current systems (PEC). In this paper, we present a new algorithm for precise digital measurement of the MFEC amplitude and phase of poly-harmonic signals harmonic components, which is implemented in hardware and software on a 14-bit FPGA. The measurement of the harmonic components amplitude and phase is based on the method of digital signals orthogonal processing, to increase the accuracy of which we prove the need to fulfill the condition of multiplicity of the sample sequence to the size of the digital signal period. Compliance with this condition is achieved by adjusting the length of the sample sequence, which in the proposed algorithm is performed before orthogonal processing. The effect of inaccuracy in establishing the sample sequence length on the measurement errors size in determining the amplitude and phase of the signal harmonic components is simulated using a Monte Carlo simulation. As a result of modeling, it was found that if the multiplicity condition is met, the measurement error is reduced by five orders of magnitude, which indicates the high efficiency of our algorithm. Achieved precision accuracy of measuring the harmonic components amplitude and phase of poly-harmonic signals due to the specified hardware and software implementation of the algorithm allows to create inexpensive, compact, scalable automated digital control systems, measurement data of which can be used to determine individual characteristics of the control object, and for the reconstruction of three-dimensional images, ie in tomographic systems.

Keywords: Algorithm, Phase Measurement, Orthogonal Method, Measurement Error, Non-Destructive Testing, Eddy Current, Multifrequency Signal, Poly-harmonic Signal, Harmonics

1. Introduction

An important condition for the automation of eddy current (EC) NDT operations is a reliable interpretation of the scan results of the objects under control, which is achieved by controlling the excitation signals parameters, such as amplitude and frequency. The latter is one of the most important parameters, because it depends on the depth of penetration of the electromagnetic field into the object under control material, the so-called "skin effect", which is used to characterize surface and subsurface defects, and in some cases microstructures. PEC method of NDT is the most widespread due to the wide range of pulse signal frequencies, which is controlled by applying a pulse shape, and the test result is usually obtained by processing data by Fourier transform or similar in the frequency/time domain, followed by intelligent interpretation.

An alternative to PEC method are MFEC methods of NDT, when the scanning of the object is monitored by certain algorithms signals of specially selected frequency values [1], [2],

[3] or poly-harmonic signals [4], [5], [6]. MFEC have not become as widespread as PEC, due to the complexity of simultaneous supply of frequencies spectrum to the channel, but recently their efficiency has improved due to the introduction of digital processing, including signals synthesis [1], [7], [8]. Thus, the use of modern systems based on FPGA provides automatic simultaneous multi-channel processing of different frequencies signals in the selected range with a given step, which allows to reconstruct defect images on maps of scan results [1], or increase the speed of parallel processing of multifrequency signals while maintaining a high signal-to-noise ratio [9]. For the classification of suitable/unsuitable, the use of an artificial neural network with a radial basis function, which was used to process impedances at five frequencies, was demonstrated [2]. The new approach, based on the use of EC giant magneto-resistive sensor data conversion algorithms and multidimensional optimization procedure, allows to attenuate the signs of artifacts of MFEC and to strengthen the signs of information about defects [3]. At certain values of the excitation signal frequencies, the sensor inductance is almost independent of the lift-off effect, and for the automated selection of such frequencies, algorithms of inverse solvers have been proposed [10]. Also, the connection of MFEC frequencies with the real component of the coil inductance allows to map the weld zones, and as a result to determine the microstructures of these zones with high sensitivity [11], [12]. Simultaneous use of four frequencies and automation of sensor motion provides fast scanning of surface damage of aircraft honeycomb panels with a quality that exceeds optical 3-dimensional scanning [13]. Multifrequency signals in the range of $1 \div 1000\text{kHz}$ are used to determine the microstructure of steel rails, namely the depth of steel decarburization as a result of heat treatment [14]. In general, with the use of automated methods and algorithms for pattern recognition, the efficiency of MFEC systems is not inferior to PEC systems, which brings them to the level of tomographic systems [15]. However, the traditional key elements of automation are the intelligent processing of complex algorithms of signal amplitude measured values. Thus, the use of phase characteristics of poly-harmonic and multifrequency signals in EC NDT was limited or impossible.

The improvement of MFEC methods expands their capabilities not only in the parameterization of defects, but also in determining changes in the structure of materials. The study of physical phenomena in solid state physics, in electromagnetic theory, has led to the discovery of new, more informative features in the use of EC methods, which are related to the structure of the studied materials. For example, if, as mentioned above, in MFEC they determine only the amplitudes values of certain frequencies, then we propose in addition to the amplitudes to determine the phase characteristics of higher harmonics, the values of which, as shown by experimental results, are more informative. Traditionally, the procedure of selection of higher harmonics is not simple, requires the use of filters, in addition, for simultaneous measurement requires a park of vector voltmeters or special phase meters, and to build a family of graphs with such primary results, the control time of one component can be measured in hours. Thus, the use of phase characteristics of poly-harmonic and multifrequency signals in eddy current non-destructive testing was limited or impossible.

To overcome the above MFEC limitations, we have proposed a new algorithm for precise digital measurement of the amplitude and phase of the poly-harmonic signal harmonic components. This algorithm is hardware-software implemented on the FPGA and is based on the features of the synthesis of the MFEC excitation signal and orthogonal processing response signals, which are discussed below.

2. Method

To determine the amplitude and phase of the analog response signal harmonic components, which are measured from the output of the EC probe, we used the orthogonal

method of their processing [16], [17]. The method is based on multiplication of presented in the form of sequences of samples of the finite length of the digital response signal, formed by analog-to-digital transformations of response signal, by specially generated digital harmonious orthogonal signals, which are sequences of samples with known amplitude and phase, the frequency of which is equal to the frequency of the harmonic under study, and their length coincides with the length of the digital response signal:

$$\begin{aligned} s_{cos_k}(x) &= DRS(x) * DHOS_{sin}(x), \\ s_{sin_k}(x) &= DRS(x) * DHOS_{cos}(x), \end{aligned} \quad (1)$$

where k is the harmonic number, $s_{cos_k}(x), s_{sin_k}(x)$ are intermediate signals, $DRS(x)$ is digital response signal, $DHOS_{cos}(x), DHOS_{sin}(x)$ are digital harmonious orthogonal signals, x is the sample number in the sequence, $0 \leq x < M, x = 0, 1, 2, 3, 4 \dots$, and M is its length, f is the excitation signal frequency at the input of the EC converter, obtained by digital-to-analog conversion of a discrete digital signal generated by direct digital synthesis (DDS). The main principle is that we use for the first time a clock signal from the same source for synthesis of the excitation signal and for sampling of the response signal.

It is well known that:

$$\begin{aligned} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) * \sin(\omega_2 t + \varphi_2) &= \\ = \frac{1}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2) - \frac{1}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2), \\ \sin(\omega_1 t + \varphi_1) * \cos(\omega_2 t + \varphi_2) &= \\ = \frac{1}{2} \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2), \end{aligned} \quad (2)$$

where respectively, when $\omega = \omega_1 = \omega_2$ and $\varphi_2 = 0$:

$$\begin{aligned} \sin(\omega t + \varphi) * \sin(\omega t) &= \frac{1}{2} \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \cos(\omega t + \varphi), \\ \sin(\omega t + \varphi) * \cos(\omega t) &= \frac{1}{2} \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

From expression (3) it follows that after multiplying two signals of the same frequency, the result will have a constant component $\frac{1}{2} \cos(\varphi)$ or $\frac{1}{2} \sin(\varphi)$ and a variable harmonic component $\frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi)$ or $\frac{1}{2} \sin(2\omega t + \varphi)$. A sine wave is a harmonic signal, the properties signal of which:

$$\begin{aligned} \int \sin(\omega t) dt &= \int_0^{N_0 T} \sin(\omega t) dt = 0 \\ \int \cos(\omega t) dt &= \int_0^{N_0 T} \cos(\omega t) dt = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

where T is the signal period, $N_0 = 1, 2, 3, 4 \dots (N_0 \in \mathbb{Z}^+)$ is the number of its periods. Thus, the integration of the results of signal multiplication, which are intermediate signals $s_{cos_k}(x), s_{sin_k}(x)$ in expression (1), depends only on the constant component, because the integration of all harmonic components according to (4) is equal to zero in the case of compliance with the condition that the number of periods N_0 belongs to the set of positive integer \mathbb{Z}^+ . Failure to comply with this condition leads to an error in determining the phase and amplitude of the harmonic components, the size of which is investigated below by simulation.

Given that we operate with digital signals, instead of analog integration we will use numerical integration, also known as the average value, of expression (1), which will look as follows:

$$\begin{aligned} \frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{cos_k}(x) &= \frac{1}{2} A_k \cos(\varphi_k), \\ \frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{sin_k}(x) &= \frac{1}{2} A_k \sin(\varphi_k), \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_{IS} = N \cdot n$$

where M_{IS} is the length of the sequence of the intermediate signal, and N is the number of its periods with a fractional part, or $N \in \mathbb{R}^+$, $n = \frac{f_{sr}}{f}$ is the number of points in the period of the intermediate signal, where f_{sr} is the clock signal frequency (CS), f is the excitation signal frequency, A_k is amplitude of the k -th harmonic and φ_k is phase of the k -th harmonic of the digital response signal.

From expressions (5), using the function of the two-argument arctangent, we obtain the value of the phase of the k -th harmonic of the digital response signal:

$$\varphi_k = \text{atan2} \left(\frac{\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{cos_k}(x)}{\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{sin_k}(x)} \right) = \text{atan2} \left(\frac{\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} DRS(x) * DHOS(x)}{\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} DRS(x) * DHOS(x)} \right) \quad (6)$$

Similarly, we obtain the value of the amplitude of the k -th harmonic of the digital response signal:

$$\begin{aligned} A_k &= 2 \sqrt{\left(\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{cos_k}(x) \right)^2 + \left(\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} s_{sin_k}(x) \right)^2} = \\ &= 2 \sqrt{\left(\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} DRS(x) * DHOS(x) \right)^2 + \left(\frac{1}{M_{IS}} \sum_{x=0}^{M_{IS}-1} DRS(x) * DHOS(x) \right)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Obviously, to comply with the condition of the signal number of periods N_0 to the set of positive integer \mathbb{Z}^+ , the sequence length of the intermediate signal M_{IS} must be a multiple of the digital response signal period T_{DRS} , which can be achieved by algorithmically setting the sequence length M_{IS} of the intermediate signal.

3. Modelling

To assess the effect of inaccuracy in establishing the length of the sequence M_{IS} on the size of errors in determining the amplitude and phase of harmonic components, we investigated the relationship between the fractional part of the number of periods N in the digital response signal, which is called the incompleteness of the integration interval, and the mean absolute error of the amplitude and phase.

The simulation was performed using a Monte Carlo simulation in the MATLAB software package [18]. Simulation characteristics: 25 thousand cycles, step 1% of the integration interval

incompleteness, whole periods 39. Simulations with 1, 5, 10 thousand cycles and steps 0.5%, 2%, 5% of the integration interval incompleteness at the whole number of 8 and 15 periods were also performed.

To artificially introduce the incompleteness of the integration interval during the simulation, formulas (5) were changed as follows:

$$\frac{1}{2}A_k \cos(\varphi_k) = \frac{1}{M_0 + j} \sum_{x=0}^{M_0+j-1} DRS(x) * DHOS(x), \quad (8)$$

where M_0 is the length of the sequence of the intermediate signal, a multiple of the digital response signal period length, j is the number of excess M_{IS} sequence points to M_0 .

Formula (8) shows the method of obtaining one of the intermediate results of the calculation, the average value of the sequence used to calculate the values of the selected harmonic amplitude and phase. Fig. 1 presents the results of modeling the dependence of the mean absolute error on the incompleteness of the integration interval for odd harmonics up to and including the ninth. Here, the X axis is the value of $\frac{jf}{f_{sr}}$, or the incompleteness of the integration interval, and the Y axis is the modulus of the mean absolute error in volts for the amplitude $|\Delta A|$ and in degrees for the phase $|\Delta \varphi|$. It is observed that for all harmonics the error in amplitude and phase is minimal at points 0 and 1, according to the simulation results it is less than the error of the uncontrolled signal by 5 orders of magnitude. As the number of harmonics k increases, the chaotic error increases in amplitude and phase, while the absolute size of the error in amplitude almost does not change, and in phase increases significantly.

3. Algorithm

To comply with the condition of the integer number of periods, we have proposed the following algorithm, which is implemented as follows (Fig. 2). First, the excitation signal frequency is selected so that it is defined as the clock signal frequency divided by the positive integer n_0 (the nearest less positive integer than n), if it does not correspond to the set frequency. Then the number of periods N in the sequence of length M_{IS} is adjusted, which should be determined by a positive integer N_0 (the nearest less positive integer than N), and accordingly, the length of the sequence M_{IS} is reduced to $M_0 = N_0 \cdot n_0$. When the condition regarding the integer number of periods is met, the values of the amplitude and phase of the harmonic components are calculated.

Response signal sampling is provided using 14-bit ADCs with the maximum sampling rate of 125 MHz. This sampling rate can be changed by frequency divider by 2^i . The period is generated using a 14-bit DAC. It is known that the output signal frequency is determined according to the expression:

$$f = \frac{f_{sr}}{n}, \quad (9)$$

and above it was shown that to reduce the error in determining the amplitude and phase, the value of n must belong to the set of positive integer \mathbb{Z}^+ . Accordingly, if a certain excitation signal frequency is set, the initial operating conditions of the DAC must be taken into account.

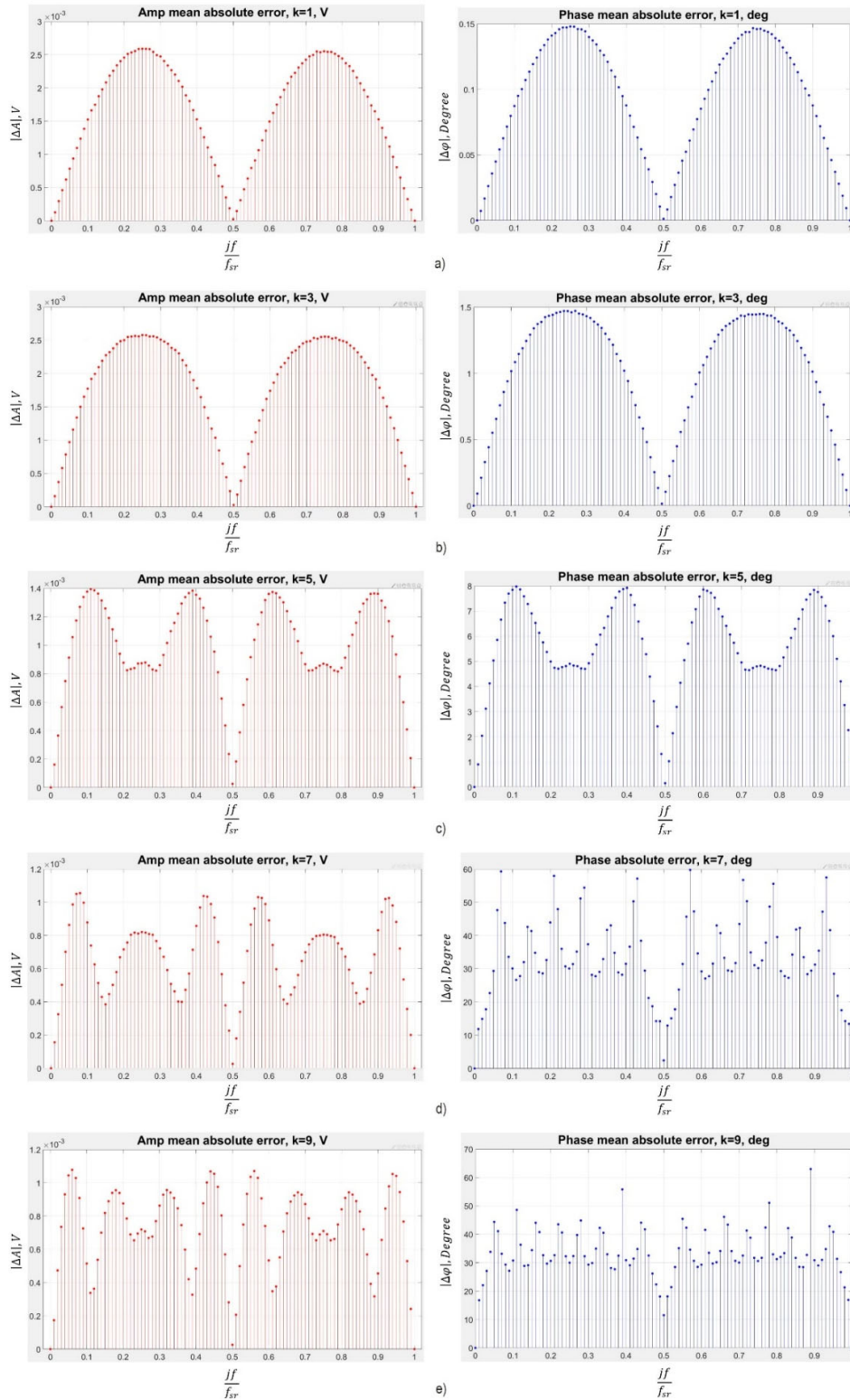


Fig. 1. Dependence of the mean absolute error on the incompleteness of the integration interval:
**a) harmonic $k = 1$, amplitude and phase, b) harmonic $k = 3$, amplitude and phase, c) harmonic $k = 5$,
 amplitude and phase, d) harmonic $k = 7$, amplitude and phase, e) harmonic $k = 9$,
 amplitude and phase**

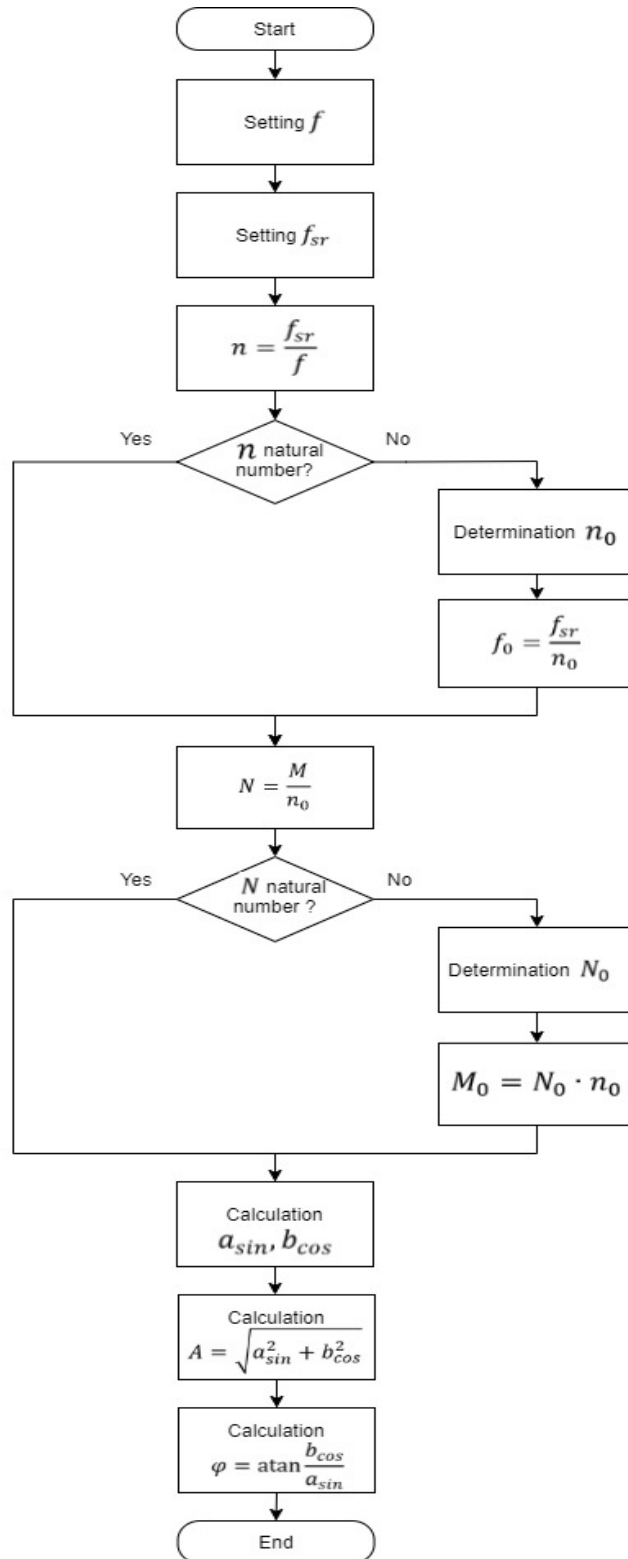


Fig. 2. Algorithm for precise determination of amplitude and phase.

To do this, the calculation is performed $n = \frac{f_{sr}}{f}$, and if the result is fractional, it is rounded to the smallest modulo, with a slight change in the excitation signal frequency. For example, if the

excitation signal frequency is set as 40,000 Hz, its actual frequency will be 40,064.10 Hz, which in no way affects the results of the EC inspection, for which the step of changing the frequency is at least 1000 Hz.

4. Conclusions

The use of the proposed algorithm has reduced the errors in determining the amplitudes and phases of the harmonics of the response signals during their processing by the orthogonal method by five orders of magnitude. The disadvantage of this algorithm is the slight difference between the specified and actually used frequencies of the excitation signal, but as shown above in the example, the effect of this difference can be neglected.

The developed algorithm can be integrated into any digital system using orthogonal signal processing methods. For example, we have developed and manufactured a compact digital computer-integrated automated control system that allows to determine the amplitude-phase-amplitude characteristics of the harmonic components of poly-harmonic signals and obtain the final result in the form of a graphs family or maps of reconstructed images from the scanned plane without the use of a measuring instruments fleet. Data received in amplitude-phase-amplitude characteristics measurements can be further processed by means of intellectual methods.

References

1. J. R. S. Avila, Z. Chen, H. Xu and W. Yin. A multi-frequency NDT system for imaging and detection of cracks, 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018, pp. 1-4.
2. Martínez-Martínez, V.; Garcia-Martin, J.; Gomez-Gil, J. RBF-Neural Network Applied to the Quality Classification of Tempered 100Cr6 Steel Cams by the Multi-Frequency Nondestructive Eddy Current Testing, *Metals*, Volume 7, 2017, p. 385.
3. Oleksii Karpenko, Anton Efremov, Chaofeng Ye, Lalita Udpa. Multi-frequency fusion algorithm for detection of defects under fasteners with EC-GMR probe data. *NDT & E International*, Volume 110, 2020, p. 102227.
4. Svatoš J., Pospíšil T., Vedral J. Application of poly-harmonic signals to eddy-current metal detectors and to advanced classification of metals, *Metrol, Meas. Syst.*, vol. 25, no. 2, 2018, pp. 387–402.
5. Svatoš, J. Single-tone and Polyharmonic Eddy Current Metal Detection and Non-Destructive Testing Education Software. *J. Phys.: Conf. Ser.*, Volume 772, 2016, p. 012052.
6. Yu. Kalenychenko, V. Bazhenov, A. Kalenychenko, V. Kjval, S. Ratsebarskiy. Determination of Mechanical Properties of Paramagnetic Materials by Multi-frequency Method. *International Journal “NDT Days”*, Volume II, Issue 4, 2019, pp. 406-416.
7. Y. Kuts, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin, O. Bliznuk and V. Uchanin. Using multidifferential transducer for pulsed eddy current object inspection. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, pp. 826-829.
8. V. Bazhenov, A. Protasov and K. Gloinik. Increasing of operation speed of digital eddy current defectoscopes based on frequency synthesizer. 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), 2017, pp. 155-158.
9. Ziqi Chen, Jorge R. Salas-Avliá, Yang Tao, Wuliang Yin, Qian Zhao, and Zhijie Zhang. A novel hybrid serial/parallel multi-frequency measurement method for impedance analysis in eddy current testing. *Review of Scientific Instruments*, Volume 91, 2020, p. 024703.
10. Mingyang Lu, Xiaobai Meng, Ruochen Huang, Liming Chen, Anthony Peyton, Wuliang Yin. Lift-off invariant inductance of steels in multi-frequency eddy-current testing. *NDT & E International*, Volume 121, 2021, p. 102458.
11. Xu, Hanyang; Lu, Mingyang; Avila, J R Salas; Zhao, Qian; Zhou, F; Meng, Xiaobai; Yin, Wuliang. Imaging a weld cross-section using a novel frequency feature in multi-frequency eddy

- current testing. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Volume 61, 2019, pp. 738-743(6).
12. Z. Zhou, M. Qin, Y. Xie, J. Tan and H. Bao. Experimental Study of Microstructures in Bias Weld of Coiled Tubing Steel Strip With Multi-Frequency Eddy Current Testing. *IEEE Access*, Volume 8, 2020, pp. 48241-48251.
 13. Reyno, Tyler and Underhill, P. Ross and Krause, Thomas W. and Marsden, Catharine and Wowk, Diane. Surface Profiling and Core Evaluation of Aluminum Honeycomb Sandwich Aircraft Panels Using Multi-Frequency Eddy Current Testing. *Sensors*, 17(9), 2017, p. 2114.
 14. W. Zhu, W. Yin, S. Dewey, P. Hunt, C.L. Davis, A.J. Peyton. Modeling and experimental study of a multi-frequency electromagnetic sensor system for rail decarburisation measurement. *NDT & E International*, Volume 86, 2017, pp. 1-6.
 15. Dingley, Gavin and Soleimani, Manuchehr, 2021. Multi-Frequency Magnetic Induction Tomography System and Algorithm for Imaging Metallic Objects. *Sensors*, 21(11), p. 3671.
 16. Dorofeev, A. L.; Kazamanov, Iu. G.. *Electromagnetic defectoscopy*. Moscow: Mashinostroenie, 1980.
 17. H. Bohdan, V. Bazhenov and A. Protasov. Development of a discrete orthogonal method for determining the phase shift between high-frequency radio impulse signals. *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, 2017, pp. 191-194.
 18. Nicolas Chopin, Omiros Papaspiliopoulos. *An Introduction to Sequential Monte Carlo*. Springer, 2020, p. 402.



The Automated Smoke Detection System

Halina BOHDAN, Mykhailo HLUSHCHENKO, Ivan BOHDAN

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
e-mail: bogdangalya@gmail.com, mglsh@ukr.net

Abstract

The idea of the project is to develop a compact reliable automated device for detecting and estimating the concentration of smoke in residential and industrial premises with the possibility of synchronous notification of the user. The main advantage of this project is the ability to analyze the composition of indoor air for the presence of different types of smoke particles, which prevents false system triggering.

Keywords: smoke detection system, automation, optical system, two-wave technology

Автоматизированная система детектирования дыма

Галина БОГДАН, Михаил ГЛУЩЕНКО, Иван БОГДАН

1. Введение

Уровень социального и экономического развития человечества, на сегодняшний день, привел к значительному увеличению использования различных электронных устройств в повседневной жизни, что в сочетании с глобальной застройкой высотными зданиями привело к значительному увеличению количества пожаров. Известно, что при росте численности населения на 1% количество пожаров увеличивается примерно на 5%, а ущерб от них возрастает на 10% [1]. Согласно статистическим данным [2], в мире на сегодня насчитывается более 220 стран, суммарное количество населения которых составляет приблизительно 6,9 млрд. чел. В них ежегодно возникает 7-8 млн. пожаров, при которых погибает примерно 85-90 тыс. чел.

В случае пожара, самыми болезненными являются социальные последствия, которые связаны, как с получением травм и гибелью людей, так и с повреждением основных производственных и жилищных фондов, утратой материальных ценностей, личного имущества и т.д. Кроме того, следует учитывать, и экологические последствия от пожаров, такие как, загрязнение окружающей среды продуктами горения, средствами пожаротушения и поврежденными материалами.

Вполне естественно, что разработка автоматизированной системы, которая позволит, с высокой точностью, детектировать очаг возгорания до стадии образования открытого огня, то есть на этапе возникновения дыма, является актуальной задачей. Такая система мониторинга и сигнализации пожара, сможет не только обнаружить дым и другие признаки возгорания, которые люди не воспринимают, но и уведомить, в реальном времени, не только пользователя системы, но и все сопутствующие службы, что, в свою очередь, позволит эффективно предотвратить возникновение пожара и минимизировать потери и уменьшение ущерба от них.

На рынке доступны различные системы пожарной сигнализации [3-5], но существует, ряд сдерживающих факторов для их более широкого применения [6-9]:

- ошибочное срабатывание системы при наличии в воздухе частиц водяного пара, пыли или табачного дыма от сигарет или других средств для курения;
- сложность установки проводных систем детектирования дыма в помещениях, при проектировании которых это не было предусмотрено;
- инерционность систем детектирования дыма;
- отсутствие отслеживания состояния детекторов дыма в реальном времени.

Целью данной работы, является разработка компактной надежной автоматизированной системы для детектирования и оценки концентрации дыма в жилых и промышленных помещениях с возможностью синхронного оповещения пользователя и отправки сигнала на пульт пожарной охраны. Его главным преимуществом является способность анализировать состав воздуха в помещении на наличие различных типов частиц дыма, что позволяет предупреждать ошибочные срабатывания устройства.

2. Блок схема системы детектирования дыма

Разработанная автоматизированная система детектирования дыма состоит из: датчиков дыма (Sensor), количество которых рассчитывает в зависимости от размеров и типа контролируемого помещения, согласно рекомендациям ДСТУ-Н CEN/TS 54-14; микроконтроллера STM32F103RC для управления цифровым устройством; WIFI модуля в корпусе датчика, который позволяет осуществлять беспроводную передачу данных на сервер хранения информации; сервера (Server), который осуществляет сбор и хранение информации от сенсор и осуществляет функцию оповещения пользователя (User) и пожарной службы (Fire Department). На рис. 1 показана блок-схема разработанной системы.

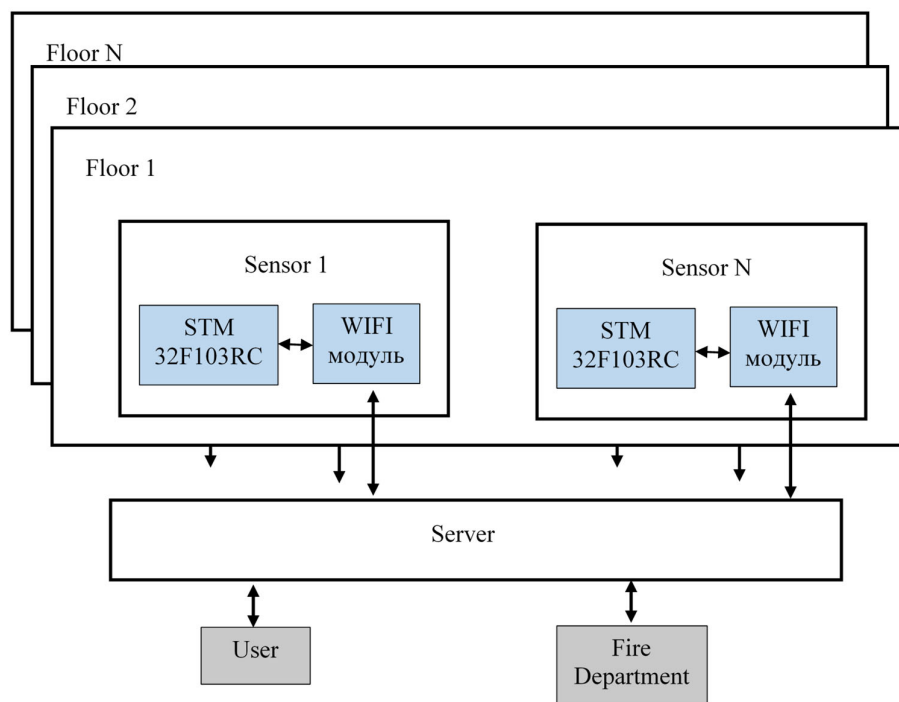


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы детектирования дыма

С целью снижения неравномерности чувствительности к видам дыма и, соответственно, для уменьшения процента ошибочного срабатывание системы из-за, наличия в воздухе частиц водяного пара, пыли или табачного дыма в основу работы сенсора положена двухволновая технология детектирования дыма (Dual Optical Detecto) [10]. Предложенная конструкция корпуса датчика и камеры дыма позволила, с одной стороны, минимизировать аэродинамическое сопротивление воздушным потокам, с другой, обеспечивает достаточную проходимость конвекционного потока смеси воздуха и дыма. На рис. 2 показана разработанная 3D модель датчика дыма. Модель разрабатывалась с использованием программного обеспечения Solidworks, что позволило определить ее дизайн и габаритные размеры.

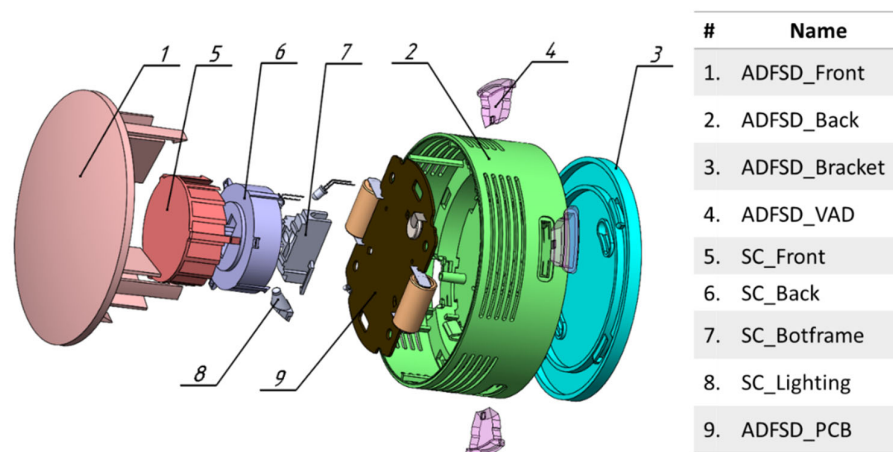


Рис. 2. 3D модель датчика дыма

Элементы датчика печатаются на 3-х мерном принтере из сверхпрочный ABS пластика. Выбор материала обусловлен его непрозрачностью в инфракрасном диапазоне света, что является важным параметром при использовании технологии Dual Optical Detecto.

Электрическая плата, с микроконтроллером STM32F103RC, и WIFI модулем установлено внутри корпуса датчика. За счет наличия дополнительных внутренних перегородок определенной формы, обеспечивается защита электрической платы от попадания на нее дыма. Это позволяет повысить надежность работы системы без снижения ее чувствительности. Выбор STM32F103RC в качестве управляющего элемента обусловлен его дешевизной, сравнительно небольшими габаритными размерами и энергоэффективностью.

WIFI модуль используется для обмена информацией между датчиком и сервером (специально разработанной базой данных). Для обеспечения работоспособности системы и отслеживания текущего состояния сенсоров было выбрано REST архитектурный стиль взаимодействия компонентов.

Сервер обеспечивает поддержку работоспособности всей системы, контроль состояния датчиков, анализ причин срабатывания сенсоров, хранение данных, связь с пользователем и оповещение пожарных служб в случае обнаружения частичек дыма в воздухе. Такой подход позволяет осуществлять мониторинг данных с датчиков в режиме реального времени.

3. Алгоритм работы системы

На рис. 3 показана блок-схема работы автоматизированной системы детектирования дыма. После проверки работоспособности сенсоров система переходит в режим ожидания. В этом режиме происходит постоянный обмен данным между сервером и датчиками системы. Сенсоры продолжают контролировать воздух помещения на наличие различных частиц с последующей их проверкой на соответствие частицам дыма по критерию их размера. В случае обнаружения и идентификации частиц как дым, а также превышения порогового уровня по концентрации частиц, датчики передают информацию на сервер системы и одновременно активируют звуковую сигнализацию.

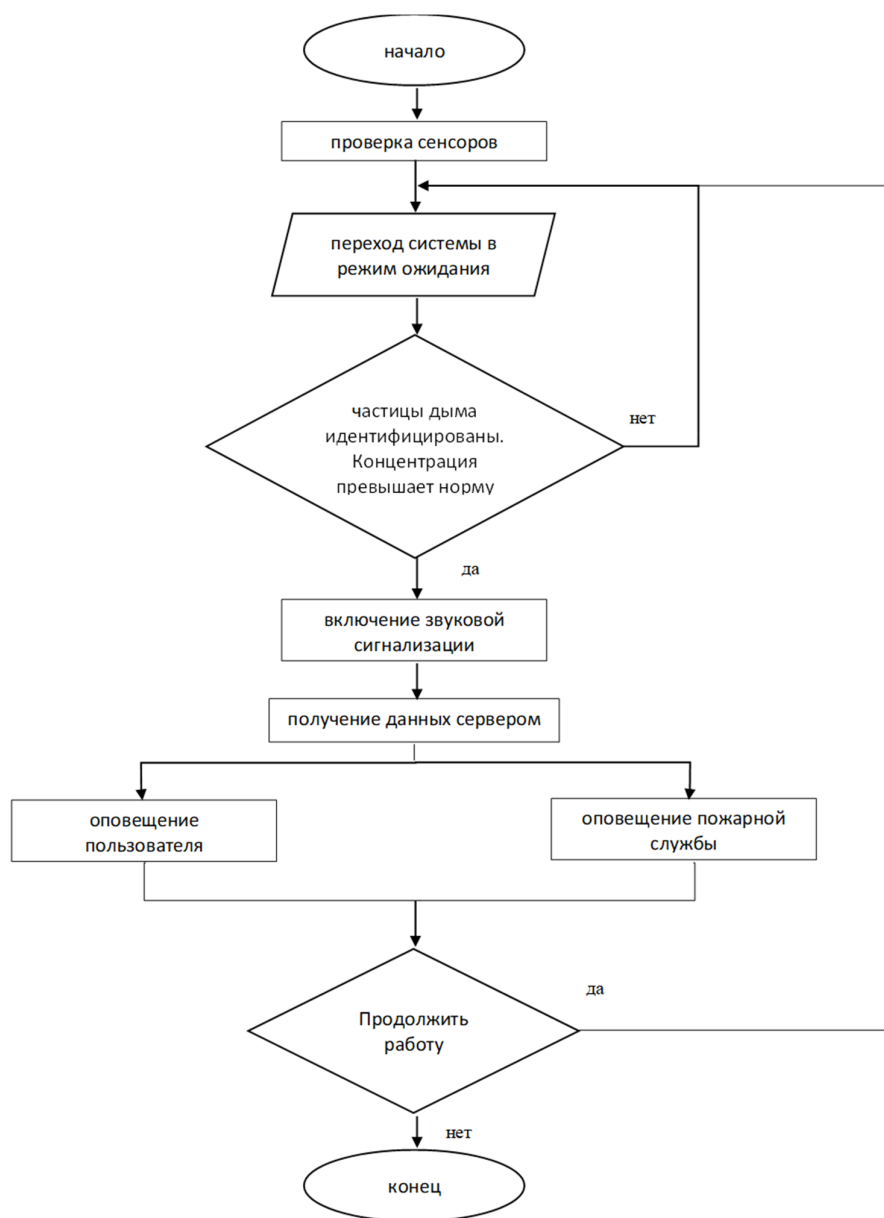


Рис. 3. блок-схема работы автоматизированной системы детектирования дыма

Сервер, после получения данных от сенсора, отправляет сообщение с предупреждением о возникновении пожара пользователю и пожарной охране, что позволяет сократить время приезда соответствующих служб на место возникновения пожара.

4. Выводы

Разработанная автоматизированная беспроводная система детектирования дыма позволяет пользователю отслеживать состояния дыма в помещении в реальном времени с помощью персонального компьютера, ноутбука или мобильного телефона. Кроме того, при обнаружении очага возгорания она автоматически отправляет сигнал на пульт пожарной службы. Реализованная двухволновая концепция работы детектора дыма в сочетании с правильной конструкцией камеры датчика и корпуса позволяет обеспечить надежное обнаружение областей возгорания на основе зависимости интенсивности рассеяния разных длин волн света от размера частиц дыма.

Питание датчика дыма автономное, что позволяет использовать его в помещениях, при проектировании которых не было предусмотрено проведение систем предупреждения пожаров. Использование современной элементной базы и беспроводных технологий передачи данных позволяет существенно снизить инерционность системы. Данная система пригодна для использования, как в жилых помещениях, так и на промышленных предприятиях.

Литература

1. Бібік С. І., Григоренко А. Д. Сучасний стан і рівень пожежної безпеки в Україні. Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. (5–7 квіт. 2021 р., м. Івано-Франківськ). Івано-Франківськ, 2021. С. 408–410.
2. <https://ctif.org/world-fire-statistics>
3. M. D. Stephenson, "Automatic Fire-Detection Systems", International Journal of Electronics & Power, vol. 31, pp. 239-243, Mar 1985.
4. H. Azmi, N. A. Shuaib, M. F. Ghazali, Z. Shayfull and M. Z. M. Zain, "Fire Alarm System, Portable Fire Extinguisher and Hose Real System Maintenances for Satefy Purpose and Requirement," National Symposium on Advancement in Ergonomics and Safety (ERGOSYM), pp. 184-197, 1-2 Dec. 2009.
5. Fixed firefighting system - Automatic sprinkler system-design, installation and maintenance. Department of Standards Malaysia, 2006.
6. Fire protection-general product catalog." Safer Smarter Tyco. pp.1-100.
7. V. Rajput, et al., "Low Cost Fire Alarm System with Sprinkler," International Journal of Advanced Research in Computer Science, vol. 8, pp. 607-609, May 2017.
8. M. M. Hasan and M. A. Razzak, "An Automatic Fire Detection and Warning System under Home Video Surveillance," 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing and its Application (CSPA 2016), pp. 258-262, Mar 2016.
9. M. S. Bahrudin, et al., "Development of Fire alarm system using Raspberry Pi and Arduino Uno," 2013 International Conference on Electrical, Electronic and System Engineering (ICEESE 2013), pp. 43-48, Dec 2013.
10. Сулим Т. "Двухдиапазонные дымовые извещатели. Новый уровень точности обнаружения." Алгоритм безопасности, №5, 2014.



Automated Eddy Current System for Express Monitoring

Yurii KUTS¹, Iuliia LYSENKO^{1,2}, Anatolii PROTASOV¹,
Valentyn PETRYK¹, Alexander ALEXIEV³

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: j.lysenko@kpi.ua

² LLC “Dyagnostychny Prylady”, Kyiv, Ukraine,

³ Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
e-mail: alexiev@imbm.bas.bg

Abstract

In operation, the materials of machine and aircraft elements are exposed to significant mechanical loads and temperature changes. It leads to various defects and damage to elements, components of mechanisms, and devices. So for the safe operation of mechanisms and devices, it is necessary to inspect their elements, and then carry out the necessary work on their replacement in time. In some cases, the inspection or diagnostics of the elements is accompanied by technical difficulties caused by the large size of the objects and limited access to local places. The author of the article suggests using wireless technologies to transmit signals from the probe unit to the data processing one. It allows the separation of the measurement unit and data analysis unit in space and also it simplifies the practical implementation of robotic systems for scanning objects or their elements in hard-to-reach places. The article describes the developed intelligent wireless system of eddy current control of structural materials. Also, the method of information processing and visualization is described. The method can be used to automate decision-making in the system of monitoring the condition of large objects. Special software (using Python) has been developed to process the object scanning results. It allows obtaining the distribution of the values of the signal informative parameters depending on the coordinates of the object.

Keywords: testing system, decision-making system, signal characteristics, information parameters, C-scan

Автоматизированная вихретоковая система экспресс мониторинга объектов

Юрий КУЦ, Юлия ЛЫСЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ,
Валентин ПЕТРИК, Александр АЛЕКСИЕВ

1. Введение

Вихретоковый неразрушающий контроль (ВТК) является одним из наиболее распространенных видов контроля крупногабаритных изделий из конструкционных материалов. Современная номенклатура объектов контроля (ОК) и использование новых материалов требует постоянного развития и совершенствования методов и средств контроля [1]. В последнее время этот процесс развивался по нескольким направлениям [2, 3]. Первый из них заключался в исследовании методов вихретокового контроля, которые основаны на многочастотных компонентах сигналов для реализации многопараметрического контроля [4, 5, 6]. В этом случае датчик устройства с многочастотным анализом использует изменения электропроводности и магнитной проницаемости материала (например, стали) для отслеживания изменений микроструктуры в процессе обработки. Другое направление развития связано с использованием импульсного режима возбуждения вихретокового преобразователя

(ВТП), что также способствует расширению функциональных возможностей контроля [7, 8, 9]. Последние результаты исследования применения импульсного вихретокового НК для обнаружения и идентификации дефектов и повреждений в углеродном волокне показывают хорошие перспективы [10]. Это особенно важно, потому что такой материал широко используется в авиационной промышленности, но его относительная склонность к повреждениям от ударов приводит к определенным требованиям к эффективности методов НК.

Также постоянно ведутся исследования по совершенствованию конструкций ВТП, в частности, в статье [11] представлены результаты разработки и исследования зондов двойного дифференцирования, повышающих чувствительность к некоторым типам дефектов. Благодаря высокой чувствительности многие сложные задачи контроля и поиска подповерхностных дефектов в многослойных конструкциях могут быть решены с помощью таких преобразователей. При этом высокая чувствительность достигается за счет сохранения стабильного зазора между ВТП и контролируемой поверхностью.

Внедрение ВТК часто вызывало технологические трудности из-за больших размеров узлов или агрегатов объектов и ограниченного доступа к их локальным местам. Проблема может быть решена путем использования беспроводных технологий передачи сигналов ВТП от блока преобразователей к блоку обработки данных [12, 13, 14]. Это позволит пространственно разделить часть датчиков и блок обработки сигналов и значительно упростит практическую реализацию контроля крупных объектов. Однако эти вопросы редко затрагивались при разработке средств контроля. Кроме того, представляет определенный интерес использование различных современных методов цифровой обработки сигналов в инструментах ВТК. Так, авторы [15] предложили использовать преобразование Гильберта для получения амплитудных и фазовых характеристик сигнала (АСХ и ФСП) и их последующего анализа.

В этой статье рассмотрена разработка и анализ экспериментальной модели беспроводной системы ВТК, в которой реализованы разные режимы возбуждения и разные способы обработки сигналов и представления информации соответствующими способами. Представлено исследование разработанной системы ВТК с беспроводной связью между блоком преобразователей и блоком обработки и анализа данных. Разрабатываемая система ВТК должна обеспечивать:

- возможность осмотра узлов или агрегатов, имеющих ограниченный доступ к их локальным частям;
- реализация различных режимов вихретокового контроля;
- адаптивный выбор метода и алгоритма обработки сигналов ВТП;
- визуализация результатов в виде 2D и 3D графиков;
- архивирование результатов контроля с последующей их загрузкой в базу данных.

2. Алгоритм определения информативных параметров сигналов

Информационный сигнал ВТП может быть представлен моделью гармонического колебания с гауссовским шумом:

$$u_{exp}(t, \omega) = U_m e^{-\alpha(\omega) \cdot t} \cos(2\pi f(\omega) \cdot t) + u_n(t), \quad t \in (t_1, t_2) \quad (1)$$

где: U_m – амплитуда сигнала ВТП, $\alpha(\omega)$ – затухание, $f(\omega)$ – частота, t – текущее время, (t_1, t_2) – период анализа, $t \in (t_1, t_2)$, u_n – шумовая составляющая, ω – вектор характеристик ОК. Известно, что частота и затухание этих колебаний изменяются в зависимости от таких характеристик ОК, как материал, форма и геометрия, наличие дефектов и др. [16].

Обработка и анализ характеристик сигнала состоят из этапов, представленных на рис. 1. Для уменьшения влияния шумов и повышения точности определения коэффициента затухания и частоты собственных колебаний использовались аппроксимация АХС и сглаживание ФХС ВТП [17].

Для сглаживания функции ФХС использовали метод линейной регрессии Бартлетта-Кенуи. Метод основан на анализе временной последовательности экспериментальных данных и разделении выборки $\Phi[j, \omega]$ на три примерно равные группы.

Суммы $\sum \Phi[j, \omega]$ в каждой группе и $\sum t_j$ определяются соответственно Φ_1, Φ_2, Φ_3 и t_1, t_2, t_3 . Коэффициенты линейной регрессии оцениваются по формуле:

$$\kappa = (\Phi_3 - \Phi_1) / (t_3 - t_1), b = \Phi - \kappa \cdot t \quad (2)$$

где $\Phi = \sum \Phi[j, \omega] / 3M$ и $t = \sum t_j / 3M$, M – количество элементов в группе.



Рис. 1. Методика обработки сигналов ВТП

Собственная частота сигнала ВТП определялась с помощью ФХС по формуле:

$$f(\omega) = \Delta \Phi_{in}[\omega] / (2\pi \Delta T) \quad (3)$$

где $\Delta\Phi_{lin}[\omega]$ – тренд функции фазы сигнала ВТП, который накапливается за время ΔT (например, за время $(t_2 - t_1)$).

Экспоненциальная аппроксимация функции АХС использовалась для повышения точности определения декремента информационного сигнала. Определено, что для повышения точности оценки факторно-экспоненциальной аппроксимации очень важно учитывать часть АХС, соответствующую ранним периодам информационного сигнала. Ранние периоды соответствуют АХС с максимальным наклоном.

Затухание сигнала определялось с помощью АХС по формуле:

$$a(\omega) = (1/\Delta T) \cdot \ln(U(t_1, \omega) / U(t_2, \omega)) \quad (4)$$

где $U(t_1, \omega)$, $U(t_2, \omega)$ – значения САР в моменты времени t_1 и t_2 .

Блок принятия решений анализирует и оценивает данные, а затем предоставляет результаты диагностики.

3. Эксперимент и исследование

3.1. Структура экспериментальной модели

Структура разработанной системы ВТК представлена на рис. 2. Преобразовательный блок состоит из двойного дифференциального ВТП, содержащего две первичные и две вторичные катушки. Параметры ВТП: $R_1=8,2$ Ом, $L_1=100,8$ мкГн, $R_2=14,4$ Ом, $L_2=353,8$ мкГн.

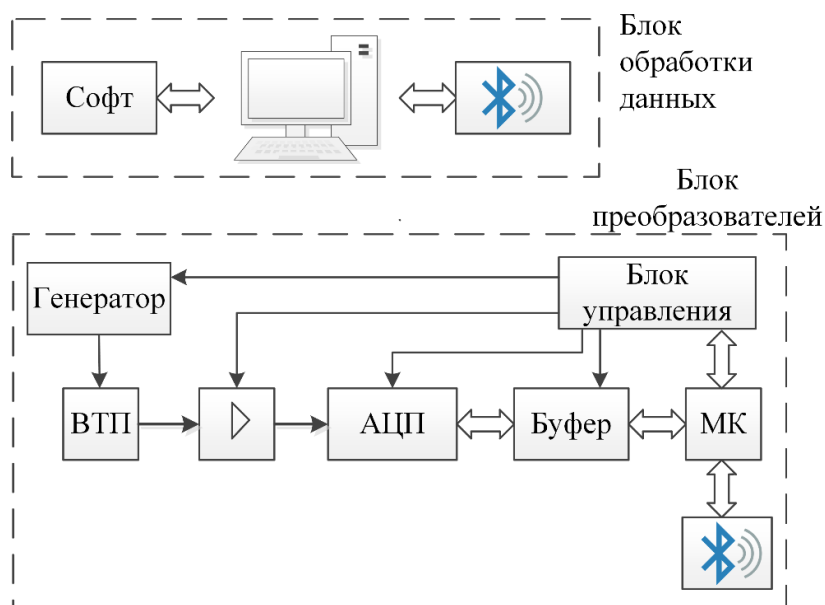


Рис. 2. Разработанная система вихретокового неразрушающего контроля

Возбуждающая катушка получает импульсный сигнал от генератора сигналов (источника тока), а измерительная катушка формирует сигнал, который усиливается и оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Полученные данные сохраняются в хранилище (буфере) для последующей передачи в блок обработки

данных. Эта передача осуществляется за счет микроконтроллера (МК) и блока беспроводной связи. Модуль Bluetooth (третий класс мощности) используется в качестве блока беспроводной связи и имеет внешнюю антенну для обеспечения связи между блоками обработки и преобразования данных на определенном расстоянии. Максимальное расстояние между блоками с приемлемым качеством соединения составляет 300 м. Работа основных узлов преобразовательного блока синхронизируется блоком управления. Блок обработки данных состоит из приемника и персонального компьютера со специальным программным обеспечением.

Реализация преобразовательного блока с ВТП представлен на рис. 3.

Для проверки работоспособности системы использовалась пластина из металлических сплавов с искусственными трещинами различной глубины (от 0,1 мм до 3 мм) и шириной 1 мм (рис. 4). Материал пластин имеет маркировку AD31T5 и состоит из алюминия, магния и кремния (Al-Mg-Si). Этот материал используется в кабинах самолетов и вертолетов, оконных проемах самолетов.

Пластина сканировалась с шагом 1 мм двойным дифференциальным датчиком, входящим в состав блока преобразователя.



Рис. 3. Преобразовательный блок системы ВТК

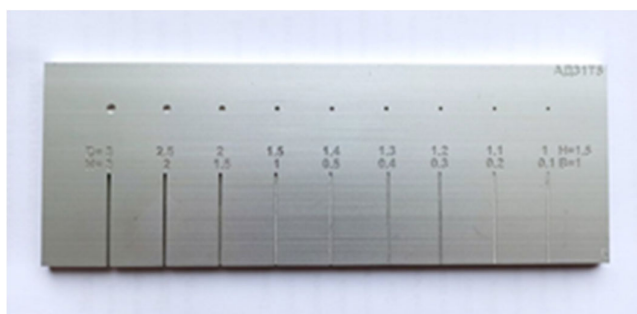


Рис. 4. Образец для тестирования

3.2. Исследование и обсуждение результатов

Импульсный ток с периодом $T_n=50$ мкс и длительностью $\tau=175$ нс использовался для возбуждения первичной катушки дифференциального ВТП. Принятый сигнал от вторичных катушек ВТП имел вид затухающих гармонических колебаний и может быть представлен уравнением (7). Анализ принятых сигналов ВТП проводился с помощью разработанного программного обеспечения, в основе которого лежит обработка сигналов ВТП во временной области с помощью преобразования Гильберта и получение АХС и ФХС и их последующий анализ.

Для анализа из набора сигналов ВТП выбирались максимальные значения пиков амплитуды. Распределение пиковых значений амплитуды ВТП с привязкой ко всем сканируемым точкам поверхности ОК показано на рис. 6а в виде С-скана, где 1 – ОК, 2 – амплитуда сигнала [18]. Распределение амплитуд показывает, что трещина в ОК приводит к значительному увеличению значений амплитуд вблизи нее, но уменьшению над самой трещиной, что показано на рис. 6б. На рис. 6 показано распределение значений амплитуд пиков без значений, полученных вблизи границ ОК. Это связано с влиянием краевых эффектов на значения сигналов.

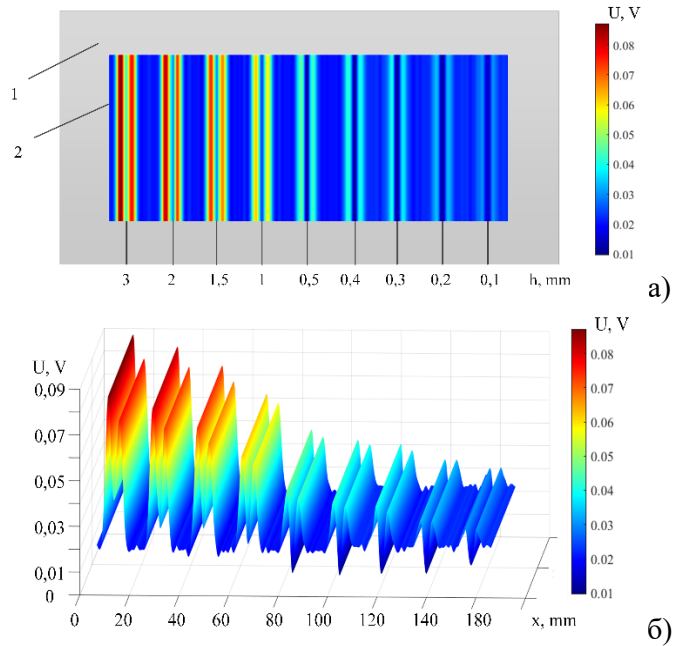


Рис. 5. Распределение амплитуды сигнала на поверхности ОК в режиме С-скан (а) и режиме 3D визуализации (б)

На рис. 6 представлена зависимость значений частоты $f(h)$ и затухания $\alpha(h)$ сигнала дифференциального ВТП от глубины трещины в ТО. Эти зависимости можно описать формулами: полиномом 5-й степени в случае использования собственной частоты в качестве информационного параметра и логарифмической зависимостью в случае затухания сигнала. Очевидно, что полученные таким образом зависимости можно использовать для количественной оценки параметров трещин.

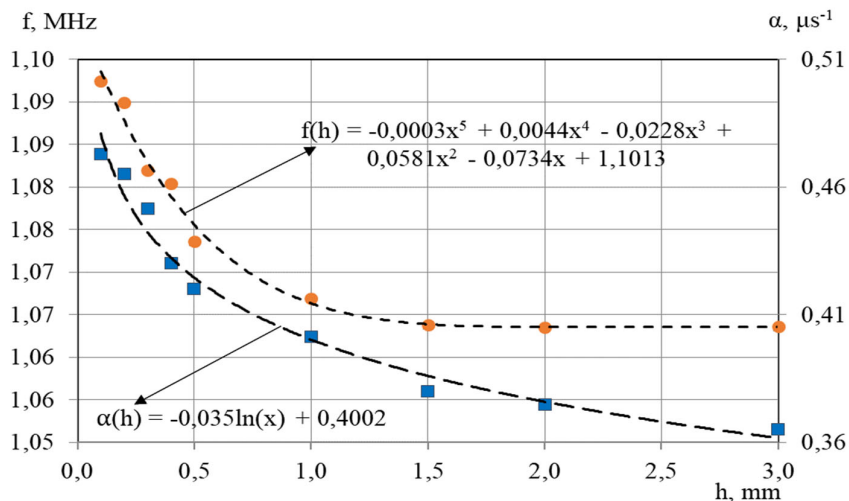


Рис. 6. Зависимость значений собственной частоты и затухания сигнала ВТП

4. Выводы

В статье показано, что импульсное возбуждение в ВТК в сочетании с цифровой обработкой сигналов на основе дискретного преобразования Гильберта существенно дополняет известные методы за счет использования для анализа таких параметров сигналов, как собственная частота, пиковое значение амплитуды и затухание сигнала. Разработанная автоматизированная вихретоковая система предназначена для контроля крупногабаритных деталей, узлов механизмов и аппаратов, доступ к которым ограничен.

Предложенная система имеет в своем составе беспроводные технологии для передачи сигналов и предусматривает новый метод обработки сигналов, описанный в статье. Диагностическая система обеспечивает анализ и визуализацию полученных данных в режиме реального времени и использует эти данные для принятия решений о состоянии крупных объектов. Методика была апробирована и проверена на примере импульсной обработки сигнала ВТП при контроле пластины с трещинами различной глубины.

В статье приведены результаты контроля пластины из металлического сплава с искусственными трещинами разной глубины. Экспериментально установлено, что в процессе дефектоскопии образца относительная погрешность определения размера трещины по частоте информационного сигнала ВТП не превышает 0,2 %, по амплитуде – 1,5 %.

Литература

1. S.S. Udpa, P.O. More, Eds, Nondestructive testing handbook (third It is experimentally established that in the process edition): Electromagnetic testing, American Society for NDT, 2004.
2. O. Ostash, V. Fedirko, and S. Bychkov, "Mekhanika ruinovannia i mitsnist materialiv" [Fracture mechanics and strength of materials] (in Ukrainian), Vol. 9. Mitsnist i dovhovichnist materialiv litaka ta konstruktyvnykh elementiv [Strength and durability of airplane materials and structural elements] (in Ukrainian), Lviv, Spolom, 2007.

3. G. S. Tymchik, O. O. Podolian, A. Pavlovyeh, I. Lysenko, P. Komada, and A. Kozbakova, "Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines," Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2018.
4. W. Yin, and A. Peyton, Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors, NDT&E International, pp. 43-48, 2006.
5. S. J. Dickinson, R. Binns, W. Yin, C. Davis, and A. J. Peyton, "The Development of a Multi-frequency Electromagnetic Instrument for Monitoring the Phase Transformation of Hot Strip Steel," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp. 1091-1096, 2005.
6. Y. Kalenychenko, V. Bazhenov, V. Koval, and S. Ratsebariy, "Determination of mechanical properties of paramagnetic materials by multi-frequency method," International Journal «NDT Days», 2 (1), pp. 406-416, 2019.
7. A. Sophian, G. Y. Tian, and M. Fan, "Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: a review," Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30, pp. 500–514, 2017.
8. M.J. Johnson, Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection, University of Surrey, UK, 1997.
9. D. Vasic, V. Bilas, and D. Ambrus "Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes." IEEE Trans. Instrum. Meas, 53 (4), pp. 1289-1294, 2004.
10. J. Wu, D. Zhou, and J. Wang, "Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current testing," Nondestructive Evaluation/Testing (FENDT), IEEE Far East Forum on., pp. 181–185, 2014
11. V. Uchanin, Nakladni vykhrostrumovi peretvorjuvachi podvijnogho dyferencijuvannya [Surface double differential type eddy current probes] (in Ukrainian), Lviv, Spolom, 2013.
12. A.P. Kren, M.N. Delendyk, and V.P. Ivanov, Industry 4.0: Transformations in Non-Destructive Testing. Science and innovation, 2 (192), pp. 28–32, 2019.
13. V.F. Petryk, R.M. Galagan, A.G. Protasov, A.V. Muraviov, and I.I. Lysenko, "Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices," Devices and methods of measurements, 11 (4), pp. 272-278, 2020.
14. I. Javorskyj, R. Yuzefovych, P. Matsko, and I. Kurapov, "Hilbert transform of a periodically non-stationary random signal: Low-frequency modulation," Digital Signal Processing, 116 (103113), 2021.
15. I. Lysenko, Y. Kuts, S. Maievskyi, A. Protasov, and O. Dugin "Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing," 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 594-97, 2018.
16. I. Lysenko, Y. Kuts, A. Protasov, M. Redka, and V. Uchanin, "Enhanced feature extraction algorithms using oscillatory-mode pulsed eddy current techniques for aircraft structure inspection," Transactions on Aerospace Research, 3 (264), pp. 1-16, 2021.
17. Lysenko, I., Eremenko, V., Kuts, Y., Protasov, A. and Uchanin, V., 2020, "Advanced Signal Processing Methods for Inspection of Aircraft Construction Materials." Transactions on Aerospace Research. 259(2). pp. 27-35.
18. Y. Lazarev, Modeling processes and systems in MATLAB [Modelyrovanye protsessov y system v MATLAB] (in Russian), Kyiv, BHV, 2005.



Experience in the Use of Surface NDT for the Diagnostics of Military Equipment During Full-scale Military Operations

Andrii PODDUBCHENKO¹, Iuliia LYSENKO^{1,2}, Serhii HLABETS¹,
Yurii POSYPAIKO³, Oleksandr PAVLYI¹

¹ LLC “Diagnostychny Prylady”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: alpavliy@gmail.com

² Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine,
e-mail: j.lysenko@kpi.ua

³ E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract

The article discusses penetrant non-destructive testing for express diagnostics of military equipment elements in the field environment. The authors proposed to conduct express diagnostics in order to identify potentially dangerous elements, plan repair actions and further prevent equipment failure at an inopportune moment. Compared to others, the advantages of penetrant testing are shown, and the results of experimental studies of real objects are also presented.

Keywords: penetrant testing, method of penetrating substances, military equipment, field conditions, express diagnostics

Опыт применения методов поверхностного неразрушающего контроля для диагностики военной техники в условиях полномасштабных боевых действий

Андрей ПОДДУБЧЕНКО, Юлия ЛЫСЕНКО, Сергей ГЛАБЕЦ,
Юрий ПОСЫПАЙКО, Александр ПАВЛИЙ

1. Введение

В связи с началом полномасштабных боевых действий на территории Украины, остро возникла необходимость проведения быстрой и качественной экспресс-диагностики военной техники. При этом полевые условия, отсутствие постоянного энергоснабжения и недоступность специального оборудования диагностики накладывают определенные требования к подбору и использованию давно известных и хорошо развитых методов неразрушающего контроля (НК) с точки зрения энергозатратности, быстроты и ресурсоемкости. К наиболее оптимальным методам НК в сложившихся условиях относят: метод проникающих веществ (капиллярный), магнитопорошковый и вакуумно-пузырьковый методы течеискания, которые эффективны для выявления дефектов сварных соединений и основного металла [1, 2].

2. Цель и задачи исследования

Известно, что наиболее часто возникающими задачами является контроль топливных баков на наличие течей и последующего устранения найденных дефектов. Кроме того, необходимо проводить выявление поверхностных дефектов и трещин

несущих рам боевых машин, кузовных деталей и других металлоконструкций как при естественном износе, так и после повреждений в результате боевых действий. Для последующего ремонта и устранения найденных дефектов также необходимо уточнение полной протяженности трещин.

3. Анализ методов исследования

Рассмотрим возможности применения капиллярного, магнитопорошкового, а также вакуумно-пузырькового метода течеискания для выявления нарушений сплошности в элементах военной техники в условиях эксплуатации. Все эти методы относятся к НК проникающими веществами, однако для их применения необходимы разные средства.

3.1. Капиллярный НК

Капиллярный НК позволяет обнаружить поверхностные и сквозные дефекты, по расположению, протяженности и форме которых можно судить о характере дефекта и причинах его возникновения [2]. Классический процесс контроля методом проникающих веществ описан в серии стандартов ДСТУ [EN ISO 3452, части 1-6](#) [3].

Практический опыт показал, что в полевых условиях наиболее удобным к применению является контрастный безводный процесс с применением цветного или цветного флуоресцентного пенетранта (второй и третий тип пенетранта, класс чувствительности 2), очистителя и проявителя на основе сольвентов (например семейство материалов MR Chemie - MR-68C, MR-88, MR-70) [4].

Составы для капиллярного метода в аэрозольных баллонах обладают рядом преимуществ:

- удобство транспортировки на место проведения контроля;
- легкость нанесения в труднодоступных местах на объектах сложной геометрии;
- быстрое обучение исполнителей, благодаря наглядности результатов контроля.

Однако при аэрозольном распылении покрывается избыточная область контролируемого изделия. В некоторых случаях целесообразно применение пенетранта в виде пены, например MR-67PS, что позволяет точно наносить пенетрант на контролируемый участок без загрязнения других зон изделия [4]. На рис. 1. приведена разница в процессе нанесения между пенетрантами с аэрозольным нанесением (рис.1а) и в виде пены (рис.1б).

Для выявления сквозных дефектов зачастую достаточно применения только проявителя. При нанесении проявителя на очищенную поверхность изделия, например бензобак, остатки топлива в сквозных несплошностях выполняют функцию проникающей жидкости вызывая контрастные индикаторные следы на белом проявителе. В условиях ограниченных ресурсов данный способ контроля является экономичным и быстрым.

3.2. Магнитопорошковый НК

При контроле магнитными порошками может быть использован аэрозольный комплект из магнитной суспензии и грунтовочной краски для получения контрастных индикаций.

Для намагничивания изделий применяется дефектоскоп, создающий мощное магнитное поле необходимой конфигурации. Выпускаются модели дефектоскопов на постоянных магнитах либо с автономным питанием. Кроме того, в условиях слабой освещенности, при проведении работ в темное время суток, рекомендуется использование флуоресцентных магнитных суспензий (MR-76F), а также

ультрафиолетового облучателя MR-96D UV led minilight с автономным питанием (рис. 2) [4].

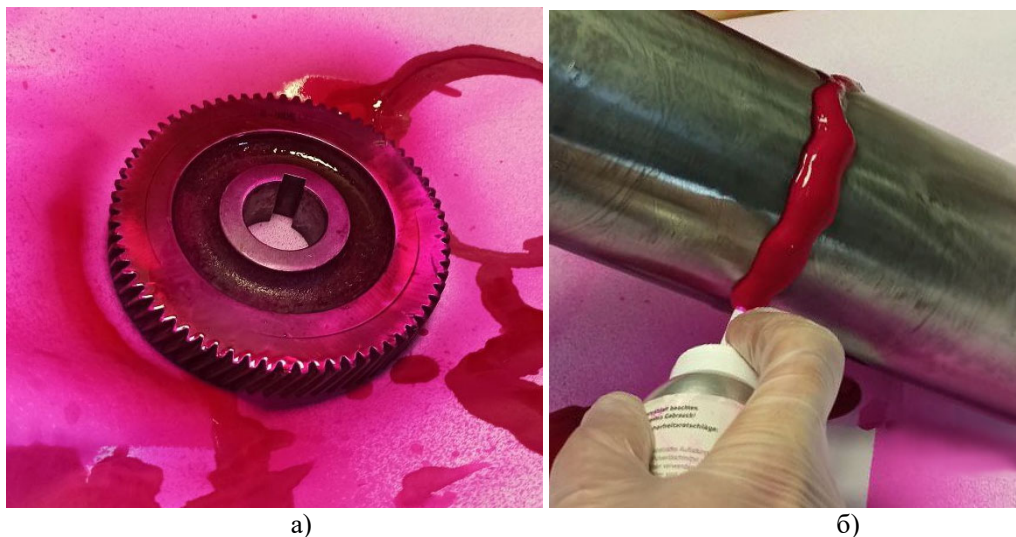


Рис. 1. Нанесение пенетрантов: а) аэрозольное нанесение, б) в виде пены



Рис. 2. Ультрафиолетовый облучатель MR-96D UV led minilight

Применение магнитопорошкового контроля возможно на ферромагнитных материалах и характеризуется высокой скоростью работ и небольшой трудоемкостью. Информация о методике проведения контроля регламентирована серией стандартов [ДСТУ EN ISO 9934](#) [5].

Однако необходимость намагничивания ограничивает перечень материалов, которые можно поддавать контролю, а оборудование для намагничивания не всегда подходит для работ в полевых условиях.

3.3. Вакуумно-пузырьковый метод

Вакуумно-пузырьковый метод контроля основан на регистрации изменения давления в замкнутом объеме изделия, то есть применяется для обнаружения сквозных дефектов (свищей, прожогов, сквозных трещин). При контроле данным способом, со стороны проверяемого участка сварного соединения, смоченного индикаторным раствором, устанавливается вакуум-камера и в ней создается разрежение. Наличие сквозных дефектов определяется появлением пузырьков индикаторного раствора. Рекомендуется использование дополнительных средств для обнаружения пузырьков на поверхности объекта контроля, например, применение подсветки, увеличительных стёкол и т.д.

Данный метод контроля оптимален для экспресс диагностики топливных баков военной техники и др. резервуаров.

К недостаткам метода можно отнести необходимость изготовления вакуум-камер под разную конфигурацию контролируемой поверхности, а громоздкое оборудование для создания вакуума, как правило с сетевым питанием.

4. Результаты и их обсуждение

Для проведения капиллярного НК некоторых деталей военной техники в полевых условиях были использованы пенетрант в виде пены MR-67PS, очиститель MR-88 и проявитель-аэрозоль на сольвентной основе MR-70.

Предварительно, перед нанесением пенетранта, с поверхности объекта контроля удалялись отслаивающиеся покрытия и загрязнения с использованием металлических щеток и очистителя MR-88. Учитывая, что в условиях боевых действий, проведение контроля в соответствии с общепринятыми рекомендациями затруднено, соответственно время ожидания после нанесения пенетранта было минимально возможное.

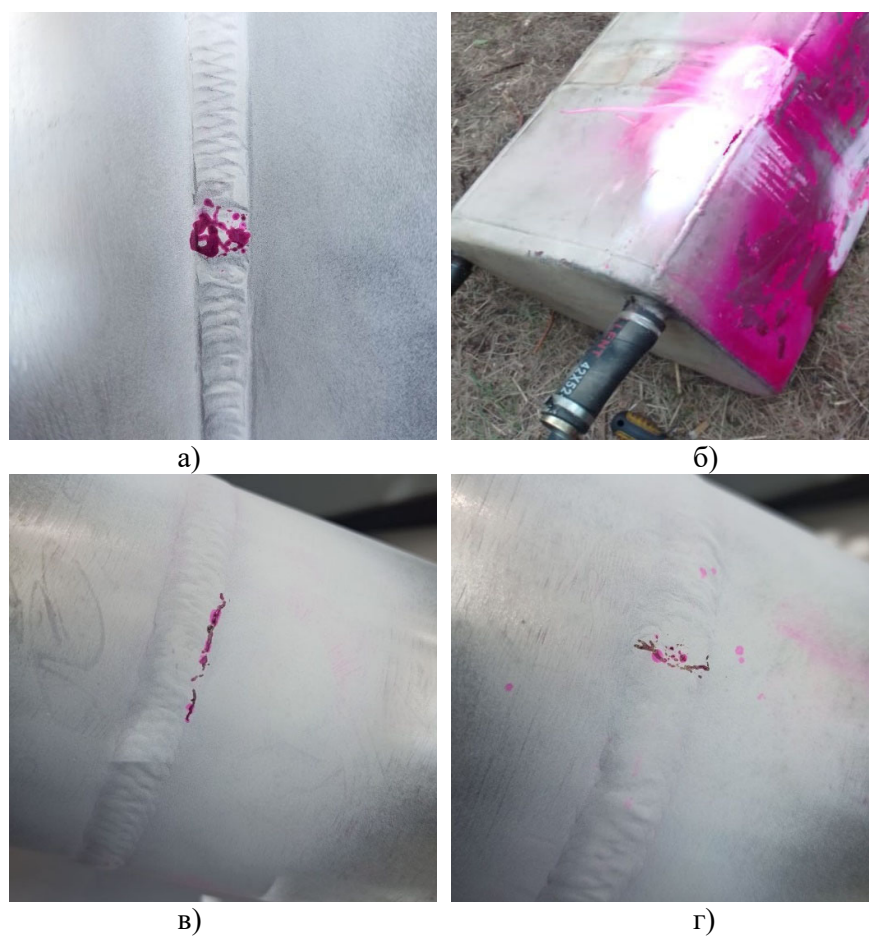


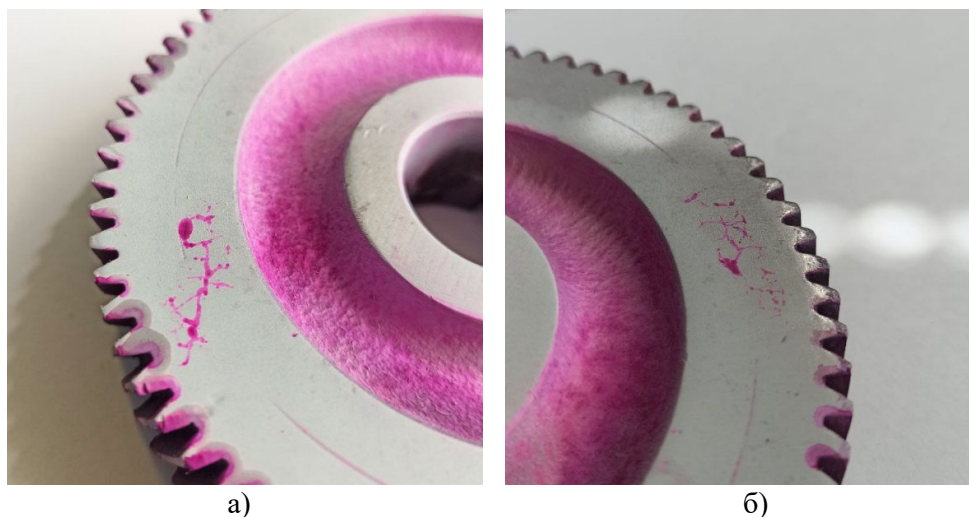
Рис. 3. Результаты контроля сварных соединений:
а) дефекты в стыковом сварочном шве; б) дефекты в продольном сварочном шве топливного бака; в) и г) – дефекты в кольцевом сварном шве трубчатой детали

На рис. 3 приведены результаты контроля качества сварных соединений деталей военной техники. Приведенные результаты свидетельствуют о возможности выявления критически важных дефектов в условиях использования граничных значений по времени

проведения контроля и возможности выявления дефектов с минимальной очисткой детали.

В дальнейшем ремонт и ликвидация течей, возникших по причине дефекта в сварочном соединении, выполняется сваркой, пайкой, нанесением герметика или клейких лент. Однако вовремя продиагностированная деталь позволяет прогнозировать ее остаточный ресурс и ресурс всего изделия в целом, продлить срок службы техники и элементов, а ремонт выявленных дефектов либо запланировать на подходящее для этого время, либо произвести немедленно.

Результаты обнаруженных дефектов зубчатых колес приведены на рис. 4. Как видно на снимках, достаточно легко идентифицировать дефекты в виде скопления трещин разной ориентации и протяженности.



**Рис. 4. Результаты капиллярного контроля зубчатого колеса:
а) и б) – скопления дефектов типа трещина**

Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования остаточного ресурса и необходимости замены дефектных деталей, что в условиях военных действий позволяет заранее позаботиться о наличии запасных частей или списании техники.

5. Заключение

В данной работе продемонстрированы неоспоримые преимущества применения капиллярного метода НК для выявления поверхностных и сквозных дефектов в условиях ограниченных ресурсов - времени, энергоснабжения, оборудования и персонала. Этот метод позволяет обеспечить быструю качественную экспресс диагностику военной техники в полевых условиях, а также лишен указанных недостатков магнитопорошкового и вакуумно-пузырькового методов.

Благодаря простоте проведения и наглядности результатов возможно своевременное выявление повреждений топливных баков, несущих рам боевых машин, кузовных деталей и других металлоконструкций. Такой подход позволяет избежать отказа указанных элементов в критических условиях.

Описанный в работе подход экспресс диагностики военной техники хорошо зарекомендовал себя в реальной обстановке, что способствовало своевременному

проведению ремонтных работ для достижения максимального эффекта от применения данной техники.

Литература

1. Горкунов Б.М., Глоба С.Н. Капиллярный неразрушающий контроль. Чувствительность и оценка результатов контроля. Учебн.-метод. пособие. Харьков: НТУ"ХПИ", 2005, 72 с.
2. Petryk V.F., Protasov A.G., Galagan R.M., Muraviov A.V., Lysenko I.I. Smartphone-Based Automated Non-Destructive Testing Devices. *Devices and Methods of Measurements*, 11(4), 2020, pp. 272-278.
3. Глоба С.Н., Хорло Н.Ф., Стороженко С.В. Особенности проведения капиллярного метода неразрушающего контроля. *Електроніка та перетворювальна техніка*, №12, 2010, с. 122-127.
4. ДСТУ EN ISO 3452-1:2014 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи (EN ISO 3452-1:2013, IDT)
5. ДСТУ EN ISO 3452-2:2014 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування дефектоскопічних матеріалів (EN ISO 3452-2:2013, IDT)
6. ДСТУ EN ISO 3452-3:2014 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3. Контрольні випробувальні зразки (EN ISO 3452-3:2013, IDT)
7. ДСТУ EN ISO 3452-4:2008 Неруйнівний контроль. Контроль капілярний. Частина 4. Устаткування (EN ISO 3452-4:1998, IDT)
8. ДСТУ EN ISO 3452-5:2014 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5. Капілярний контроль при температурах понад 50°C (EN ISO 3452-5:2008, IDT)
9. ДСТУ EN ISO 3452-6:2014 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6. Капілярний контроль при температурах нижче 10°C (EN ISO 3452-6:2008, IDT)
10. Produkte MR Chemie. Access: <https://www.mr-chemie.de/produktuebersicht/eindringpruefung/>, 2022
11. ДСТУ EN ISO 9934-1:2018 Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги (EN ISO 9934-1:2016, IDT; ISO 9934-1:2016, IDT)
12. ДСТУ EN ISO 9934-2:2015 Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 2. Засоби контролю (EN ISO 9934-2:2015, IDT; ISO 9934-2:2015, IDT)
13. ДСТУ EN ISO 9934-3:2015 Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 3. Обладнання (EN ISO 9934-3:2015, IDT; ISO 9934-3:2015)



CT Analysis of Samples Consolidated by Spark Plasma Sintering of the Ti - TiC Powder

Rositza DIMITROVA, Plamen TASHEV

Bulgarian Academy of Sciences - Institute of Metal Science, Equipment and Technologies with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”, 67 Shipchenski Prohod Blvd., 1574 Sofia, Bulgaria
e-mail: rossy@ims.bas.bg

Abstract

Three types of samples are subjected to Micro X-ray Computed Tomography (CT) with microtomograph SkyScan 1272, Bruker. Samples consolidated by spark plasma sintering of the Ti - TiC powder, are studied. The powder mixture was obtained through High-Voltage Electrical Discharge (HVED) treatment in kerosene with “point – plane” electrode system at the Institute of Impulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: CT analysis, High-Voltage Electrical Discharge, Ti - TiC powder, spark plasma sintering

анализ на образци, получени чрез плазмено-искрово синтероване на прах Ti – TiC

Росица ДИМИТРОВА, Пламен ТАШЕВ

1. Увод

Микро-рентгеновата компютърна томография (СТ) е безразрушителна техника за изследване на вътрешната структура на материалите. Тя се използва за изследване на широк спектър от материали, включително скали, кости, керамика, метал и меки тъкани. СТ сканиранията се създават чрез серии рентгенови лъчи, които са форма на радиация в електромагнитният спектър. Скенерът емитира рентгенови лъчи към пробното тяло от различни ъгли при зададена стъпка, като детекторите измерват разликата в рентгеновите лъчи, абсорбирани от тялото, и рентгеновите лъчи, преминали през тялото. Първоначално използван за диагностика в медицината [1÷5], този метод в последните години успешно се използва за изследване и контрол на материалите в инженерната и научна практика [6÷10].

2. Материали и методи за изследване

2.1 Получаване на образците

Извършено е изследване на плазмено-искрово синтеровани образци от прахове система Ti-TiC, получени чрез високоволтов електроразряден синтез (HVED) в среда от керосин или спирт с електродна система „точка – равнина“. Образците и съответните прахове са създадени от колектив под ръководството на проф. Олга Сизоненко от Института за импулсни процеси и технологии към Национална академия на науките на Украйна [11,12,13] и са ни предоставени за изследване по партньорска програма. Образците са изработени от колегите при един и същи режим на спичане. Различават се по технологията на получаване на използваните при синтероването прахове.

Прахът за образец с номер 9 е получен в среда на етанол под въздействието на 1 електрод, този за образец с номер 10 е получен в среда на керосин под въздействието на 1 електрод а за образец с номер 12 е получен в среда на керосин под въздействието на 3 електрода. Запазена е оригиналната номерация на изпратените от колегите образци.

2.2 СТ анализ

СТ анализът е направен чрез микротомограф SkyScan 1272, Bruker, закупен по Проект BG05M2OP001-1.001-0008 „Национален център по мехатроника и чисти технологии“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“ 2014-2020. Микротомографът е показан на фигура 1. Той е предназначен за експресно и безразрушително изследване на порести метални и неметални пени и изделия от тях, повърхностни и обемни пукнатини, получени при работа или различни изпитвания на мехатронни компоненти и др. Получава се детайлна информация за наличието на различни по плътност фази в обема на изследвания материал, геометрични характеристики на фази с неправилна форма и тяхната структура, процентно съдържание на обща, отворена и затворена порестост, и процентно разпределение на порите с различни диаметри в обема на материала. Специално разработената оптична система и методика за измерване позволява изследванията да се провеждат с висока резолюция при различни по размер и геометрия пробни тела.



Фигура 1. Микротомограф SkyScan 1272, Bruker

Някои от характеристиките на Skyscan 1272 са:

- Фокус на източника на рентгеново лъчение при 4 W: $< 5 \mu\text{m}$.
- Номинална резолюция: $< 0.35 \mu\text{m}$.

- Автоматичен 6-позиционен превключвател на филтри за широкообхватна избор на енергия от източника, осигуряващ най-добрите условия за сканиране за всякакъв вид проба.
- Масичка за образеца с 360° въртене в двете посоки със стъпка 0.01°; автоматично микро-позициониране на обекта спрямо източника.
- Диаметър на сканирания обект от 5 до 60 mm; дължина на сканирания обект от 5 до 60 mm.
- Софтуер за управление на системата и специализиран софтуер за реконструкция, съхранение на данни, визуализация и експорт към друг софтуер за 3D изображения.

Налични са следните функции за анализиране на 3D изображения:

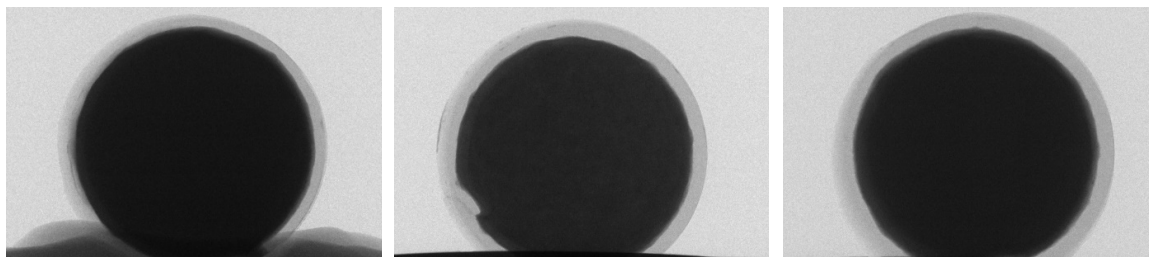
- реалистична 3D визуализация – представяне на повърхността и обема;
- преглед на триизмерните обеми сечение по сечение;
- извличане и визуализация на произволни 2D сечения;
- измерване на разстояния в реални единици за разстояние;
- измерване на площи на повърхност в реални единици на площ;
- измерване на обеми и обемни части в реални единици за обем.

След извършване на първоначални настройки са избрани следните параметри на пролъчване: разделителна способност 1632x1092 pxl, големина на pxl: 12 μ m, филтър Cu 0.11mm, напрежение на източника 100 kV, ток на източника 100 μ A, стъпка на пролъчване: 0.400°, 360° пролъчване (пълно завъртане на образците).

След приключване на пролъчване е направена 3D - реконструкция чрез обработка на получените графични изображения със софтуер NRecon v. 1.7.4.2. За визуализация на резултатите и получаване на разрези в различни сечения е използван софтуер CTBox v.3.3.0r1403.

3. Резултати

На *фигура 2* са показани рентгеновите проекции на трите образеца при стартиране на пролъчването, т.нар. предварителен изглед.



образец 9

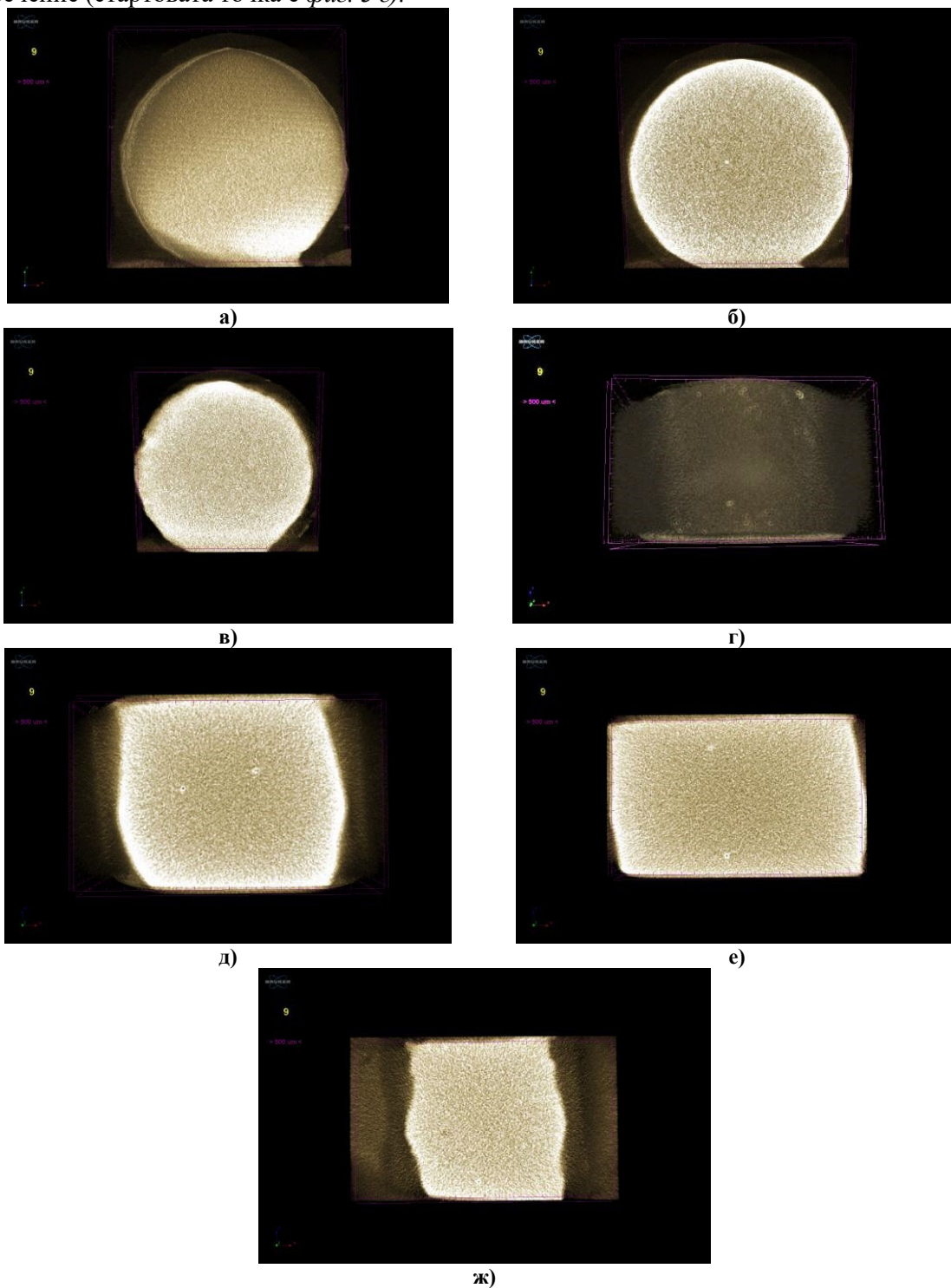
образец 10

образец 12

Фигура 2. Проекции на образците

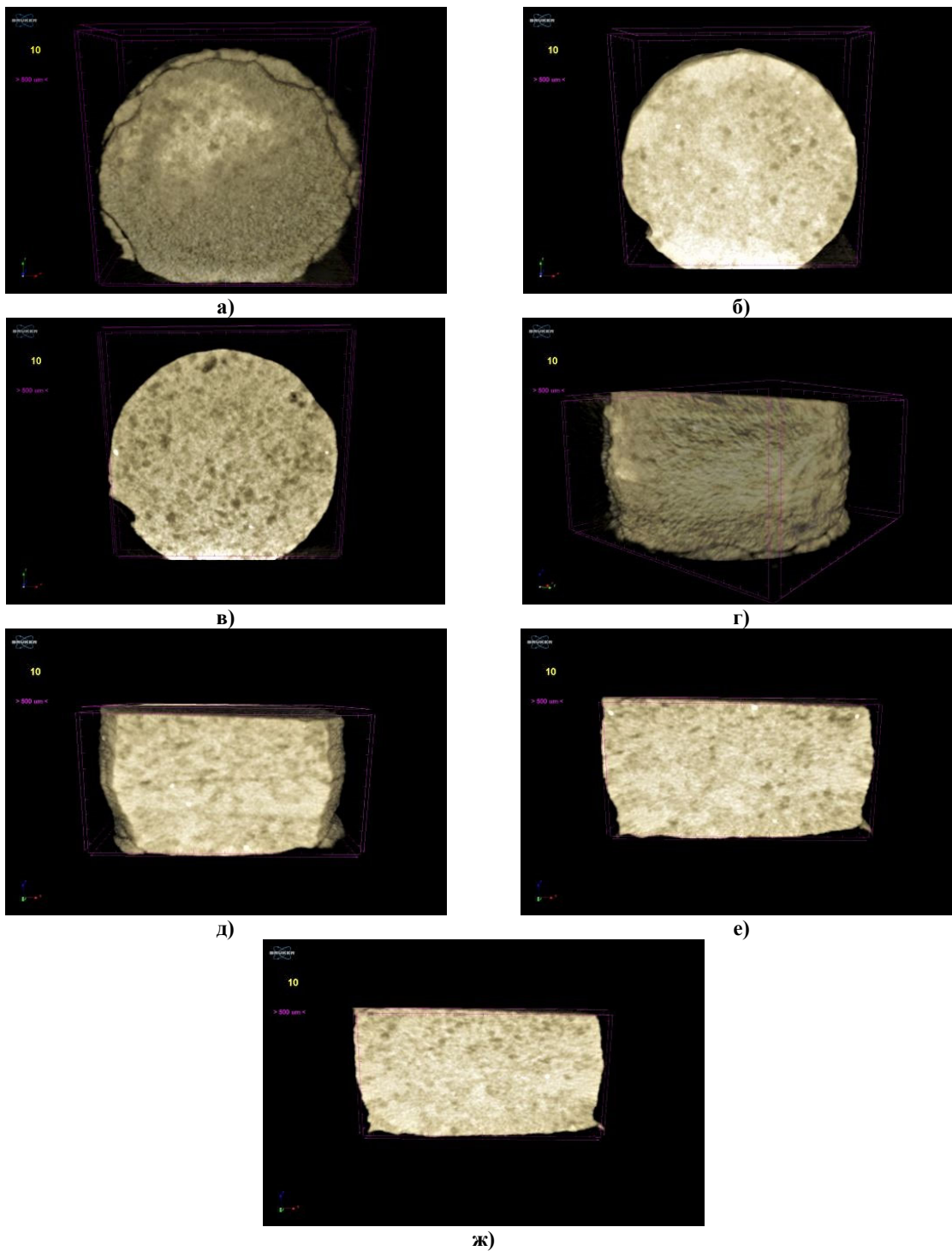
На *фигура 3 а,г* са дадени визуализации на образец 9 при различна пространствена ориентация, като в долният ляв ъгъл е дадена координатната система, а под номера на образеца е дадена марка за оразмеряването му. На *фигура 3 б-в* са показани разрези в

напречно сечение (стартовата точка е *фиг. 3 а*), а на *фигура 3 д-ж* – надлъжното му сечение (стартовата точка е *фиг. 3 г*).



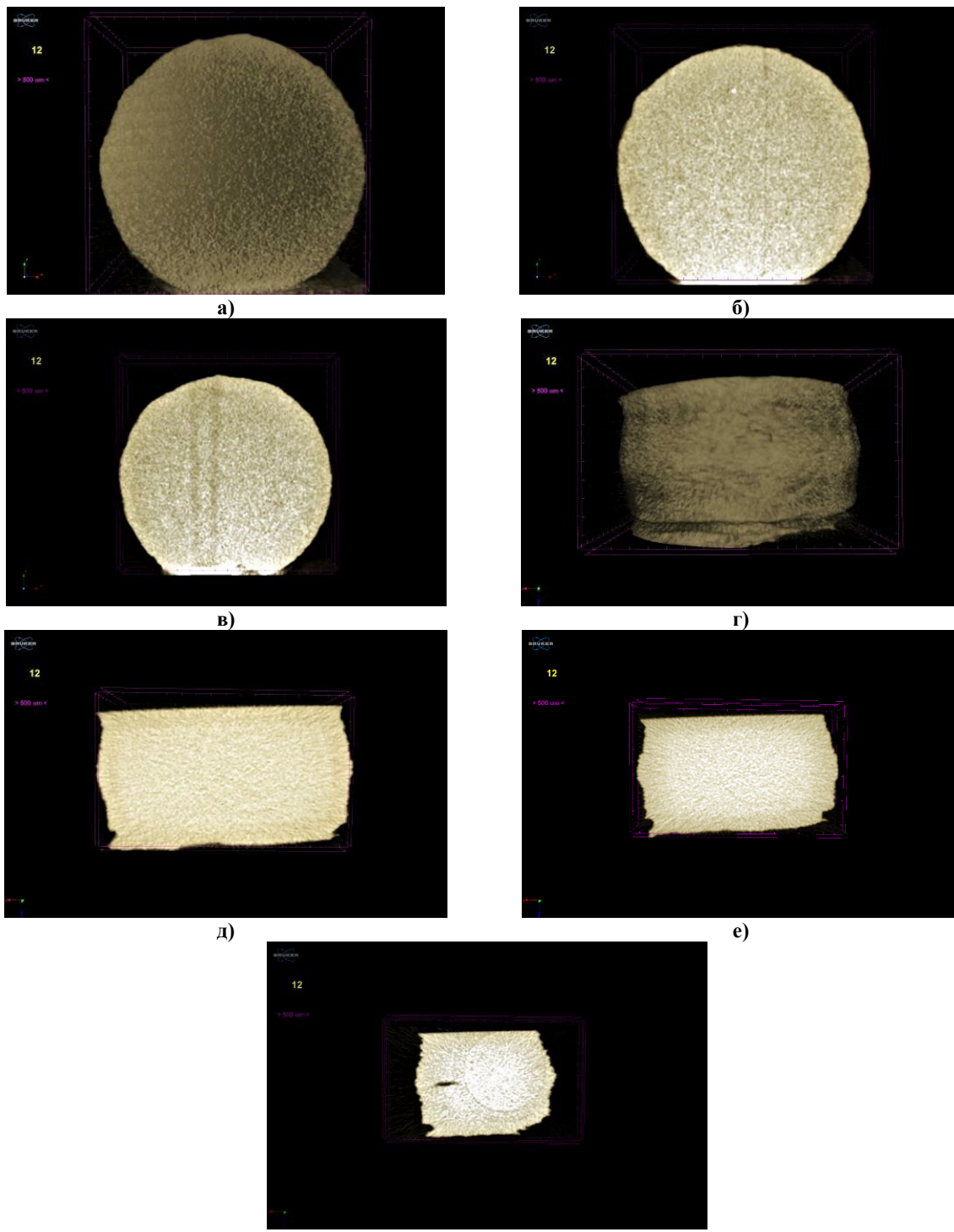
Фигура 3. Визуализации на образец 9

На *фигура 4 а,г* са показани визуализации на образец 10 при различна пространствена ориентация. На *фигура 4 б,в* са показани разрези в напречно сечение (стартовата точка е *фиг. 4 а*), а на *фигура 4 д-ж* – надлъжното му сечение (стартовата точка е *фиг. 4 г*).



Фигура 4. Визуализации на образец 10

На *фигура 5 а,г* са показани визуализации на образец 12 при различна пространствена ориентация. На *фигура 5 б,в* са показани разрези в напречно сечение (стартовата точка е *фиг. 5 а*), а на *фигура 5 д-ж* – надлъжното му сечение (стартовата точка е *фиг. 5 г*).



Фигура 5. Визуализации на образец 12

Структурата на образец 9 като цяло е хомогенна, като на места се открояват поплътни (по-светли) частици. Особено добре тези частици се виждат на едната стена на образца (*фиг.3 з*) и в надлъжните сечения през цялата му дебелина (*фиг. 3 д-ж*). Интересното при надлъжните сечения на образец 9 е, че светлите (плътни) частици винаги имат неплътен (тъмен) център.

Като цяло, структурите на образци 9 и 12 са сходни – дисперсни, като плътните частици, които се наблюдават в образец 9, се срещат рядко при образец 12. Структурата на образец 10 се различава освен, че е много по-груба и нехомогенна, и с появата на пукнатина в близост до единия край (*фиг. 4 а, з*). В образец 10 също се наблюдават светли (с висока плътност) частици (*фиг. 4 б, в, д-ж*).

4. Изводи

- Методът на микро-рентгеновата компютърна томография позволява бързо безразрушително изследване на пробни тела и детайли за откриване на неплътности, проследяване на разпределението на фази с различна от тази на основният материал плътност, изследване на порести материали.
- Благодарение на описаните по-горе възможности методът успешно може да бъде прилаган при разработване на нови материали, за контрол на качеството и при обучение на специалисти в областта.

This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP "Science and Education for Smart Growth 2014 - 2020", Project CoE "National center of mechatronics and clean technologies", № BG05M2OP001-1.001-0008-C08.

Литература

1. Ferràs-Tarragó J., Sanchis-Alfonso V., Ramírez-Fuentes C., Roselló-Añón A., Baixauli-García F. A 3D-CT Analysis of Femoral Symmetry—Surgical Implications. J. Clin. Med. 2020, 9, 3546; [doi:10.3390/jcm9113546](https://doi.org/10.3390/jcm9113546).
2. Crews, M. S., Bartholmai, B. J., Adegunsoye, A., Oldham, J. M., Montner, S. M., Karwoski, R. A., Husain, A. N., Vij, R., Noth, I., Streck, M. E., Chung, J. H. 2020. Automated CT Analysis of Major Forms of Interstitial Lung Disease. J. Clin. Med. 9, 2020, no. 11: 3776. <https://doi.org/10.3390/jcm9113776>.
3. Pinto J.C., Torres F.F.E., Santos Jr. A.O., Tavares K.I.M.C., Guerreiro-Tanomaru J.M., Tanomaru-Filho M. Influence of voxel size on micro-CT analysis of debris after root canal preparation. Braz. Oral Res. 2021;35:e008. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2021.vol35.0008>.
4. Song X., Wang J., Cai H., Yang C., Mo Y., Zhu M., Zhu G., Ye L., Jin M. Use of quantitative CT analysis to evaluate the degree of lung destruction in lymphangiomyomatosis. Research Square, preprint.
5. Zogheib C, Roumi R, Bourbouze G, Naaman A, Khalil I, Plotino G. Effects of ultrasonic refinement on endodontic access cavity walls: A microcomputed tomography analysis. J Conserv Dent 2021, Vol. 24, Iss. 1. January-March 2021. [DOI:10.4103/JCD.JCD_599_20](https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_599_20).
6. Ziółkowski, G., Treter, G., Tokarczyk, E., Szymczyk-Ziółkowska, P. (2020). New possibilities for in situ CT analysis of additive manufactured samples. Technical Transactions, e2020028. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2020028>.
7. Sirr S A, Waddle J R. CT analysis of bowed stringed instruments. Radiology. Jun 1997, <https://doi.org/10.1148/radiology.203.3.9169708>.
8. Yoon, J.; Kim, H.; Sim, S.-H.; Pyo, S. Characterization of Porous Cementitious Materials Using Microscopic Image Processing and X-ray CT Analysis. Materials 2020, 13, 3105. <https://doi.org/10.3390/ma13143105>.

9. Mukunoki T., Miyata Y., Mikami K., Shiota E. X-ray CT analysis of pore structure in sand. *Solid Earth*, 7, 929–942, 2016. [doi:10.5194/se-7-929-2016](https://doi.org/10.5194/se-7-929-2016).
10. Bakalova T., Kolínová M., Louda P. Micro CT analysis geopolymer composites. *Manufacturing Technology* 14(4):505-510. DOI: [10.21062/ujep/x.2014/a/1213-2489/MT/14/4/505](https://doi.org/10.21062/ujep/x.2014/a/1213-2489/MT/14/4/505).
11. Effect of Ti-C and Ti–Al–C system master alloy high energy synthesis on efficiency of ni based superalloy inoculation. Syzonenko O., Lypian Ye., Torpakov A., Zaichenko A., Prystash M. XXIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE FPEPM 2019
12. Syzonenko, O.M., Loboda, P.I., Zaichenko, A.D., Solodkiy Ye.V., Torpkov A.S., Prystash, M.S., Trehub, V.O. The influence of high-voltage electrical discharge on dispersion and structure of B4C powder. *Journal of Superhard Materials*, 2017, 39(4), P. 243–250.
13. Kuskova N.I., O.M. Syzonenko, A.S. Torpakov. Electric discharge method of synthesis of carbon and metal–carbon nanomaterials. *High Temperature Materials and Processes*. 2020. Vol. 39, Issue 1. P. 357-367.



Influence of Friction Stir Welding Modes on the Mechanical Properties of Polyethylene Joints

Danail GOSPODINOV, Nikolay FERDINANDOV

Department of Material Science and Technology at the University of Ruse, Ruse, Bulgaria,
e-mails: dgospodinov@uni-ruse.bg, nferdinandov@uni-ruse.bg

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a relatively new method where heat is generated by the friction between the welded parts and a special tool, and the heat generated does not exceed the melting temperature of the welded parts. Although the method is mainly used for welding metals, it has recently been applied to polymers as well. The aim of the study is to investigate the influence of the parameters of the welding mode and the shape of the tool on the mechanical properties of welded polyethylene (PE) joints. Tool with a stationary shoulder and a triangular pin shape was used.

Keywords: Friction stir welding, polymeric materials, mechanical properties, polyethylene

Влияние на режимите на заваряване чрез триене с разбъркване върху механичните свойства на съединения от полиетилен

Данаил ГОСПОДИНОВ, Николай ФЕРДИНАНДОВ

1. Увод

Използването на полимерни материали в космическата, автомобилната и електронната промишленост през последните години е все по осезаемо най-вече поради високата им специфична якост (съотношение на якост към тегло), корозионна устойчивост и възможност за получаване на детайли с различна форма. [1,2,3,4,5,6]. Производството на по-големи и сложни конструкции обаче от такива материали изисква и прилагането на различни начини за свързване като лепене, механично свързване и заваряване [7]. Развитието на тези технологии е едно от големите предизвикателства към инженерите работещи в тази област.

Заваряването чрез триене с разбъркване (ЗТР) (Friction Stir Welding) е един от най-иновативните методи създаден през последните години. Той се използва основно за заваряване на алуминиеви сплави, но поради своите предимства: осъществява се основно в твърдо състояние, прилага се за детайли с различни дебелини, характеризира се с малки напрежения и деформации, използва се за материали, които се заваряват много трудно или невъзможно чрез конвенционалните електродръгови методи [8,9] представлява сериозен интерес и по отношение на приложението му за заваряване на полимерни материали. Според [10] при заваряването на полипропилен например механичните характеристики на получените съединения са по-високи след използване на ЗТР отколкото след други методи.

При този метод получаването на заварени съединения с високи механични характеристики зависи от вида на използвания инструмент и режимите на работа. Според някои автори [11] традиционните инструменти (използвани за метални материали) не са подходящи за заваряване на полимери. Основни причини за това са лошата

топлопроводност и ниската температура на топене на тези материали. Поради това понастоящем много активно се работи по създаването на нови видове инструменти, като най-подходящи на този етап са тези с горещо неподвижно рамо, което се нагрява до температури 80...140°C [12]. От основните параметри на режима на работа най-съществено влияние оказват скоростта на въртене на инструмента и скоростта на заваряване, докато ъгъла на наклон на инструмента влияе значително по-малко [1]. Влиянието на режимите на работа върху якостта на опън на заварени съединения от полиетилен е представено в [13]. Според авторите оптимална стойност на механичните характеристики на заварените съединения (около 75% от тази на основния материал) е налице само при определено съчетание на тези параметри на режима.

По тази причина избора на подходящо съчетание между режими на работа и инструмент е определящо за качеството на получените заварени съединения от полимерни материали.

Цел на настоящата работа е да се определят параметрите на режима на работа за използвания инструмент, осигуряващи най-добри механични свойства на заварени чрез триене с разбъркване съединения от полиетилен.

2. Методика

За реализиране на целта на работата в изследването е използван полиетилен PE 1000 UHMWPE (ultra-high molecular weight polyethylene) с дебелина 10 mm. Причините за избор на този материал са свързани с широкото му използване (най-голям относителен дял от всички полимерни материали). Основните предимства на този материал, обуславящи широкото му приложение са свързани с: много голяма удароустойчивост; много висока устойчивост на износване и разрушаване; отлична химическа устойчивост; самосмазващ се материал с добри приплъзващи качества; отлични електроизолационни свойства; безшумно опериране и редуциране на вибрациите; лесен за обработване; с нисък коефициент на триене. Най-често използваните методи за получаване на неразглобяеми съединения от PE са заваряване посредством: горещ газ; инфрачервена светлина; ултразвук; лазер; горещ елемент и др.

Механичните свойства на материала в състояние на доставка, определени при изпитване на опън, са: $R_{p0.2} = 14$ МПа; $R_m = 27$ МПа; $A = 850$ %.

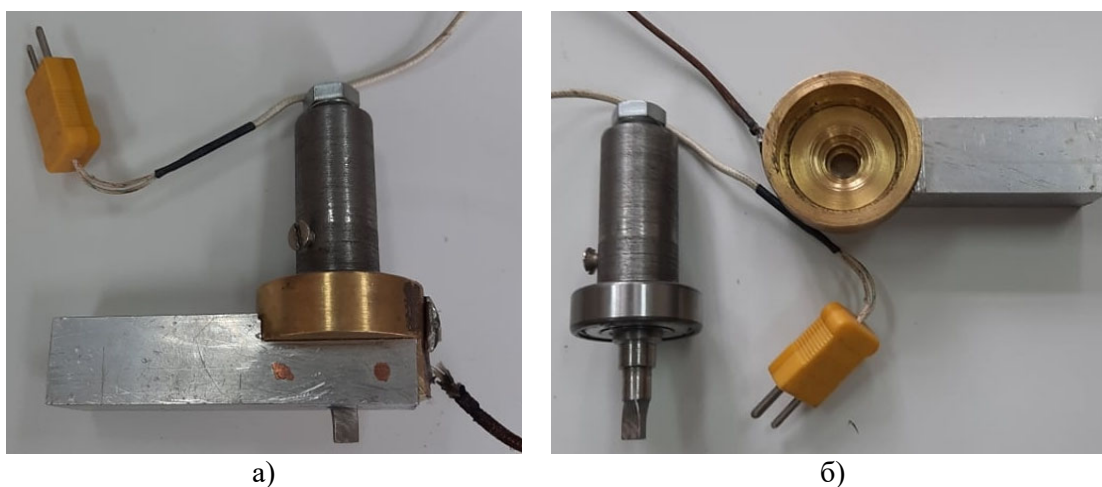
Заваряваните части са с размери 200x80x10mm. За тяхното неподвижно установяване е използвано приспособление, показано на фигура 1. То се състои от подложна плоча с дебелина 10 mm, върху която посредством фиксиращи устройства са закрепени частите за заваряване. Фиксаторите имат и предназначение да предотвратяват въртенето на неподвижното рамо. След заваряване от съединенията са изрязани механично пробни тела за изпитване на опън.

За разлика от заваряването чрез триене с разбъркване на метални материали, където основно се използват инструменти с въртящи се щифт и рамо, при заваряване на полимерни материали, по-добри резултати се получават при използване на инструменти с „горещо“ неподвижно рамо. Особеностите при използване на неподвижното рамо в сравнение с въртящото се (конвенционален инструмент) са свързани с необходимостта от предварителното му нагряване за получаване на заварени съединения с по-добри механични свойства и по-добър външен вид. Неподвижното рамо ограничава изплискването на материала. Високата му температура и специалната му форма водят до по-бавно охлаждане на разтопения материал, което се явява важна предпоставка за получаване на качествено съединение с високи механични свойства. За да се компенсира по-малкото количество генерирана топлина при използване на неподвижно рамо, честотата на въртене на щифта трябва да се увеличи.



Фигура 1. Приспособление за челно заваряване чрез триене с разбъркване на полиетилен с дебелина 10 mm

Заваряването в настоящото изследване е извършено посредством съставен инструмент с неподвижно рамо, показан на фигура 2. Инструментът се състои от подвижен щифт, който се върти с избраната за конкретния режим честота. В случая е използван щифт с триъгълна форма и дължина 9 mm. Той е поместен в държач, който служи за присъединяване към машината и регулиране на излаза му. Неподвижното рамо също се състои от две части, изработени от различни материали. Основната му част (изработена от бронз) служи за водене на щифта посредством радиално-аксиален лагер. Към тази част е монтиран термоелемент, служещ за непрекъснат контрол на температурата му. Към него неподвижно е прикрепена втора част, служеща за предотвратяване на излизането на разтопения полимер от заваръчната вана и за контролирано охлаждане на заваръчния шев. Тази част на инструмента е изработена от квадратна алуминиева тръба с размери 20x20 mm и дебелина 1.5 mm.



Фигура 2. Инструмент за заваряване на полимери с неподвижно рамо

В работата са изследвани осем режима, като при всички е използвана честота на въртене на инструмента 1000 rpm, а скоростта на заваряване се изменя в границите от 12.5 до 40 mm/min (таблица 1).

За всички режими (с изключение на режим 1) преди започване на заваряването рамото на инструмента е подгрявано до температури в диапазона 50...100°C. Нагряването е преустановено след влизане в контакт на инструмента със заварявания материал. Отчетената за всеки режим температура (табл.1) е следствие на генерираната от въртенето на щифта топлина.

Изпитването на опън е проведено съгласно общите изисквания на БДС EN ISO 527-1:2012 - Пластмаси. Определяне на свойствата при опън. Част 1: Общи принципи (ISO 527-1:2012) и специфичните изисквания на БДС EN 12814-2:2003 Изпитване на заварени съединения на термопластични полуготови продукти. Част 2: Изпитване на опън.

Показаните резултати са получени като осреднени стойности от изпитването на три броя образци от всеки режим. Те са с призматична форма, като широчината им е 20 mm, а началната изчислителна дължина $L_0 = 65$ mm.

3. Резултати

Резултатите по отношение на използваните режими на работа и температурата отчетена на инструмента са показани в таблица 1. От таблицата е видно, че температурата при различните режими се изменя в интервала от 50 до 135°C. Разликата в температурите при режим 1 и 2, въпреки еднаквите им параметри на работа, се дължи на предварителното подгряване на инструмента при режим 2 до температура 90 °C. Прави впечатление отчетената температура при режим 3 и режим 8, която показва близки стойности, въпреки двукратното нарастване на скоростта на заваряване. Това най-вероятно се дължи на ниската топлопроводност на заварявания материал. Поради това скоростта на заваряване има второстепенно значение, тъй като затрудненото топлопренасяне води до локализирането на температурното поле в сравнително малък обем. Поради факта, че инструмента е предварително подгрят и поради затрудненото топлопредаване се очаква разлика в температурата по дебелина на заварявания материал. Разликата ще бъде толкова по-голяма, колкото по-висока е температурата на предварително подгряване, по-голяма е скоростта на заваряване и дебелината на заваряваните части и по-ниска е честотата на въртене на щифта. Така създаденият температурен градиент ще доведе до протичане на процеса на свързване при различни температури, което от своя страна ще рефлектира върху свойствата на завареното съединение.

Таблица 1. Връзка между режимите на работа и температурата на инструмента

Режим	Скорост на заваряване	Честота на въртене на инструмента	Температура
	mm/min		°C
1	25	1000	50
2	25		90
3	20		100
4	12.5		110
5	12.5		125
6	12.5		135
7	32		105
8	40		100

При еднакви други условия за режимите 3 и 8 и двукратно нарастване на скоростта на заваряване би следвало да се очаква по-голям температурен градиент т.е свързването на материала в зоните близки до подложната плоча да протича при по-ниски температури за режим 8. По тази причина някои автори препоръчват и подгряване на подложката.

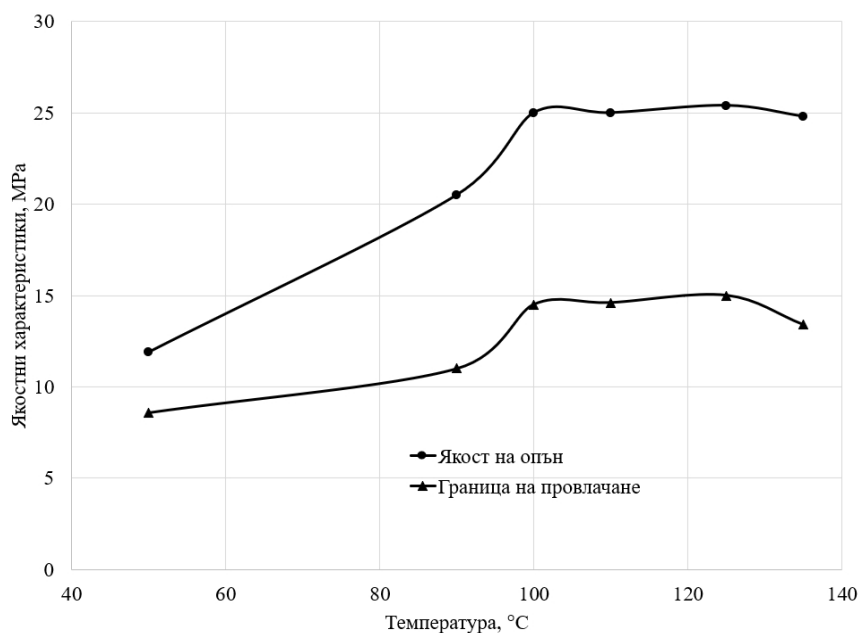
Предварителното проучване на литературните източници показва, че задоволителни механични свойства се наблюдават при температури на заваряване над 100 °С. Резултатите от таблица 1 показват, че задоволителни механични свойства би следвало да се очакват при режими от 3 до 8.

Таблица 2. Механични свойства на заварените съединения

Режим	Граница на провлачане	Якост на опън	Вид на разрушаването	К RmW/RmBM*
	МПа	МПа		
1	8.6	11.9	крехко	0.44
2	11	20.5	крехко	0.76
3	14.5	25	крехко	0.93
4	14.6	25	пластично	0.93
5	15	25.4	пластично	0.94
6	13.4	24.8	пластично	0.92
7	-	22	крехко	0.81
8	12	17	крехко	0.63

*Rm_{BM} – якост на опън на основния материал;

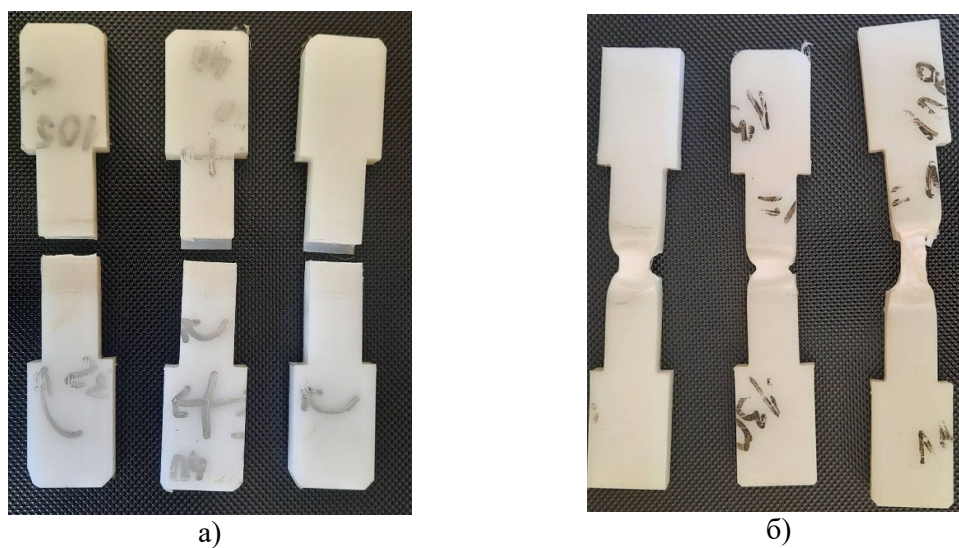
*Rm_W – якост на опън на завареното съединение.



Фигура 3. Механични свойства на получените съединения, в зависимост от температурата на заваряване

Резултатите от проведените механични изпитвания са дадени в таблица 2. На фигура 3 те са графично интерпретирани, като режими 7 и 8 не са включени. Оценката на механичните свойства на заварените съединения е направена на база якостта на опън, като за целта е въведен коефициент $K=Rm_{BM}/Rm_W$. Според БДС EN 12814-8:2003

„Изпитване на заварени съединения на термопластични полуготови продукти. Част 8: Изисквания“ стойностите на този коефициент се изменят в граници $0.7 \div 0.9$ за различните полимерни материали. За полиетилен тази стойност може да достигнат 1.0, което означава, че разрушаването би настъпило извън зоната на заваряване, тоест ще е налице равнояко заварено съединение. В случая стойностите на „K“ варират в границите $0.44 \div 0.94$ като само в два от случаите те са по-ниски от 0.7 (таблица 2). Това показва, че използваните режими съчетани с конкретния инструмент и температура на предварително подгряване на рамото са подходящо подбрани.



**Фигура 4. Пробни тела след изпитване на опън:
а – крехко разрушаване; б – пластично разрушаване.**

От таблица 2 и фигура 4а става ясно, че при пет от осемте режима разрушаването е крехко. Следва да се отбележи, че в тези случаи то винаги настъпва на границата на шева, от страната на излизане на инструмента. Подобни резултати за мястото на разрушаване се представят и от други автори. Причината за крехкото разрушаване е свързана най-вероятно от една страна с по-ниската температура на заваряване и от друга с повишената скорост на охлаждане, поради по-високата скорост на заваряване (режими 7 и 8). Механичните характеристики на пробните тела разрушени пластично (таблица 2 и фиг.4.б) също са по-ниски от тези на основния материал. В тези случаи разрушаването е в заваръчния шев, като започва от долната част на шева, където е регистрирано наличието на непровар (фигура 4б). Като причини за наличието му могат да бъдат посочени ниската температура в долния край на шева поради контакта със студената подложна плоча и неподходящата (по-малка) дължина на щифта.

4. Изводи

- Заваряването чрез триене с разбъркване е съвременен метод подходящ за заваряване, както на метални, така и на термопластични полимерни материали;
- Поради специфичните физико-термични свойства на полимерите инструментите и режимите за тяхното заваряване по използвания метод се различават съществено от тези за метални материали;

- Най-високи характеристики на механичните свойства на получените съединения са налице при режими осигуряващи заваряване в температурния интервал 110÷135°C;
- Използваната дължина на щифта води до получаване на непровар. Той се явява концентратор, водещ до понижаване на механичните свойства;
- Повишаването на температурата на заваряване над 110° е свързано с преход от крехко към пластично разрушаване.
- При скорости на заваряване над 20 mm/min, се наблюдава намаляване на механичните свойства. Това най-вероятно се дължи на неравномерното разпределение на температурата по дебелина и повишената скорост на охлаждане в зоната на заваряване.

Благодарности

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2022-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.

Литература

1. Huang Y., X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao, J. Feng. Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites. *Composites: Part A* 105, 2018, pp 235–257.
2. Strand S. Effects of friction stir welding on polymer microstructure. Brigham Young University, 2004.
3. Barmouz M, P. Shahi, P. Asadi. Friction stir welding/processing of polymeric materials. *Adv Frict Stir Weld Process*, 2014:601–70.
4. Bilici M., A. Yüklер, M. Kurtulmus. The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. *Materials & Design*, 2011, 32:4074–9.
5. Eslami S., T. Ramos, P. J. Tavares, P.M.G.P. Moreira. Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers. *Journal of Manufacturing Processes* 20, 2015, pp 15–23.
6. Eslamia S., T. Ramosa, P. J. Tavaresa, P. M. G. P. Moreiraa. Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers. *Procedia Engineering* 114, 2015, pp 199 – 207.
7. Pramanik A., A. Basak, Y. Dong, P. Sarker, M. Uddin, G. Littlefair. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys: a review. *Compos Part A-APPL S*, 2017, 101:1–29.
8. Eslami S., T. Ramos, P. J. Tavares, P.M.G.P. Moreira. Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers. *Journal of Manufacturing Processes* 20, 2015, pp 15–23.
9. Hirasawa S., et al. Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *J Mater Process Technol.* 2010, 210:1455–63.
10. Kiss Z, T. Czigány. Applicability of friction stir welding in polymeric materials. *Period Polytech. Mech. Eng.* 2007;51:15.
11. Scialpi A., et al. Vibblade: friction stir welding for plastics. *Welding International*, 2009. 23, pp 846-855.
12. Simoes F., D. M. Rodrigues. Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis. *Materials and Design* 59, 2014, pp 344–351.
13. Saeedy S., M. Givi. Investigation of the effects of critical process parameters of friction stir welding of polyethylene. *Proc Inst Mech Eng, Part B: J Eng Manuf* 2011, 225(8):1305–10.



Preparation of Compacts from Aluminum Alloys and Study of the Influence of Thermodeformation Parameters on Their Mechanical Properties

Stoyan VELEV

Institute of Metal Science, Equipment and Technologies
with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, “Shipchenski prohod” Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mail: tony_velev@abv.bg

Abstract.

The creation and study of the properties of nanocomposites is becoming increasingly important. To solve this problem, emphasis is mainly placed on selecting the compacting parameters so as to preserve the super-small grain structure of the material.

Keywords: nanocomponies, microstructure, compacting

Получаване на компакти от алуминиеви сплави и изследване на влиянието на термодформационните параметри върху механичните им свойства

Стоян ВЕЛЕВ

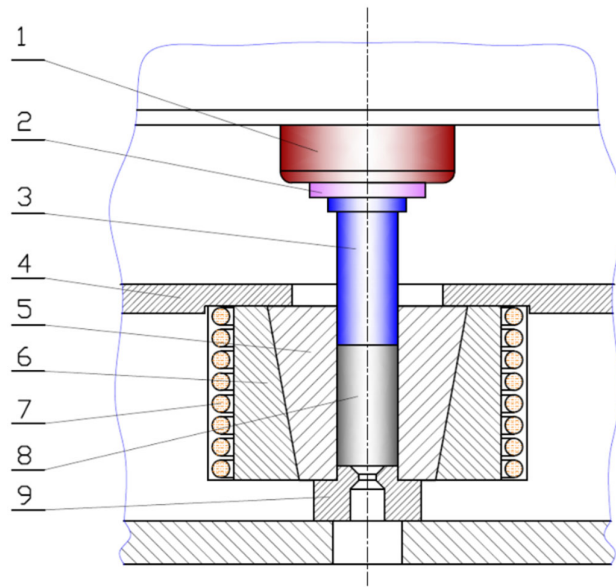
1. Увод

Известните изследвания за сплав със състав Al – 7,5% Fe – 2,2% Si – 1,03% V и за някои видове алуминиеви сплави са сравнително малко. Това са сплави, намиращи приложение при производство на детайли от самолетостроенето, военната индустрия и други.[1-7] Целта на настоящата работа е да се проучат и изследват влиянията, които оказват върху заготовки на алуминиеви сплави с микрокристална структура, изходния материал и параметрите на компактиране. Основен акцент се поставя върху влиянието на тези два фактора върху механичните показатели и структурата на получените заготовки.

Деформационният подход е изостатично студено компактиране (пресоване) с последваща гореща екструзия. Процесът на изостатично студено компактиране (пресоване) се извършва на хидравлична преса PUE-250 SS с помощта на поансон. Проектиран е специален инструмент, с помощта на който заготовката е с краен диаметър 40 mm. Средното натоварване е 250 t тона, което гарантира налягането в прескамерата да бъде 5000 atm. Силата на пресоване се отчита по измервателния прибор на хидравличната преса с точност $\pm 5t$ тона. Тези стойности позволяват да се получи плътност на материала приблизително 75 % от табличната за тази алуминиева сплав. За провеждане на процеса на гореща екструзия е използвана пресформа със собствен нагревател. Температурата се поддържа с помощта на терморегулатор. Този втори етап от процеса на компактиране се осъществява чрез право пресоване, като заготовката се нагрива до температура от 0,8 – 0,85 T_T (T_T – температура на топене на сплавта) и се задържа в пресформата 20 минути (фиг.1). Целта е темпериране на цялата система и

обезгазяване на предварително пресованото пробно тяло. Процесът се извършва при налягане от 4000 – 5000 атм. За намаляване на триенето при пресоването се използва специална смазка от колоиден графит, разтворен в масло „вапор“.

Избраните параметри на компактиране позволяват да се оптимизира процесът като се запази дребнозърнестата структура на материала. Също така при така избрания режим се постига една сравнително добра пластичност, съчетана с висока плътност на компактираните сплави.

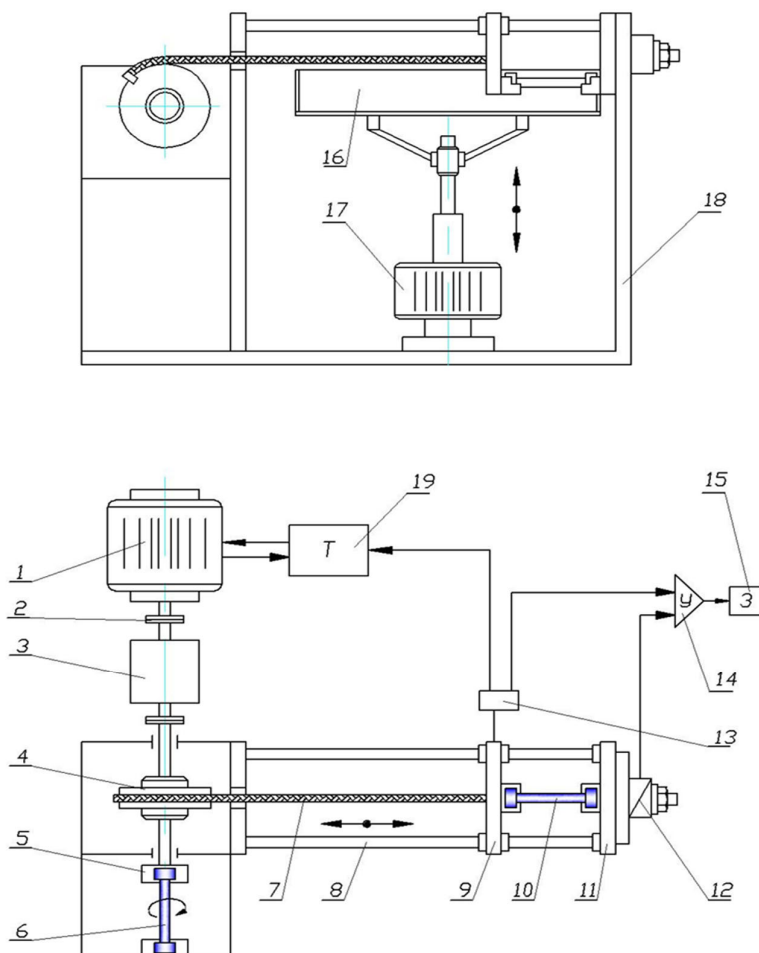


Фиг.1 Схема за получаване на кръгли заготовки чрез право пресоване
 1.Бутало; 2. Изолационна подложка; 3. Поансон; 4. Фланец; 5. Контейнер; 6. Бандаж;
 7. Нагревателна система; 8. Заготовка; 9. Матрица

2. Опитна установка

Създадена е специална установка за изпитване на опън, показана на фиг.2. Чрез нея се определят напрежението на течение σ и коефициентът на скоростно уякчаване m . Ще бъдат извършени и някои други експерименти, изискващи постоянна скорост на деформацията $\dot{\epsilon}$, както и за фиксиране структурата на пробните тела при режими на свръхпластична деформация. Електрозадвижването се осъществява посредством високомоментен електродвигател за постоянен ток с *позиция 1*, който посредством редуктор (планетарен) *позиция 3*, задвижва верижно колело 4 и оттам веригата 7. През нея въртеливото движение се превръща в праволинейно постъпателно движение на челюсти *позиция 9*. Челюстите (подвижна и неподвижна) са разположени на две успоредни колони *позиция 8*, които са закрепени неподвижно към стойката на машината *позиция 18*. Те осигуряват работен ход до 550 mm. Подвижната челюст извършва постъпателно движение, водена от колоните, а неподвижната челюст *позиция 11* е закрепена в горната част на колоните, като посредством специален болт предава усилието към датчик *позиция 12*. Той превръща опъновото усилие в електрически сигнал който се предава към усилвател *позиция 14* и записващо устройство *позиция 15*. Приложената сила върху пробното тяло *позиция 10* е във функция на времето или деформацията. За да бъде регистриран и измерен хода на работната челюст *позиция 9*,

т.е. деформацията (удължението) на пробното тяло, към нея е закрепен датчик *позиция 13*. Установката разполага с нониус (закрепен на специална стойка), а на работната челюст има монтиран показалец. При движението им един спрямо друг се отчита и контролира визуално хода на работната челюст.



Фиг.2. Схема на опитната установка

Установката дава възможност за поддържане постоянна скорост на деформация в диапазона от $10^{-5} \div 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, а също така и изменението и да става безстепенно в посочения интервал. За да бъде осъществена тази постоянна скорост на деформация, сигналът от датчика *позиция 13* се подава на специално тиристорно устройство *позиция 19* (електрически вентил), което променя ъгловата скорост на електродвигателя *позиция 1* в зависимост от движението на подвижната (работна) челюст.

При монтиране на пробното тяло в челюстите на установката се използват специални приспособления (сменяеми носачи). Те могат да се използват за образци с различни размери.

По време на изпитването пробното тяло *позиция 10* трябва да бъде с еднаква температура. За целта в установката е проектирана вана с течност *позиция 16*, в която се потапя пробното тяло по време на натоварването. Посредством електронен

терморегулятор температурата на течността се поддържа в необходимите граници, а с помощта на хидравлично транспортно устройство, ваната може да извърши възвратно постъпателно движение, благодарение на което става потапянето на пробното тяло в течността. Тази конструкция на изпитателната установка дава възможност за изпитания и при криогенни температури както и във въздушна среда. При работа с летливи топлопредаващи среди е предвидена защита на работника със специално проектиран защитен екран и аспиратор. За да бъде извършено закаляване по време на натоварването (закаляване под товар), ваната *позиция 16* се отвежда от пробното тяло и на нейно място се поставя вана с охлаждаща течност.

Предвидена е възможност и за изпитания на пробните образци на усукване. За целта на вала на верижното колело *позиция 4* е монтирана специална захващаща челюст *позиция 5*, в която се позиционира единия край на пробния образец *позиция 6*, а другият му край е неподвижно закрепен (фиксиран). На челюстта е разположен показалец, който при натоварване (усукване) показва ъгъла на усукване върху неподвижно закрепен нониус. Установката притежава електронна и механична система на защита на силовата част от претоварване.

Основни параметри на опитната установка:

- Конструктивна възможност на установката за реализиране изпитвания на опън и на усукване;
- Възможност за движение с постоянна скорост на работната челюст. Поддържане на постоянна скорост на деформация $\dot{\epsilon}$ в диапазона от $10^{-5} \div 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ и възможност за безстепенно регулиране на тази скорост;
- Моментно изменение на скоростта;
- Измерване и записване на усилията на опън или усукване приложени върху пробното тяло;
- Възможност за работен ход от 550mm;
- Максимално натоварване до 50 kN;
- Възможност за нагряване на пробното тяло в среди с различна топлопредавателна възможност;
- Закаляване на образца под товар;
- Измерване и регистриране на хода на подвижната челюст (деформацията на пробното тяло) във всеки един момент;
- Използване на сменяеми носачи (захвати) и оттам възможност за изпитване на плоски и кръгли образци с различни размери;
- Електронна и механична защита на силовата част на системата от претоварване.

3. Апаратура

Използваната изследователска апаратура е инвертен, светлинен, оптичен металографски микроскоп „ReichertMeF2” за микроскопски анализи на метални, керамични, полимерни и композитни материали (фиг.3). С негова помощ е изследвана структурата на получените сплави като е използвана видеокамерата, с която разполага микроскопа и възможността на този модел за компютърна обработка на данните. За директно измерване размерите на отделни фрагменти от структурата е използван вградения нониус.



Фиг. 3

За целта на изследването е използвана алуминиева сплав със състав: 7,5% Fe - 2,2% Si - 1,03V - Al.

Праховият материал от алуминиевата сплав е получен на хоризонтална установка, като с газ под налягане 5atm стопилката се разпръсква чрез дюза в камера с размери 8 x 3 x 2 метра.

Големият обем на камерата позволява праховите частици да кристализират преди да се утаят на дъното и. Полученият метален прах беше разделен чрез ситов анализ на три фракции – табл. 1.

Таблица 1

№ на сплавта	Среден размер на праховите частици μm^2	Максимален размер на интерметалната фаза μm^2
1	77	8,1
2	155	9,3
3	400	18,4

Лентовият материал е получен чрез затвърдяване от стопилка, която се подава чрез кварцова дюза върху периферията на бързо въртящ се водоохлаждаем диск. Разстоянието между края на дюзата и периферията на диска е 0,4 mm, като дюзата е наклонена спрямо вертикалата на 10° .

Компактирането на двата вида материал е извършено на хидравлична преса с помощта на специално разработена пресформа за прахово пресоване. Деформационната технология е двустепенна. Първоначално материала се пресова изостатично при специфично налягане 5000 atm и стайна температура за получаване на изходна заготовка за последваща гореща екструзия. Тя се извършва при температура от 450 до 480 °C (с точност ± 5 °C) и степен на деформация 92%. За смазка е използвано високотемпературно масло “VAPOR”.

Микроструктурите на трите пресовани фракции от прах са показани на фиг. 1, а от лента – на фиг. 2.

От фиг. 5 може да се установи, че в лентовия материал отделянията са с размери много под 1 μm ($\sim 0,30$ μm), а в праховия материал са със среден размер ~ 5 μm .

Чрез предварителни експерименти беше установено, че за да не се удрява при деформационната обработка материала трябва да се пресова при температура 470 °C и време за темпериране max 20 min.

От компактираните прътови заготовки с размер на сечението $\varnothing 12 \text{ mm}$ бяха изработени петкратни пробни образци за механични изпитвания с диаметър на работната част 5 mm .

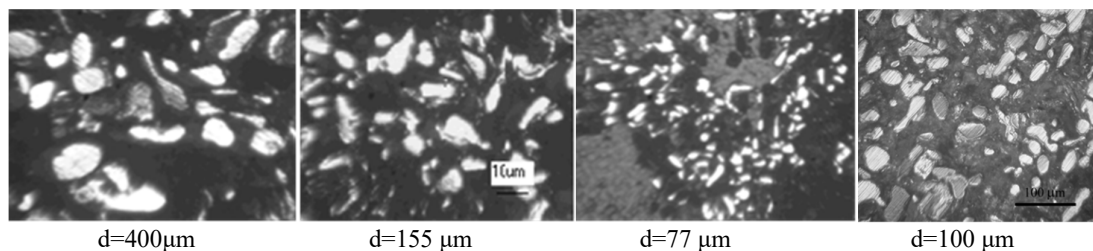
Изпитванията на едноосен опън са осъществени на машина Амслер-Amsler & Co Инвентарен №599/545 на ИМСТЦХА-БАН.

В табл. 2 са показани стойностите на пластичността, оценявани по данните за относително удължение до разрушаване δ_5 и якостта на опън σ_B .

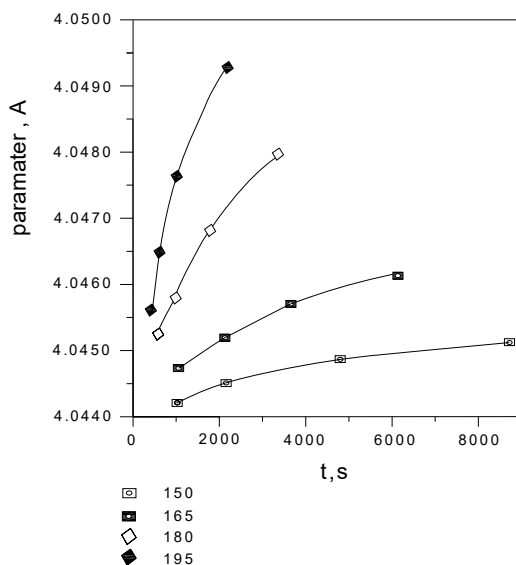
Таблица 2

№ на сплавта	$\delta_5, \%$	$\sigma_B, \text{kg/mm}^2$
1	4,6	39,8
2	9,5	27,2
3	3,2	24,8
лента	4,0	40,5

Опитно беше осъществено компактиране на прах с още по-ситна фракция ($50 \mu\text{m}^2$) при същите технологични условия. Образци от тази фракция показаха показатели: $\sigma_B = 40,1 \text{ kg/mm}^2$ и $\delta_5 = 3,9\%$.



Фиг. 5



Фиг. 6. Нарастване на параметъра на решетката алуминиевата матрица в микрокристалната AlSi11 сплав при температури на изотермично отгряване 150, 165, 180 и 195°C.

Изменението на параметъра на решетката може да се използва за изследване на кинетиката на структурните промени в микрокристалното състояние. На фиг.6 са показани експериментални данни, получени при четири температури в интервала $150 \div 195^{\circ}\text{C}$.

4. Изводи

Получените данни показват, че по-дребнозърнест начален материал е предпоставка за по-дребнозърнести компактирани заготовки. От своя страна по-дребнозърнестата структура гарантира по-висока якост и по-ниска пластичност на компактираната сплав.

Заготовките от изследваната алуминиева сплав, компактирани от първоначален лентов материал притежават сравнително по-добри механични свойства от тези, получени от първоначален прахов материал. Това се дължи най-вероятно на факта, че лентовата сплав е с по-малка повърхност и от там с по-малко окиси, получени в процеса на кристализация. По-малкото повърхностни дефекти от своя страна са предпоставка за по-бездефектни компактирани заготовки.

Все пак при близки стойности на едрината на структурата на лентовата и праховата сплав се получават сравними стойности на механичните показатели на компактираните заготовки с лек превес на тези, получени от първоначален лентов метал (табл. 2).

Получаването на заготовки чрез компактиране на микрокристални сплави осигурява по-голяма хомогенност по отношение на твърдостта на получените изделия.

Литература

1. McCandlish L. E., Kear B. H., Kim B. K., Nanostruct. Mater. V. 1, No. 1. P. 119.
2. Wu L., Lin J., Kim B. K. et al., Proc. of the 13th Inter. Plansee Seminar/Eds. H. Bildstein and R. Eck. Reutte, 1993. V. 3. P. 667.
3. Fang Z., Eason J. W., Proc. of the 13th Inter. Plansee Seminar / Eds. H. Bildstein and R. Eck. Reutte, 1993. V. 3. P. 625.
4. Seegopaul P., McCandlish L. E., Shinneman F. M., Inter. J. Refr. Met. and Hard Mater. 1997. V. 15, No. 1-3. P. 133.
5. Fecht H.-J., Nanostruct. Mater. 1995. V. 6, No. 1-4. P. 33.
6. Andrievski R. A., Kalinnikov G. V., Potafeev A. F. et al., Nanostruct. Mater. 1995. V. 6, No. 1-4. P. 353.
7. Andrievski R. A., Kalinnikov G. V., Potafeev A. F. et al., Nanostruct. Mater. 1995. V. 6, No. 1-4. P. 353.



Examination of Specimens of Aluminum Alloy AL5083 Welded by the TIG Method with Modified Welding Wire Obtained by Friction Extrusion Technology

Yasen HADJITODOROV, Desislava KRUSTEVA, Plamen TASHEV

Institute of Metal Science, equipment, and technologies with Center for Hydro- and Aerodynamics “Acad. A. Balevski” at the Bulgarian Academy of Sciences

e-mails: jason@ims.bas.bg, desislava.krusteva@ims.bas.bg, ptashev@ims.bas.bg

Abstract

Specimens from AL5083 alloy are welded with modified welding wire, obtained by the method of friction extrusion from waste chips from AL6082, with added nano-modifier TiNC. After welding, flat test specimens were made according to the BDS EN ISO 6892-1 standard for tensile testing, as well as samples for metallographic analysis in order to study the structure and strength of the weld. For comparative analysis, test specimens were also made of samples welded with standard welding wire AL5356.

Keywords: Extrusion, friction, aluminum chips, methods, modifiers, welding wire

Изследване на образци от алуминиева сплав AL5083, заварени по метода ВИГ с модифициран заваръчен тел, получен по технологията екструдирани чрез триене

Ясен ХАДЖИТОДОРОВ, Десислава КРЪСТЕВА, Пламен ТАШЕВ

1. Увод

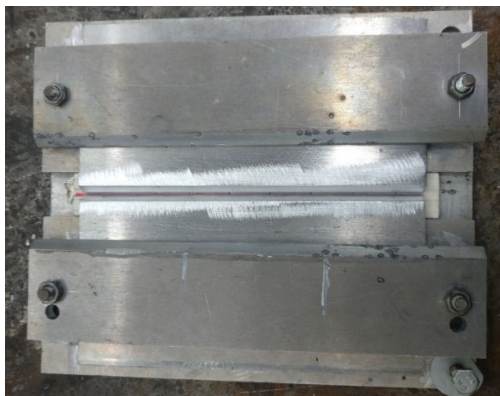
Създаването на модифицирана заваръчна тел е обект на все повече изследвания, тъй като вложените модификатори позволяват постигане на по-дребнозърнеста и качествена структура в зоната на заваръчният шев [1]. Това е особено важно при заваряване на отговорни детайли и възли. Разработени са различни технологии за добиване на модифицирана заваръчна тел и са използвани различни наномодификатори. Изследванията сочат, че едни от най-добрите резултати се получават с използването на TiCN [2]. Използваната от нас технологията за екстудирани чрез триене е иновативен, достъпен и гъвкав метод за получаване на модифицирани заваръчни телове предназначени за ВИГ заваряване на алуминиеви сплави.

2. Постановка на задачата

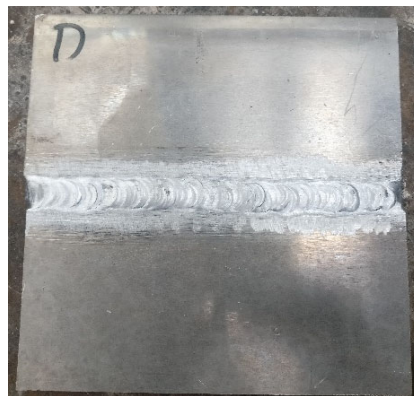
Изследователски екип в ИМСТЦХ-БАН започна проучване за прилагането на метода екстудирани чрез триене за производство на модифицирана заваръчна тел за ВИГ заваряване на алуминиеви сплави. Беше направен сравнителен анализ на свойствата на заварените съединения с модифицирана и стандартна заваръчна тел.

Посредством специално изработено за целта приспособление за заваряване, показано на фиг. 1, бяха заварени образци от сплав AL5083 със стандартна заваръчна тел от сплав AL5356 и с модифицирана заваръчна тел, получена по метода на екстудирани

чрез триене на отпадъчни стружки от AL6082 с добавен наномодификатор TiNC [3]. Използваните частици са добавени посредством метод за механично активиране в планетарна топкива мелница. От направени експерименти е установено, че с концентрация на модификатор от 0.03% има добри резултати [3] и проведените от нас изследвания са с тази концентрация на TiCN (фиг. 2).



Фиг. 1. Приспособление за заваряване



Фиг. 2. Заварени образци от сплав AL5083

С цел получаване на информация за пластичността, якостта и модула на еластичност на заваръчния шев от заварените образци бяха изработени плоски пробни тела по стандарт БДС EN ISO 6892-1 за изпитване на опън (фиг. 3) [4]. От получената по време на изпитването диаграма на опън бяха изчислени и механичните характеристики на заварените съединения.

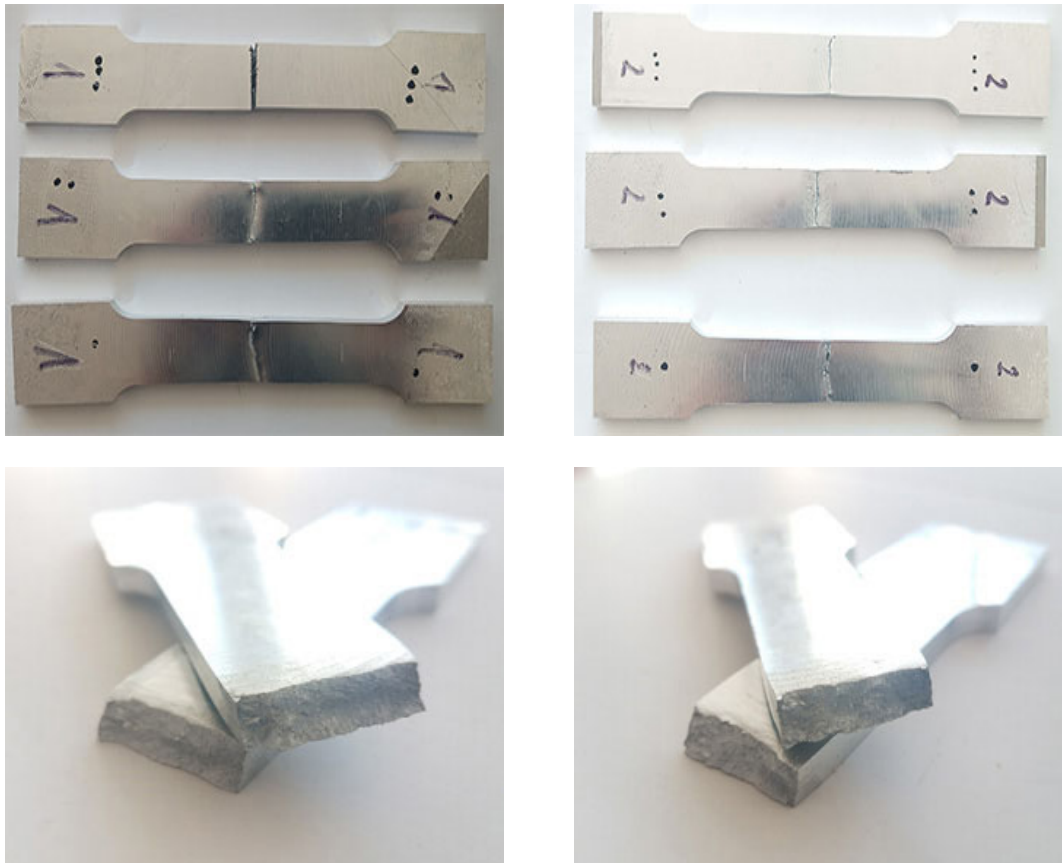


Фиг. 3. Пробни тела за изпитване на опън по стандарт БДС EN ISO 6892-1

Поради пряката зависимост между механичните характеристики на даден материал и структурните характеристики – размера на зърната, наличие на неметални включвания и други фази в основната структура, разположението им в материала и др., бяха изработени образци за металографски анализ. Друг важен аспект на изследване на структурата е възможността да се предскажат свойствата и поведението на материала в процеса на работа на базата на установените структурни елементи и връзката им със свойствата.

3. Резултати и анализи

Изпитването на опън беше осъществено с помощта на специализирана изпитателна машина Амслер 599/545. Подготвените образци бяха изпитани (фиг. 4 а и б) и бяха получени резултати за главни характеристики на механичните свойства на материала. От получените резултати, показани в табл. 1, се забелязва, че образците, заварени с модифицирана заваръчна тел, имат по-висока якост на опън, спрямо удължение при разрушение и усилие на разрушаване.



а. Със стандартна заваръчна тел

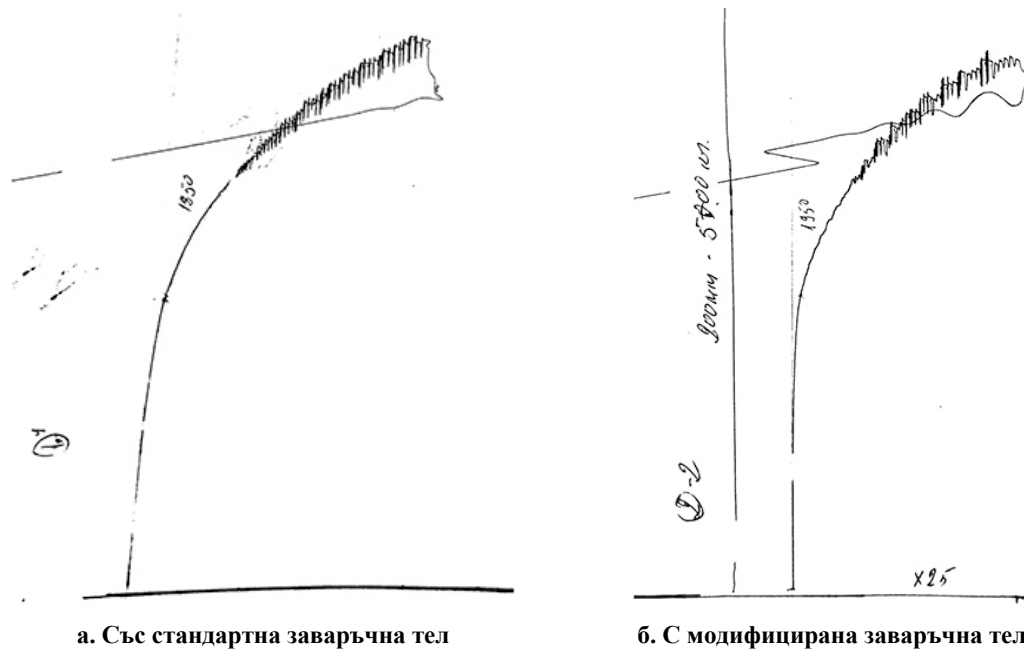
б. С модифицирана заваръчна тел

Фиг. 4. Изпитване на опън на заварени образци

Табл. 1. Резултати от изпитване на опън

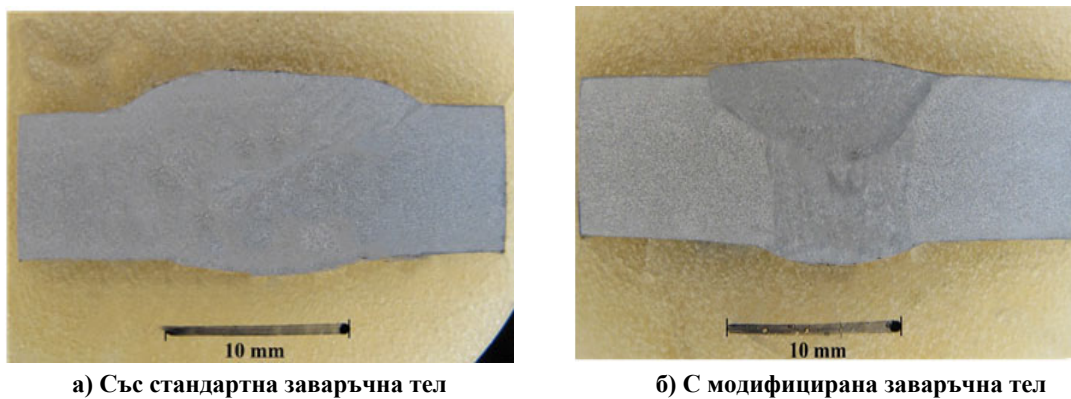
№ по ред	Маркировка	d_0 mm	l_0 mm	P_{max} kg	R_{o^2} MPa	R_m MPa	A_5	F_0
1	1'	22,3x6,3	70	3010	129,05	251,8	2,2	140,49
2	1''	22x6,1	70	2660		194,22	4,3	134,22
3	1'''	22,5x6,3	70	1790		195,8	4,4	141,7
4	2'	23,7x6,3	70	2910		131,01	4,7	149,3
5	2''	23,5x6,3	70	3680	129,08	243,6	8,6	149,03
6	2'''	23,8x6,5	70	3520		223	7,3	154,7

Пластичните характеристики на материала са изчислени от получената от изпитателната машина графика „напрежение-относително удължение“ (фиг. 5 а и б)



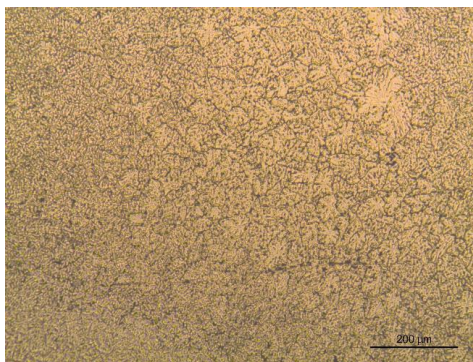
фиг.5 Диаграма на „напрежение-относително удължение“

За получаване на изображенията от металографския анализ е използвана цифрова камера Canon PowerShot G7 и микроскоп Polyvar Met с цифрова камера ProgRes CT3 със софтуер ProgRes CapturePro, при увеличения до $\times 100$. На фиг. 6 а е показана макроструктурата на образец, който е заварен със стандартна заваръчна тел, а на фиг.6 б – с модифицирана заваръчна тел.

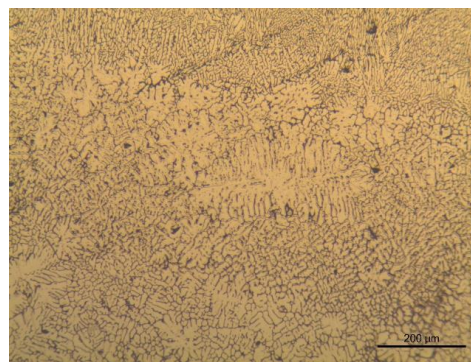


Фиг. 6. Макроструктура на заваръчен шев

На фиг. 7а и 7б се вижда, че микроструктурата и на двата заваръчни шева се състои от области с фино-дендритен и грубо-дендритен строеж (фиг. 7а), като при грубо-дендритната микроструктура се открояват зърна (фиг. 7б).



а. Със стандартна заваръчна тел



б. С модифицирана заваръчна тел

Фиг. 7. Микроструктурата на заваръчния шев

При направените измервания на едрината на зърната на шева на образците, заварени със стандартна заваръчна тел от сплав AL5356, се наблюдава минимален диаметър – 25.33 μm , максимален – 67.38 μm , и среден – 45.20 μm . Докато при направените с модифицирана такава се наблюдават зърна с минимален диаметър от 11.33 μm , максимален – 53.67 μm и среден – 30.96 μm .

4. Изводи

При заварените образци с модифицирана заваръчна тел, получени по метода на екструдиране чрез триене на отпадъчни стружки от AL6082, се наблюдават по-добри механични показатели от тези със стандартна тел.

Металографският анализ показва, че при образците, заварени с модифицирана заваръчна тел, се наблюдава с 37% по-дребнозърнеста структура от тези, заварени със стандартна тел.

От направените изследвания [2] се вижда, че модифицираните заваръчни телове дават подобрение на здравината на заваръчния шев и качеството на структурата на метала. Работата по тази задача ще продължи, като на следващ етап ще се работи с повишени концентрации на наномодификатор TiCN от 0.06%, както и на различни комбинации от модификатори.

Литература

1. <https://wespec.net/production-of-welding-wire/#2080>
2. Н. Алексиев, Изследване влиянието на наноразмерни прахове върху структурата и свойствата при заваряване и наваряване на алуминий-магнезиеви деформируеми сплави, дисертация за присъждане на образователна и научна степен „Доктор“
3. N. Aleksiev, p. Tashev, b. Krustev. Modified wires for tungsten inert gas welding of aluminum alloys with multi-dispersed powders ti-c, al-ti-c, Journal of the Balkan tribological association, vol. 28, no 1, 2022, issn 1310-4772
4. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6892:-1:ed-3:v1:en>

In memoriam
Александър Скордев



27.06.1940 - 29.03.2022

На 29.03.2022 г. почина ст.н.с. д-р инж Александър Данаилов Скордев.

Ст.н.с. д-р Александър Данаилов Скордев е изтъкнат инженер-физик и учен в областта на контрола без разрушаване в България и в Европа. Той е експерт по безразрушителен контрол и по радиационна защита. Ръководил е Школата по дефектоскопия ВУЦ „КВАЛИМА“ от 1989 г. до 2005 г. Ръководител е на СЦП по КБР към ННТДД от 2005 г. до 2022 г. Участвал е в създаването на СЦП по КБР.

Автор е на 6 монографии, повече от 180 публикувани статии, 25 броя учебници и издания на електронен носител, 6 технологични пособия, 20 български стандарти (БДС). Притежава 5 авторски свидетелства за технически средства за контрол без разрушаване. Обучил е над 3000 професионални дефектоскописти, стотици инженери и други специалисти. Ръководил е над 200 проекта в областта на контрола безразрушаване.

Има значително участие в обществената дейност на дефектоскопията в България. Той е бил 7 год. зам. председател на Националната секция по дефектоскопия, 19 год. председател на ННТДД (до 2001 г.) и 14 год. председател на Научно-техническия съюз по машиностроене (от 1992 до 2005 г.). Участвал е в организирането на първите конференции по дефектоскопия в България. Активен участник е в организирането и провеждането на ежегодните конференции по дефектоскопия и Дните на безразрушителния контрол.

С кончината на ст.н.с. д-р инж. Александър Скордев безразрушителният контрол в България загуби един добър преподавател, изследовател, приятел и колега.

Признание за цялата негова всеобхватна дейност и заслуги за появяването, развитието и утвърждаването на безразрушителния контрол у нас и по света, общо 54 години, е удостояването му с високото държавно отличие медал „За заслуга“ с Указ на Президента на Република България, за цялостен принос в областта на инженерните науки и практика като учен, преподавател, физик в сферата на контрола и изпитването без разрушаване и признат общественик. Връчен му от Президента на Република България през 2021 г.

Дълбок поклон пред светлата му памет!