

*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 VI / Issue 4*

*Year 2023*

---

**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, leek, 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, 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

**Grigorii DYMkin**, 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 Kableskov 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 CNITMASH, 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

**EDITORIAL OFFICE:** International Journal “NDT Days”  
Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences  
Acad. G. Bonchev Str., Block 4, Sofia – 1113, Bulgaria  
phone: +359 889 998942  
e-mail: [ndtdays@abv.bg](mailto:ndtdays@abv.bg)  
<http://www.bg-s-ndt.org/journal.html>

Publishing of Volume V (2023) of the International Journal “NDT Days” is partially financed by NPP Kozloduy and TU-Varna under the project HФ7/2023.

## Table of Contents

Measuring the Thickness of Thin Layers and Determining the Characteristics of Electronic Components .....	185
Mihaela ALEKSANDROVA, Bojidar JIVOV, Lyuben LAKOV	
Dynamic Relaxation Spectra in Berillium Bronze .....	190
Stoyan PARSHOROV, Stefan VALKOV, Maria ORMANOVA, Stojko GUROV, Ivan PARSHOROV	
Using the RedPitaya Platform in Automated Eddy Current Testing .....	194
Oleksandr LEVCHENKO, Alexander ALEXIEV, Yurii KUTS, Iuliia LYSENKO	
System for Complex Non-Destructive Testing of Mechanical Engineering Materials .....	202
Yordan MIRCHEV, Boris VELEV, Vladimir KAMENOV	
Optical Gas Sensor for Industrial Applications.....	208
Halina BOHDAN, Mykhailo HLUSHCHENKO, Anatoliy PROTASOV, Oleksandr MURAVIOV	
Оптический датчик угарного газа для промышленности	
Галина БОГДАН, Михаил ГЛУЩЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ, Александр МУРАВЬОВ	
Conventional Methods for Non-destructive Testing of Main Gas Pipelines .....	213
Tsvetomir BORISOV, Yordan MIRCHEV	
Конвенционални методи за безразрушителен контрол на магистрални газопроводи	
Цветомир БОРИСОВ, Йордан МИРЧЕВ	
Non-destructive Research for the Assessment of the Structure and Stress State of Materials.....	222
Yonka IVANOVA	
Безразрушителни изследвания за оценяване на структурата и напрегнатото състояние на материали	
Йонка ИВАНОВА	
Determining the Simultaneous Influence of Several Factors on Abrasive Wear after Layer Welding .....	229
Daniela SPASOVA	
Определяне на едновременното влияние на няколко фактора върху абразивното износване след наваряване	
Даниела СПАСОВА	
Experimental Determination of the Static Characteristic of the Arc .....	238
Deyan GRADINAROV, Yuri BIJEV	
Експериментално определяне на статични характеристики на дъгата	
Деян ГРАДИНАРОВ, Юри БИЖЕВ	
The Equilibrium between Rouging and Derouging: A New Method for “Green” Derouging and Rust Removal for Industrial Applications.....	245
Nikolay T. TZVETKOV, Tsvetomir R. BORISOV	

Investigating the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Aluminium Alloys after Gaz Nitro-Carburizing .....	249
Siyana ZABUNOVA, Plamen PETROV, Desislava MINCHEVA	
Изследване на микроструктурата и механичните свойства на алуминиеви сплави след газово карбонитриране	
Сияна ЗАБУНОВА, Пламен ПЕТРОВ, Десислава МИНЧЕВА	
Effect of Gas Nitrocarburising on the Structure and Properties of Welded Joints of Corrosion-Resistant Steel .....	256
Plamen PETROV, Rusalena NICOLOVA, Daniela SPASOVA	
Влияние на следващо газово карбонитриране върху структурата и свойствата на заварени съединения от корозионноустойчиви стомани	
Пламен ПЕТРОВ, Русалена НИКОЛОВА, Даниела СПАСОВА	



## Measuring the Thickness of Thin Layers and Determining the Characteristics of Electronic Components

Mihaela ALEKSANDROVA, Bojidar JIVOV, Lyuben LAKOV

Institute of Metal Science, Equipment and Technologies  
with Hydro- and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”,  
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
Email: [mihaela.krasimirova@mail.bg](mailto:mihaela.krasimirova@mail.bg)

### Abstract

In recent years, interest in the use and applications of supercapacitors for electric vehicles has increased significantly. The advantage of capacitor ceramics over other dielectric materials for the production of super capacitors is its environmental and high economic efficiency. The present study presents the results of a study of condensation ceramics from titanium phases, synthesized by the low-temperature sol-gel method with subsequent calcination up to 800°C. Layer thicknesses were determined, a schematic of a supercapacitor module, and a block diagram for the building blocks of an electric car.

**Keywords:** thin films, supercapacitors, sol-gel, electronic components

### 1. Introduction

Thickness is one of the main characteristics of thin films and affects their electrical, mechanical, and optical properties. Thin film thickness analysis is a critical part of product development in various industries and applications such as semiconductors, displays, medical devices and electronics.[1]

Thickness can be analyzed by several different methods, such as XRR (X-ray reflectometry), cross-sectional SEM (scanning electron microscopy), cross-sectional TEM (transmission electron microscopy), and ellipsometry. The choice is not always easy. The complexity of method selection comes from the limitations of the methods and their different abilities to answer different research questions about the material. Therefore, there is rarely a single correct answer as to which method is best, but instead depends on what methods are appropriate for the material in question, what additional information beyond film thickness needs to be determined by the analysis, and what the budget is.

Factors that influence which methods are acceptable for the material are film surface roughness, thickness range, film material, and substrate. Therefore, these things should be known at least approximately when choosing the method. [1-3]

For successful measurements, the material thickness must be at least an order of magnitude greater than the film surface roughness.

An important factor related to XRR is that the expected composition and structure of the sample must be known for the analysis to be accurate. Since the method relies on fitting the experimental XRR curve to the corresponding layer model using simulation, the analysis can lead to large errors if the sample composition is unknown.

Scanning electron microscopy is a great method for analyzing the thickness of semiconductor thin films. SEM works on both single-layer and multi-layer materials and can, in addition to thickness, also provide information on the surface morphology and elemental composition of the sample. [4-6]

The method is suitable for conductive and semi-conductive materials with a thickness between 100 nm and 100  $\mu\text{m}$ . Non-conductive materials can be analyzed by the method if the sample is prepared by applying a thin layer of conductive material to the surface.

It is worth noting that results on the elemental composition of the film require a SEM equipped with an EDS detector (Energy Dispersive Spectroscopy). The EDS detector measures the X-rays emitted by the sample when electrons interact with it. As the detector analyzes the X-ray spectrum, it recognizes the spectra of individual elements and compounds, and allows their identification and quantification.

Transmission electron microscopy is another commonly used method for analyzing conducting and semiconducting films. This method also works for both monolayer and multilayer materials in the thickness range from a few nanometers to 100 nm. Appropriate sample thickness can be achieved using a focused ion beam (FIB).

Like a cross-sectional SEM, an EDS detector can also be attached to a TEM to obtain information on the elemental composition of the sample. With TEM, you can also gain valuable insight into the structure of the sample. Therefore, the method offers a lot of information about the material, but the analyzes are also clearly more expensive than the measurements made with SEM. [8-10]

An important risk to be aware of with TEM is that the high voltage beam can burn and damage some materials. For example, for polymeric and organic materials, the suitability of the material should be carefully considered before starting the analysis.

In conclusion, there are several factors that influence the choice of thin film thickness measurement method, and there are no absolute rules about when to choose which one. Film thickness is one clear factor that limits the methods available, but otherwise the choice depends largely on the context of the analysis. [7-11]

## 2. Experimental Part and Discussion

In this publication, a method for determining thicknesses of layers with a profilometer is considered.

Thickness measurement with a profilometer occupies one of the first places among thickness measurement methods, both due to the simplicity of its implementation and due to the accuracy and reproducibility of the results. This method is particularly suitable for the measurement of thin-film elements, since the requirements for the properties of the measured objects are reduced to a minimum.

The essence of the method consists in registering the profile of a given surface by scanning with an indicator needle and converting the vertical displacement of the needle into electrical signals, which are then amplified and fed to a recording device. When examining surface finish quality (e.g. roughness after polishing), the needle should have a very small blade to reproduce the profile accurately, and small weight and pressure to limit penetration into the material as well. When measuring the thickness of a thin layer deposited on a substrate, it is necessary to form a step in advance so that the thickness is determined as the difference in the records when the needle moves on the surface of the substrate and on the surface of the thin layer. A step can be formed either by masking a portion of the substrate during deposition or by removing a portion of the layer through lithography. Suitable off-the-shelf microstructures can also be used.

Many trials and research were done until successful deposition of  $\text{BaTiO}_3$  and  $\text{BaSnO}_3$  was achieved. The layering method is by dipping.

To measure the thicknesses, three samples were prepared on a smooth surface at different time intervals. It was formed by applying a silicon mask during deposition. The mask covered about half the area of each specimen so that the step was formed along the entire length and

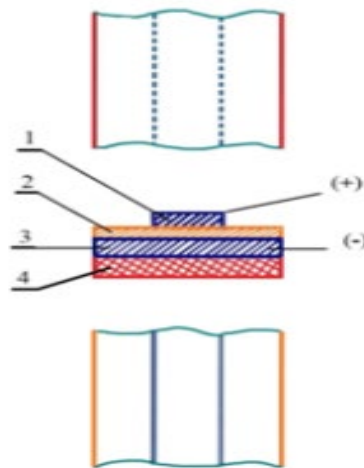
perpendicular to the target plane. This allows the thickness to be measured at several points at different distances from the surface of the target and to assess the non-uniformity in thickness resulting from the mutually perpendicular arrangement of the target and the substrate holder. The results are plotted in tables 1, 2.

**Table1. Measure the thicknesses for the layers obtained from the system 50%BaTiO<sub>3</sub>-50% BaSnO<sub>3</sub> at different time**

Sample (hours)	Thickness (nm)	Average quadratic deviation (nm)
4	1000	120
2	400	60
1	130	25

**Table 2. Measure the thicknesses for the layers obtained from the system 85%BaTiO<sub>3</sub>-15% BaSnO<sub>3</sub> at different time**

Sample (hours)	Thickness (nm)	Average quadratic deviation (nm)
4	1110	120
2	500	60
1	160	25

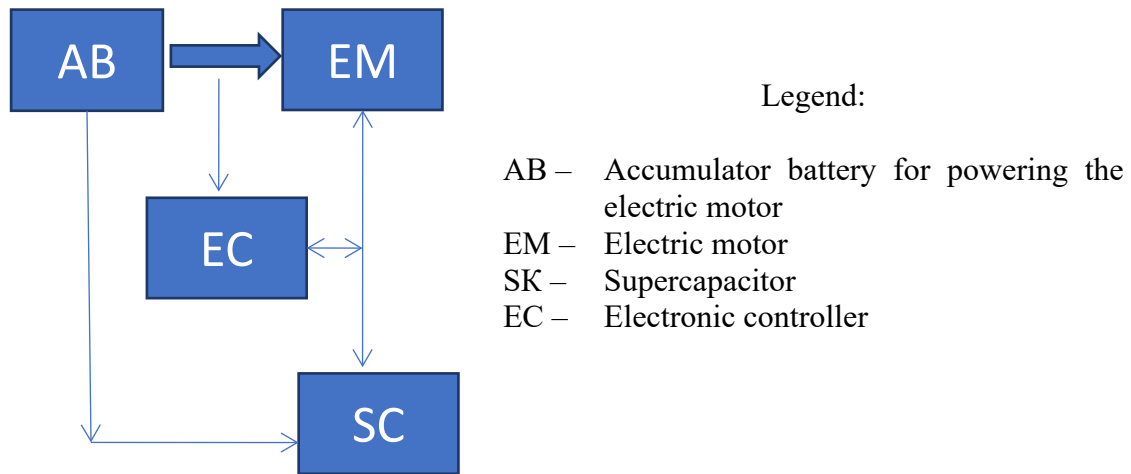


**Fig. 1 View of layers for building a single supercapacitor module**

The description of Figure 1 is set out below as:

- 1) and 3) Electrodes. Al foil strips between 10-12 $\mu$ m thick
- 2) Dielectric. Ceramic coating with high dielectric permittivity
- 4) insulating tape with a thickness of 50-60  $\mu$ m.

A block diagram with the building blocks of an electric car is presented, where the supercapacitor plays an important role.



**Fig.2**Block diagram of the building blocks of an electric car

The relationship between EM and AB and SC are two-way, i.e. one case is when electrical energy is transmitted from AB or SC to ED, and the second case – when a braking process occurs, ED switches to generator mode and returns electrical energy first to SC until it is fully charged and then to AB.

The connection between AB and SC is unidirectional, because the voltage on SC is either equal to the voltage on AB or, most often, it is slightly lower than it by tenths of a volt or a few volts. EC serves to monitor, compare and control the voltage levels of AB, ED and SC. The EC includes several electronic “matching circuits” and level “comparator” circuits, and corresponding executive devices with one-way and two-way electronic switches.

### 3. Conclusion

Thickness measurement with a profilometer occupies one of the first places among thickness measurement methods, both because of the simplicity of its implementation and because of the accuracy and reproducibility of the results. This method is particularly suitable for the measurement of thin-film elements, since the requirements for the properties of the measured objects are reduced to a minimum.

#### Acknowledgements:

The authors are grateful to the financial support of Bulgarian National Science Fund at the Ministry of Education and Science, Contract № KII-06-H 36/26.

#### References

1. B. Mi, O. Coronell, B.J. Mariñas, F. Watanabe, D.G. Cahill, I. Petrov, Physico-chemical characterization of NF/RO membrane active layers by Rutherford backscattering spectrometry, *J. Memb. Sci.* 282 (2006) 71–81. doi:10.1016/j.memsci.2006.05.015.
2. V. Freger, J. Gilron, S. Belfer, TFC polyamide membranes modified by grafting of hydrophilic polymers: an FT-IR/AFM/TEM study, *J. Memb. Sci.* 209 (2002) 283–292. doi:10.1016/S0376-7388(02)00356-3.

3. V. Freger, Nanoscale Heterogeneity of Polyamide Membranes Formed by Interfacial Polymerization, *Langmuir*. 19 (2003) 4791–4797.
4. A.K. Ghosh, B.-H. Jeong, X. Huang, E.M.V. Hoek, Impacts of reaction and curing conditions on polyamide composite reverse osmosis membrane properties, *J. Memb. Sci.* 311 (2008) 34–45. doi:10.1016/j.memsci.2007.11.038.
5. V. Freger, Swelling and morphology of the skin layer of polyamide composite membranes: an atomic force microscopy study, *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004) 3168– 3175.
6. E. Dražević, K. Košutić, V. Freger, Permeability and selectivity of reverse osmosis membranes: Correlation to swelling revisited, *Water Res.* 49 (2014) 444–452. doi:10.1016/j.watres.2013.10.029.
7. S.R. Kane, P.D. Ashby, L.A. Pruitt, ATR-FTIR as a Thickness Measurement Technique for Hydrated Polymer-on-Polymer Coatings, *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* 91 (2009) 613–620. doi:10.1002/jbm.b.31436. 44
8. P.S. Singh, S. V Joshi, J.J. Trivedi, C. V Devmurari, A.P. Rao, P.K. Ghosh, Probing the structural variations of thin film composite RO membranes obtained by coating polyamide over polysulfone membranes of different pore dimensions, *J. Memb. Sci.* 278 (2006) 19– 25. doi:10.1016/j.memsci.2005.10.039.
9. A.P. Rao, S. V. Joshi, J.J. Trivedi, C. V. Devmurari, V.J. Shah, Structure-performance correlation of polyamide thin-film composite membranes: effect of coating conditions on film formation, *J. Memb. Sci.* 211 (2003) 13–24.
10. M.F. Toney, C.M. Mate, K.A. Leach, D. Pocker, Thickness Measurements of Thin Perfluoropolyether Polymer Films on Silicon and Amorphous-Hydrogenated Carbon with X-Ray Reflectivity, ESCA and Optical Ellipsometry, *J. Colloid Interface Sci.* 225 (2000) 219–226. doi:10.1006/jcis.2000.6752.
11. F.L. McCrackin, E. Passaglia, R.R. Stromberg, H.L. Steinberg, Measurement of the Thickness and Refractive Index of Very Thin Films and the Optical Properties of Surfaces by Ellipsometry, *J. Res. Nat. Bur. Sect. A* 67 (1963) 363–377.



## Dynamic Relaxation Spectra in Beryllium Bronze

Stoyan PARSHOROV<sup>1</sup>, Stefan VALKOV<sup>2</sup>, Maria ORMANOVA<sup>2</sup>,  
Stojko GUROV<sup>1</sup>, Ivan PARSHOROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [st.parshorov@gmail.com](mailto:st.parshorov@gmail.com)

### Abstract:

The paper considers investigation by means of the internal friction method of the dynamic relaxation spectra of beryllium bronze. Operation diagrams of the damping ability and oscillation absorption coefficient are built for massive specimens in vibration range of frequencies above 2,5Hz, relative deformation  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-6}$  in temperature range 20-600°C. It was found that the area of the beginning of the “high” damping, related to the high temperature part of the background of internal friction for beryllium bronze is about 200°C. In the beryllium bronze a resonance relaxation maximum is observed about 380°C. There are also energy dynamic losses of a hysteresis nature, typical for the amplitude-dependent area. The largest hysteresis energy losses are found in the region of the high-temperature background of internal friction.

**Keywords:** high damping alloys, internal friction, dynamic relaxation spectra, oscillation absorption coefficient, damping ability

## 1. Introduction

The beryllium bronze [1-3] find more application as alloys of high damping properties. The purpose of the present efforts is to study the damping abilities of beryllium bronze, manufactured by standard technology and after standard high temperature treatment,

## 2. Material and method

Object of investigation is beryllium bronze EN CuCoNiBe with certified chemical composition given in Table 1.

**Table 1. Chemical composition of the investigated alloy (in weight %)**

Designation according EN	Be	Ni	Co	Cu
CuCoNiBe	0,59	1,14	1,05	rest

Specimens for internal friction experiments with the following size- 0,5 x 0,5 x 50 mm are made using electro-eroding machine. After enclosing in vacuum glass tubes they are subjected to standard heat treatment regimens of quenching and ageing. The parameters of the regimes are as follows: quenching temperature – 940°C, holding time – 10 min., quenching media – water, ageing temperature – 480°C and holding time – 120 min.

It is well known that the internal friction value at certain frequency, relative deformation and temperature is directly proportional to the damping properties of the alloys at these conditions [1].

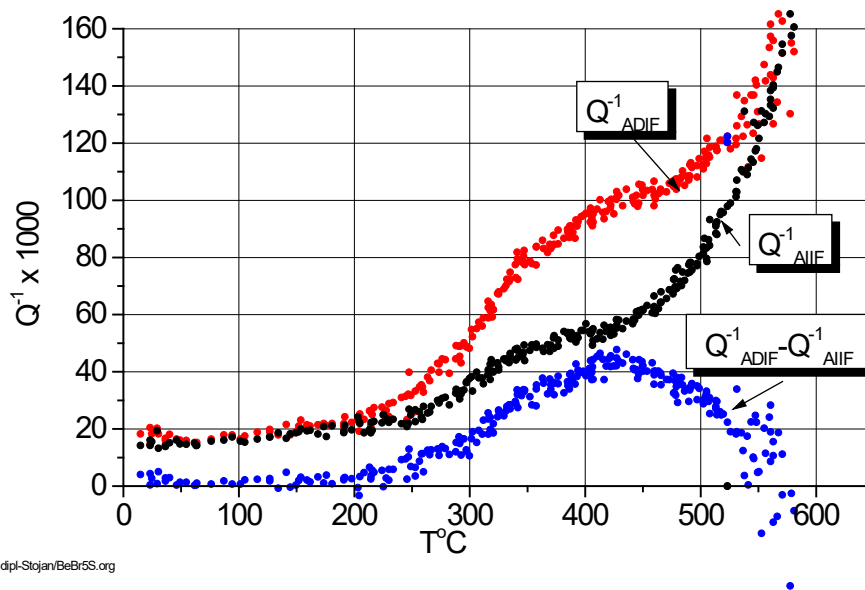
To define the damping abilities of both alloys the temperature dependencies of the dynamic relaxation spectra are recorded. Fully computerized apparatus is used for investigation, built on the principle of reverse balanced pendulum at operational frequency of 0, 5-7 Hz. The relaxation spectra of the specimens are recorded in the temperature range of 20-600°C, at heating rate of 3°/min. At each studied temperature the internal friction values are recorded for ten amplitudes per relative operational from  $2 \cdot 10^{-2}$  to  $1 \cdot 10^{-6}$ .

### 3. Experimental results and discussion

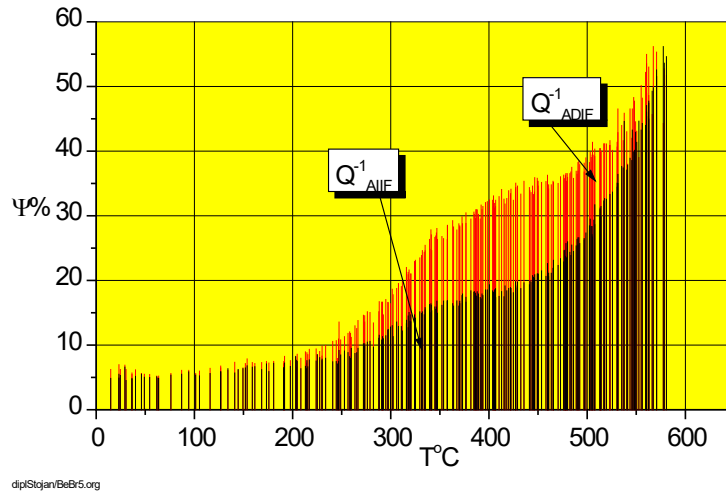
**Fig.1** presents the dynamic relaxation spectra of the specimens. The dependencies shown refer to the maximum degree of relative deformation in the amplitude dependent area of the internal friction ADIF (amplitude dependent internal friction) –  $2 \cdot 10^{-2}$  and the minimum in the amplitude independent area of internal friction AIIF (amplitude independent internal friction) –  $1 \cdot 10^{-6}$ .

According to the published literature, the absorption coefficient  $\Psi$  (also known as specific damping capability or loss spectrum) is proportional to the value of internal friction [1] –  $\Psi\% = k \cdot Q^{-1} \cdot 100$ , where  $k=2 \cdot \pi$  – for low values of internal friction,  $k=1.08 \cdot \pi$  – in cases of high damping, as it is in the alloys studied by us.

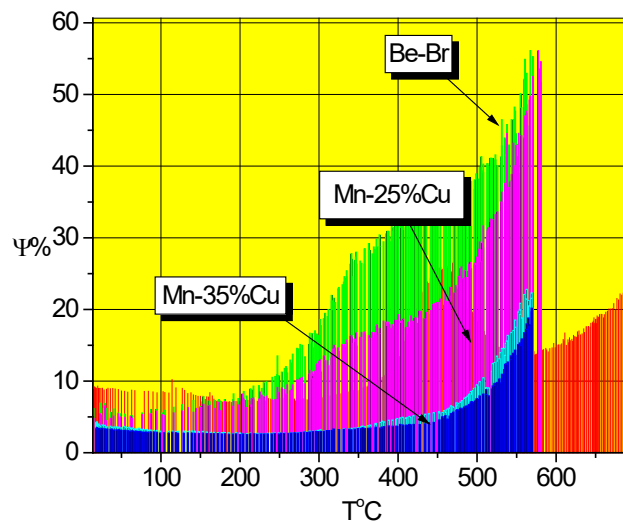
**Fig.2** shows the calculated values of the temperature dependencies of the absorption coefficients  $\Psi$  for the investigated alloys. The shaded areas demonstrate the entire spectrum of energy losses from oscillations in the material.



**Fig.1. Dynamic relaxation spectra of internal friction**



**Fig.2. Temperature dependence of the absorption coefficient**



**Fig.3. Comparison of the temperature dependences of the absorption coefficients of the beryllium bronze and two Mn-Cu alloys [4]**

The obtained relaxation spectra and absorption coefficient are characterized by the following features:

- They are typical of metals and alloys – a low- and high-temperature background of the internal friction and resonant relaxation maximum, which is superimposed on the background (Fig.1-2) [5].
- From the values of absorption coefficients of the investigated alloy, it was established that the beryllium bronze has maximum damping property compared to the two manganese alloys (Fig. 3).
- The area of the beginning of the “high” damping, related to the high temperature part of the background of internal friction for beryllium bronze is about 200°C.

- For all studied alloys the values of the high-temperature background of internal friction, which are proportional to the dissipated energy caused by the non-conservative movement of dislocations, increase sharply.
- In the beryllium bronze a resonance relaxation maxima is observed about 380°C.
- In the beryllium bronze there are also energy dynamic losses of a hysteresis nature, typical for the amplitude-dependent area of internal friction (**Fig. 1-2**). It was found that they depend on the temperature and the strain amplitude, but do not depend on the measurement frequency.
- The largest hysteresis energy losses are found in the beryllium bronze in the region of the high-temperature background of internal friction (**Fig.1-2**).
- The most thermally unstable is the dislocation structure of beryllium bronze, where significant damping values are observed even at temperatures of the order of 150-200°C (**Fig.1-2**).

**Acknowledgement:** The authors are grateful to the financial support of Bulgarian National Science Fund at the Ministry of Education and Science, Contract No KP 06H67/7 /12.12.2022/. All equipment and experimental units used in this work was funded 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.

#### 4. References

1. Favstov U., U. Shulga, A. Rahstadt, Metalovedenie visokodempferirashaih splavov, M, Metalurgia, 1988.
2. Riehemann W., Metallische Werkstoffe mit extremer innerer Reibung und deren Messung, Habilitationsschrift, Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 1996, ISBN3-931443-73-6.
3. Saha B., V. Nimbalkar, D. B. Anant Sagar, M. Sai Krishna Rao, V. P., Deshmukh, Aerospace Materials and Material Technologies, Chapter, Bronzes for Aerospace Applications, 2021, pp 247–266.
4. Parshorov, S. Valkov, M. Ormanova, S. Gurov, I. Parshorov, Dynamic Relaxation Spectra in High Damping Mn-Cu Alloys, Bulgarian Society for NDT, International Journal “NDT Days”, 2023, v.VI, ISSN: 2603-4646, in the same volume.
5. Nowick A.S., B.S. Berry, Anelastic Relaxation in Crystalline Solids, Academic press New York and London, 1972.



## Using the RedPitaya Platform in Automated Eddy Current Testing

Oleksandr LEVCHENKO<sup>1</sup>, Alexander ALEXIEV<sup>2</sup>, Yurii KUTS<sup>1</sup>, Iuliia LYSENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine  
e-mail: [j.lysenko@kpi.ua](mailto:j.lysenko@kpi.ua)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [AL68@abv.bg](mailto:AL68@abv.bg)

### Abstract

This study highlights the use of the RedPitaya platform for developing prototypes of automated eddy current testing systems. The platform's flexibility, robustness, and affordability make it an ideal tool for such development. The versatility of RedPitaya allows for the integration of various programming environments like MATLAB, Python, and LabVIEW, efficient data processing, feature extraction, and decision-making algorithms. However, the lack of input commutators limits the use of matrix probes. The study suggests RedPitaya-based eddy current systems can serve dual roles, performing specific inspection tasks and facilitating research into new data processing methods and algorithms. Despite some limitations, RedPitaya offers promising opportunities for the evolution of eddy current testing systems.

**Keywords:** automated eddy current testing, RedPitaya, system prototyping

## 1. Introduction

Modern trends in the development of automated eddy current testing (ECT) require the use of new technologies and signal processing methodologies to improve its efficiency. One of the key trends is the improvement of eddy current probes and devices. For example, the use of matrix sensors makes it possible to measure eddy current fields over large areas of the inspected objects, increasing the probability of detecting defects [1-8]. Periodically, researchers return to the use of pulsed eddy current inspection technology, explore its new capabilities, and use it in automated eddy current NDT systems [9-10].

The use of pattern recognition, machine learning, and artificial intelligence methods in ECT is becoming increasingly common. These methods make it possible to automate the analysis of eddy current testing data and the process of making diagnostic decisions [11].

Developers of ECT tools pay special attention to feature extraction and feature selection technologies. They allow identifying the key information characteristics of eddy current signals, which facilitates defect recognition. Machine learning algorithms can detect complex patterns in the data that correspond to certain defects and that may be missed in traditional analysis [12-15].

The development of automated ECT has its challenges. One of the most important of these is the development of reliable and flexible software that can effectively solve a set of tasks of data processing, information feature extraction, and real-time diagnostic decision-making. The development of such software requires a deep understanding of the physical principles of ECT, knowledge of information and measurement technologies, digital signal processing and modelling methods, and machine learning algorithms.

These challenges have a direct impact on the design, development, and use of eddy current NDT systems. To increase efficiency, systems must be able to process large amounts of data and provide high processing speeds. In addition, to support the automation of the production process, systems must be able to perform measurement and control operations without direct human intervention and integrate with other systems.

Implementing this ideology of ECT systems requires the use of powerful hardware and software. The RedPitaya platform has significant potential for solving automated ECT tasks. Its unique capabilities are due to the successful combination of powerful computing resources and software flexibility. Below are several examples of RedPitaya platform use in various fields of research and technology that illustrate its wide range of capabilities.

Paper [16] describes the development and implementation of a blocking amplifier on the open source RedPitaya platform. The development process was carried out in the Xilinx Vivado environment using the VHDL programming language. The use of embedded blocks based on the principle of smart blocks in accordance with the Xilinx paradigm allowed us to create a modular system. Such an amplifier makes it possible to distinguish information signals against the background of significant noise.

Article [18] describes the process of developing the open source software package PyRPL. This package is designed to perform experiments in quantum optics. The user interface and all high-level programs are developed in Python. Part of the PyRPL software implements various digital signal processing modules, which confirms the flexibility and wide range of capabilities of the RedPitaya platform.

Article [19] demonstrates the development of software for a capacitive biosensor. The software was created in the LabView environment, which allowed developers to easily integrate RedPitaya and other components into a single system. This environment allowed the use of a high level of abstraction, which simplifies the programming and testing process. The software created as part of this work allows for the measurement of bioimpedance parameters. The measurement results are processed to detect specific DNA sequences, confirming RedPitaya's ability to perform complex tasks in the field of biomedical engineering.

In the context of Industrial Revolution 4.0, automated eddy current NDT systems have great potential for further development. Possible directions include increasing the level of automation, using the latest data processing technologies, and integrating with cloud services for remote monitoring and inspection. [20-21]

The purpose of the report is to analyse the possibility of the RedPitaya platform for use in automated ECT systems.

## **2. Overview of the RedPitaya platform**

The RedPitaya is a powerful computing platform and an excellent choice for automated eddy current NDT systems. However, there are other platforms such as LabJack, BeagleBone, Raspberry Pi and others that can also be used in this context. So what are the advantages of RedPitaya over other platforms? To answer this question, we have performed a comparative analysis of RedPitaya with other similar platforms. Their main characteristics are shown in Table 1.

All of these platforms differ in key features and capabilities, including computing power, number of input/output ports, connectivity, signal processing quality, vendor support, and user community activity. RedPitaya has a significant advantage in real-time signal processing and FPGA support. However, other platforms may have advantages in other areas.

In regards to cost, the RedPitaya may be more expensive than a Raspberry Pi, but cheaper than some LabJack models. However, given potential expansion or maintenance costs, the total cost can vary significantly.

Analog Devices ADALM-PLUTO (PlutoSDR). This platform is designed to build a digital radio (SDR) containing high-quality ADCs and DACs. PlutoSDR is especially useful for working with radio signals.

**Table 1. Main technical characteristics of a number of platforms for the implementation of measurement and control tools**

Platform	Processing performance	ADC	DAC	Communication interfaces	Memory
RedPitaya 125-14	Xilinx Zynq-7010 (ARM Cortex-A9)	2x 14-bit, 125 MSPS, $\pm 1V$	2x 14-bit, до 125 MSPS, $\pm 1V$	Ethernet, USB, HDMI, GPIO	512MB DDR3 256MB
LabJack T7-Pro	1 GHz ARM Cortex-A9	24-bit, 50 kSPS, $\pm 10V$	14-bit, до 128 kSPS, $\pm 10V$	Ethernet, USB, Modbus TCP, SPI, I2C, GPIO	16MB RAM 4MB
Analog Devices ADALM-PLUTO	ARM Cortex-A9 (Zynq-7010)	12-bit, 61.44 MSPS, $\pm 1V$	12-bit, 61.44 MSPS, $\pm 1V$	USB, Ethernet, GPIO	512MB RAM 4GB
Texas Instruments Delfino F28377S LaunchPad	TMS320F28377S (ARM Cortex-M3)	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	USB, JTAG, SCI, SPI, I2C, GPIO	1MB RAM 2MB
Microchip PIC32MZ EF Development Board	PIC32MZ2048EF (MIPS M14K)	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	12-bit, 1 MSPS, $\pm 3.3V$	USB, Ethernet, CAN, SPI, I2C, GPIO	512KB RAM 2MB
Raspberry Pi 4 Model B 8GB + ADC-DAC Pi Zero	Broadcom BCM2711 (ARM Cortex-A72)	12-bit, 100 kSPS, $\pm 2.048V$	12-bit, 100 kSPS, 0-2.048V	USB, Ethernet, HDMI, GPIO	8GB LPDDR4-3200 MicroSD Card

Texas Instruments Delfino F28377S LaunchPad. This microcontroller platform has built-in ADCs and DACs and is used in a wide range of systems, including automated NDT systems.

Microchip PIC32MZ EF Development Board. This board contains a 12-bit ADC and can be used to develop NDT systems.

Raspberry Pi. Although the standard Raspberry Pi board does not have built-in ADCs or DACs, it can be easily extended with additional modules (e.g. HATs or Hardware Attached on Top) that have these functions.

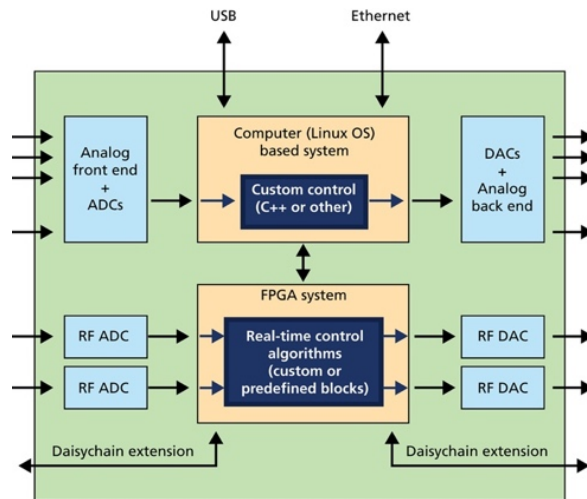
The RedPitaya is therefore a high-performance platform that is ideally suited to the requirements of automated eddy current NDT systems. In addition, this platform supports various programming environments (Matlab, C/C++, SciLab, Labview, Python), which allows scientists and engineers to choose the most convenient tool for their projects.

The developer has already created a number of measurement tools that are part of the standard Red Pitaya package, including an oscilloscope, signal generator, spectrum analyser, LRC meter, logic analyser, and Bode analyzer [21].

The core of Red Pitaya's architecture is the Xilinx Zynq-7010 chip, which is a system-on-chip (SoC). It consists of two complementary subsystems: a processor subsystem responsible for data processing and a programmable logic subsystem that provides high flexibility in configuring the chip's functionality (Fig. 1). This architecture makes it possible to effectively perform various tasks using a combination of these two subsystems.

The central advantage of RedPitaya is the possibility of flexible configuration and programming, which allows scientists to adapt the platform to specific research requirements.

These advantages make RedPitaya an attractive platform for developing flexible software systems for automated ECT systems, implementing complex information processing algorithms, including feature extraction, decision making, and data mining.



**Fig. 1. The Xilinx Zynq7010 chip in Red Pitaya**

Below are more complete technical specifications of the RedPitaya board.

- FPGA: The Red Pitaya features a Xilinx Zynq-7010 FPGA (programmable logic integrated circuit) that can be used for digital signal processing, real-time monitoring, and other applications.
- ADC and DAC: The Red Pitaya has two 14-bit analogue-to-digital converters and two 14-bit digital-to-analogue converters, enabling high-resolution sampling and signal generation.
- Peripherals: Red Pitaya has multiple communication options including Ethernet, USB, and Wi-Fi. This makes it easy to integrate the platform into existing information and telecommunication networks and systems.
- Software support: Red Pitaya supports multiple programming environments, including MATLAB, Python, C/C++, and LabVIEW. This allows you to easily develop and implement your own applications.
- Size and power: Red Pitaya has a compact size of 11 cm x 7 cm, which makes it easy to integrate into a variety of devices and systems. The platform is also very powerful, with a quad-core ARM Cortex-A9 processor clocked at 667 MHz and 512 MB of RAM.
- Open source: Red Pitaya is an open source platform. This means that its hardware and software are freely available and allows you to customise and modify the platform to meet your specific needs.

The Red Pitaya OS operating system is pre-installed on an external MicroSD card, so no programming tool is required to configure the software codes. The boards can be programmed via an Ethernet port thanks to the interface in the Zynq-7000 chip. This solution allows you to connect to the platform immediately without installing additional drivers. The boards allow you to use most of the chip pins in external circuits.

- FPGA: Red Pitaya has a Xilinx Zynq-7010 FPGA (programmable logic integrated circuit) that can be used for digital signal processing, real-time control and other applications.
- ADC and DAC: The Red Pitaya has two 14-bit analogue-to-digital converters and two 14-bit digital-to-analogue converters, enabling high-resolution sampling and signal generation.
- Peripherals: Red Pitaya has multiple communication options including Ethernet, USB, and Wi-Fi. This makes it easy to integrate the platform into existing information and telecommunication networks and systems.

- Software support: Red Pitaya supports multiple programming environments, including MATLAB, Python, C/C++, and LabVIEW. This allows you to easily develop and implement your own applications.
- Size and power: Red Pitaya has a compact size of 11 cm x 7 cm, which makes it easy to integrate into a variety of devices and systems. The platform is also very powerful, with a quad-core ARM Cortex-A9 processor clocked at 667 MHz and 512 MB of RAM.
- Open source: Red Pitaya is an open-source platform. This means that its hardware and software are freely available and allows you to customise and modify the platform to meet your specific needs.

The Red Pitaya OS operating system is pre-installed on an external MicroSD card, so no programming tool is required to configure the software codes. The boards can be programmed via an Ethernet port thanks to the interface in the Zynq-7000 chip. This solution allows you to connect to the platform immediately without installing additional drivers. The boards allow the use of most of the chip pins in external circuits.

### 2.1 Software flexibility

In the context of a software development system, “flexibility” often means the ability of the system to adapt to changing requirements and conditions of use without the need for significant modifications to the code. In this sense, RedPitaya proves to be an extremely useful platform. It enables the development of flexible software that can be tailored to the specific requirements of NDT eddy current testing. With a wide range of built-in tools and support for various programming languages, RedPitaya allows developers to respond quickly and efficiently to new challenges and needs in automated NDT.

### 2.2 Feature extraction

Feature Extraction is a critical step in signal processing and ECT data analysis. This process involves identifying and extracting useful information from ECT signals for further analysis and decision-making. The concept of building such an automated ECT system is shown in Fig. 2.

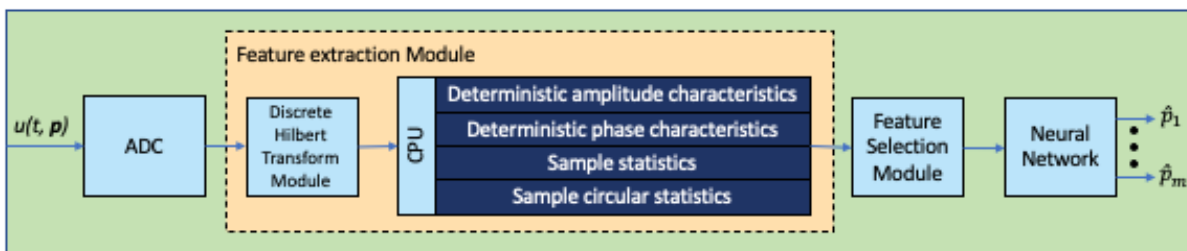


Fig. 2. The concept of ECT system

During the scanning of the controlled object by the eddy current sensor, a signal is obtained  $u(t, p)$ ,  $t \in T_a$ , where  $t$  – time,  $T_a$  – signal analysis time,  $p = (p_1 \dots p_n)$  – vector of parameters of the controlled object. The list of these parameters and the range of their possible changes are determined by specific inspection tasks. This signal is sent to the ADC. The Discrete Hilbert Transform Module extracts the envelope and phase of the signal, which depend on both time and the vector. The elements of the vector have different effects on the envelope and phase of the signal. In order to increase the measurement information, different modes of

operation of the eddy current sensor can be used, as well as various secondary deterministic and statistical parameters of the signal obtained from its amplitude and phase [22]. Feature Selection takes out some of the most informative features necessary to obtain a vector of estimates  $(\hat{p}_1 \dots \hat{p}_n)$ ,  $m \leq n$  of the parameters of the monitored objects. The vector  $(\hat{p}_1 \dots \hat{p}_n)$ ,  $m \leq n$  obtained at the output of the Neural Network, which has previously passed the stage of training on a series of test samples.

The RedPitaya platform can perform a crucial role in the feature extraction process in ECT. Thanks to its flexible programming capabilities and a wide range of signal processing tools, RedPitaya can be configured to perform complex feature extraction tasks. This process can include the use of digital signal processing, statistical signal characterisation, spectral analysis, signal filtering, machine learning algorithms and other methods to identify useful features in ECT data.

Thus, the use of the RedPitaya platform opens up wide opportunities for the implementation of innovative functions in automatic eddy current inspection, namely:

- high-speed signal acquisition and analysis, processing of large amounts of data and recognition of complex patterns;
- application of artificial intelligence; the use of machine learning algorithms makes it possible to create automatic recognition, classification and forecasting systems based on eddy current inspection data;
- integration with cloud platforms, which opens up new opportunities for storing, processing and analysing data in the cloud environment; this will make it possible to create distributed systems and provide access to data and analysis results from different locations; expanding the capabilities and functionality of existing ECT tools by incorporating the RedPitaya platform into them.

### 3. Conclusion

Automated eddy current non-destructive testing systems have an important role in industry, including aviation, nuclear industry, automotive and many other industries. Increasing the reliability of testing, its implementation in real time, and automating the process of making diagnostic decisions require the use of more sophisticated testing technologies and algorithms for processing experimental data.

The RedPitaya platform has wide functionality, reliability, and accessibility, which makes it a convenient tool for implementing projects to create automated ECT systems.

An automated ECT system based on RedPitaya can perform not only specific control tasks, but also be a convenient tool for researching new methods and algorithms for processing information in ECT, performing their comparative analysis, and quickly and efficiently debugging their software implementations.

A certain limitation for use in ECT is the absence of input commutators, which makes it impossible to use matrix sensors.

### References

1. Ali K. B., A. N. Abdalla, D. Rifai and M. A. Faraj, "Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization", in *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 338-351, March 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2016.0327>
2. Sophian A., G. Tian and M. Fan, "Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review", in *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 500-514, April 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>

3. Jun J., Choi M., Lee J., “Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel Using CICMFL and LIHaS”, in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 3959-3962, 2011.
4. Jun J., Choi M., Lee J., Seo J., Shin K., “Nondestructive testing of express train wheel using the linearly integrated Hall sensors array on a curved surface”, in *NDT & E International*, vol. 44, pp. 449-455, 2011.
5. Lee J., Choi M., Jun J., Kwon S., Kim J.H., Kim J., Le M., “Nondestructive Testing of Train Wheels Using Vertical Magnetization and Differential-Type Hall-Sensor Array”, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 9, pp. 2346-2353, 2012.
6. Jun J., Park Y., Lee J., “Real Time Visualization Of Alternating Magnetic Fields Using 2-Dimensional Integrated Hall Sensor Array”, in *Journal of Electrical Engineering*, vol. 61, no. 7, pp. 32-35, 2010.
7. Lee J., Jun J., Kim J., Choi H., Le M., “Bobbin-type solid-state hall sensor array with high spatial resolution for cracks inspection in small-bore piping systems”, in *IEEE transactions on magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3704-3707, 2012.
8. Lysenko I., Y. Kuts, V. Uchanin, Y. Mirchev, and A. Alexiev, “Problems of using eddy current arrays NDT”, in *Advanced, Contemporary Control*, M. Pawelczyk, D. Bismor, S. Ogonowski, J. Kacprzyk, Eds., PCC 2023. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 708, Springer, Cham, pp. 287–293. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35170-9_27)
9. Iliopoulos S. N. and W. Van Eesbeeck, “Towards corrosion assessment in steel cylinder concrete pipes using the Pulsed Eddy Current Technique”, presented at the NDE NucCon 2023 – International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications, Espoo, Finland, January 25-27, 2023.
10. Kuts Y., S. Maievskiy, A. Protasov, I. Lysenko, and O. Dugin, “Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing”.
11. Osman Y., Duan and V. Kaftandjian, “Applied Artificial Intelligence in NDE”, in *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 443–476. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6_49)
12. Tao Y. et al., “Automatic feature extraction method for crack detection in eddy current testing”, 2019 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC), Auckland, New Zealand, May 20-23, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2019.8827027>
13. Sophian A., G. Y. Tian, D. Taylor and J. Rudlin, “A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT”, in *NDT & E Int.*, vol. 36, no. 1, pp. 37–41, Jan. 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(02\)00069-5](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(02)00069-5)
14. Zhu P. et al., “An improved feature extraction algorithm for automatic defect identification based on eddy current pulsed thermography”, in *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 113, pp. 5–21, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.02.045>
15. Nazarchuk Z. T., V. M. Uchanin and Y. P. Kulynych, “Eddy current technique parameters optimization for evaluation of specific conductivity changes initiated by aluminum alloys degradation”, in *Information Extraction and Processing*, no. 47, pp. 5–11, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005>
16. Arnaldi L. H., “Implementation of an AXI-compliant lock-in amplifier on the redpitaya open source instrument”, 2017 Eighth Argentine Symposium on Embedded Systems (CASE), Buenos Aires, Argentina, Aug. 9-11, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/sase-case.2017.8115374>
17. Neuhaus L. et al., “PyRPL (Python Red Pitaya Lockbox) — An open-source software package for FPGA-controlled quantum optics experiments”, 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany, June 25-29, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/cleo-eqec.2017.8087380>
18. Bourjilat, D. Kourtiche, F. Sarry, and M. Nadi, “Interdigitated electrode biosensor for DNA sequences detection”, 2015 27th International Conference on Microelectronics (ICM), Casablanca, Morocco, Dec. 20-23, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/icm.2015.7438021>

19. Chakraborty D. and M. E. McGovern, “NDE 4.0: Smart NDE”, 2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), San Francisco, CA, USA, 2019, pp. 1-8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2019.8819429>
20. Sardellitti A., F. Milano, M. Laracca, S. Ventre, L. Ferrigno, and A. Tamburrino, “An Eddy Current Testing method for measuring the thickness of metallic plates”, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tim.2023.3269781>
21. RedPitaya, “RedPitaya Open Source Instrument”. [Online]. Available: <http://www.redpitaya.com/>
22. Mei Z., O. Kochan, Y. Kuts, I. Lysenko, O. Levchenko, and H. Vlach-Vyhrynovska, “Using signal phase in computerized systems of non-destructive testing”, in Measurement science review, vol. 22, no. 1, pp. 32-43, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/msr-2022-0004>



## System for Complex Non-Destructive Testing of Mechanical Engineering Materials

Yordan MIRCHEV<sup>1</sup>, Boris VELEV<sup>1</sup>, Vladimir KAMENOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mechanics – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [mirchev@imbm.bas.bg](mailto:mirchev@imbm.bas.bg)

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical University-Sofia, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [vladokamenov@gmail.com](mailto:vladokamenov@gmail.com)

### Abstract

New modular devices for non-destructive control of the composition and physico-mechanical characteristics of engineering materials used in laboratory and production conditions are presented. These devices can be used independently or as part of an automated system for complex non-destructive testing. Transducers are presented for precise measurement of ultrasound parameters, magneto-noise and magneto-acoustic characteristics of Barkhausen magnetic noise in non-destructive determination of physico-mechanical properties of materials. The research was done to test the applicability of the presented devices for complex non-destructive testing of the mechanical properties of structural steel samples and gray iron castings.

**Keywords:** complex non-destructive testing, non-destructive information parameters

### Introduction

Modern industry requires research, development and implementation of devices and automated systems for non-destructive quality control and diagnostics of the physical-mechanical properties and structure of materials and equipment used in practice. The complex research and assessment of the properties of materials and products, carried out through the simultaneous use of several non-destructive methods, combines and complements each other's capabilities for rapid evaluation of the physico-mechanical characteristics and structure of controllable materials [4,6,7,8,9].

### 2. Purpose of work

The aim of the present work is to test a system for complex non-destructive testing of materials. Two new devices are presented – a modular device for complex magnetonoise and magneto-acoustic control “MULTITEST-MC 10” and a modular device “MULTITEST-CD 10” for complex measurement of speed and attenuation of ultrasound in the controlled material. They can work as stand-alone devices for non-destructive control of engineering materials, as well as engage in synchronous operation for multi-parameter control [8,9]. Tested devices are also presented – testing pliers DK100.

### 3. Means, methods and materials for research

The automated system “MULTITEST” consists of 2 parts – Personal computer for automated processing, visualization and evaluation of data from the control, as well as management of the characteristics; Modular devices and devices (testing tongs, robots, manipulators) for measuring the non-destructive information parameters and for gripping, moving and classifying the measured samples, products and materials. The modular devices have an autonomous power

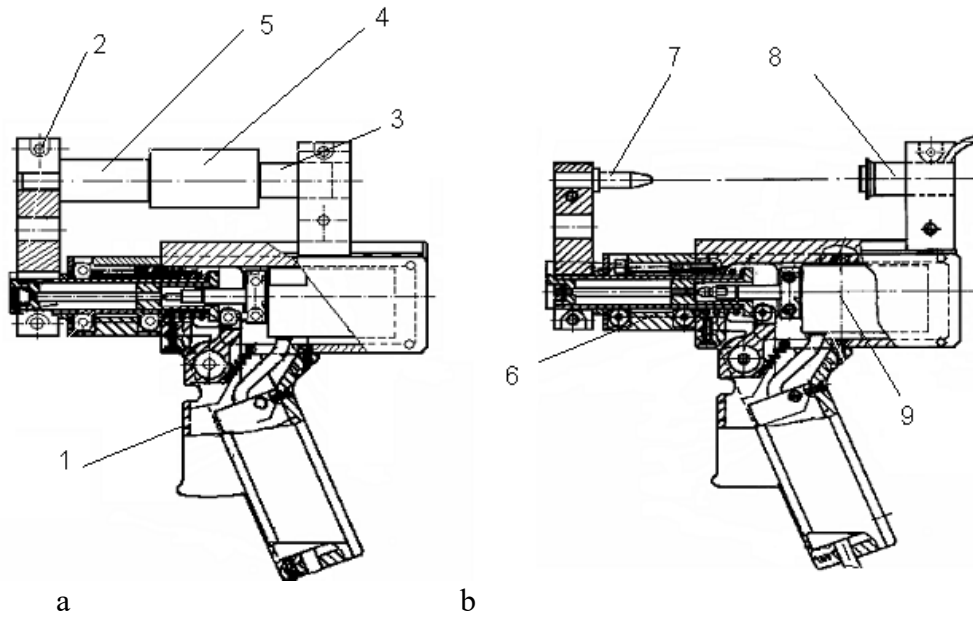
supply and can work independently or in a single automated system depending on the tasks set [2,3]. For the development of the “MULTITEST-MC 10” module methods based on the Barkhausen effect, Magnetic noise method, and the magnetoacoustic emission method were used [10]. The measured information parameters are the magnetic noise voltage  $E_{NB}$ , the magnetoacoustic pressure  $E_{MAE}$  and their dependences on the frequency  $f_B$  of the magnetic noise and on the magnetizing current  $I_B$ . The principal diagram and the method of operation of the device “MULTITEST – MS 10” are presented in more detail in [6,7,8]. For the “MULTITEST – CD 10” module, methods based on the attenuation effect and change in the speed  $Cl$  of propagation of bulk ultrasonic waves in solid materials were used with method of operation described in [3]. The appearance of the modular devices is presented in Fig.1. Two non-consumer programs have been developed for work in an automated system for the devices described above:

- Program mc04.m. It is intended for research work with MatLab. The device is connected via a serial port, and the data is saved in binary format in mat-files. It is started from the MatLab command line. at which the main panel appears with function buttons, through which the necessary actions are performed. If necessary, additional dialog windows and menus appear, and both graphical windows and the command window are used to enter information.
- Program for working with LabVIEW graphics software. It has been developed to allow online visualization and evaluation of results. This expands the capabilities of the system to measure and evaluate not only individual data, but also ongoing processes online through a graphical GUI interface [5].

Fig.2 represents a schematic diagram of the testing pliers for complex non-destructive control with two informative parameters. The modification for complex measurement of the two informative parameters magnetic noise voltage and magneto-acoustic voltage is shown in Fig.2.a). In this configuration the appliance works as follows. When releasing the trigger 1, the spring 6 and the manipulator arm 2 press with constant force the tested material 4 to the magnetic noise transducer 5 and the piezo-transducer 3.



Fig.1. View of the modular devices: a) “MULTITEST CD 010”; b) “MULTITEST MC 010”



**Fig.2. Appliance (testing pliers) for complex measurement of non-destructive informative parameters: a) magnetic noise voltage and magneto-acoustic voltage; b) velocity and damping of ultrasound.**

Fig.2.b) is a schematic diagram of the other configuration – for measuring informative parameters speed and attenuation of the ultrasound. It operates with the modular devices for measurement of velocity and damping of ultrasound MULTITEST – CD 10 as follows. The material to be tested is placed between the tempered center 7 and the ultrasound detector 8. When releasing the trigger 1, the spring 6 and the manipulator arm 2 press with constant force the tested material to the optoelectronic transducer 9 and ultrasound detector 8. The relative thickness of the material  $d_v$  (measured with the ultrasound detector 8) is provided simultaneously with the real thickness  $d_0$  (measured by the optoelectronic transducer 9) and the velocity and damping of the ultrasound are determined [3].

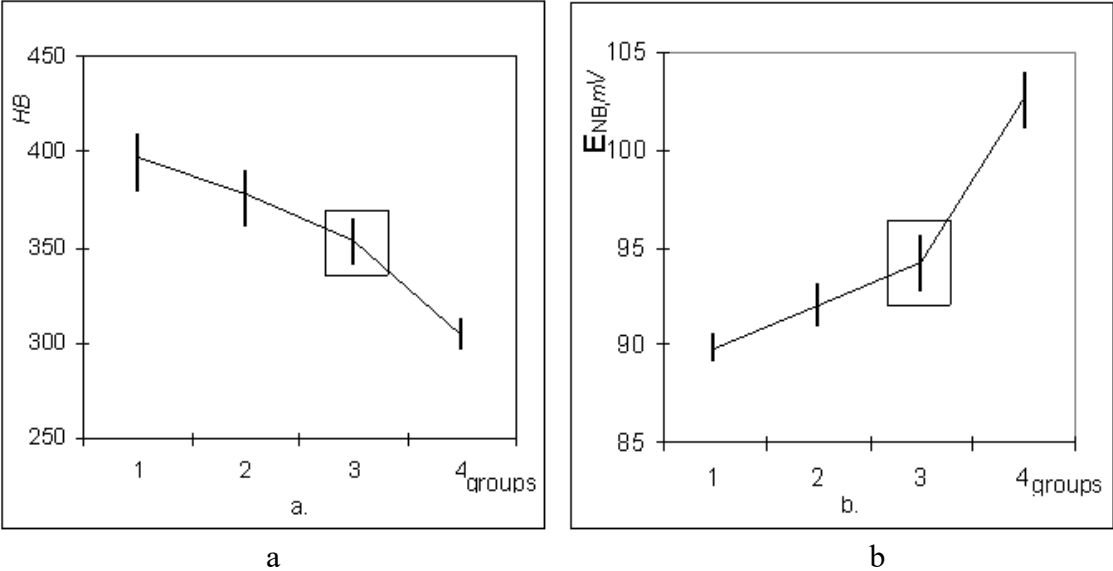
**Table 1. Mechanical properties of reference samples of steel and cast iron.**

Groups of samples from steel 40X, according to BSS		Groups of samples from grey cast iron (CЧ) and ductile iron (BЧ), according to BSS		
№	Brinell hardness $HB$	№	Tensility $R_m$ , MPa	
1	380 – 410	1	120 – 157	CЧ15
2	360 – 390	2	300-337	CЧ30
3	330 – 365	3	450-500	BЧ50
4	300 -310	4	590-630	BЧ60
	-	5	640-675	BЧ60-2

Table 1 presents the mechanical properties of the studied steel and cast iron samples.

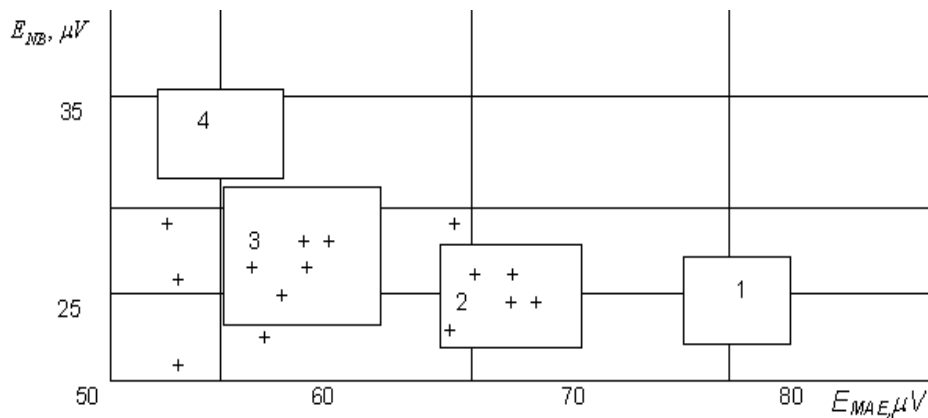
### 4. Analysis of the experimental results

Fig.3.a) shows the results of the measurements of the hardness of the reference samples of steel 40X from Table 1. It shows the mean values of the span of the obtained values of  $HB$  for each group. Fig.3.b) presents the span of the values of the measured magnetic noise voltage  $E_{NB}$  in the same samples with a different level of heat treatment (Table 1, left column). Fig.3 shows the choice of group 3 from Table 1 as good in terms of heat treatment. For this group, the span of the measurement values of the hardness  $HB$  and the magnetic noise voltage  $E_{NB}$  is marked with a surrounding square. The samples to the left are considered “hard” and to the right – “soft”. The  $HB$  analysis of the steel 40X samples with equal heat treatment shows more samples classified in group 2 than should be and less samples classified in group 3 than should be. The  $E_{NB}$  analysis, on the other hand, shows less samples classified in group 2 than should be. Therefore, another non-destructive informative parameter is required for correct classification.



**Fig.3. Confidence intervals and mean values of the measurement of  $HB$  and the magnetic noise voltage in the groups of reference samples from steel 40X.**

Fig.4 illustrates graphically the characteristic areas of the groups of reference samples of steel 40X, formed by means of complex measurement of the two informative parameters  $E_{NB}$  and  $E_{MAE}$ . The overlapping of the areas is a criterion for indistinguished areas of the groups of samples. As can be seen, if only the informative parameter  $E_{NB}$  is used, the characteristic areas 3 and 2 overlap, therefore they are undistinguishable, while the use of only the parameter  $E_{MAE}$  makes the areas 4 and 3 undistinguishable. When both informative parameters are used, the characteristic areas do not overlap, thus increasing the probability for correct classification of the tested material with respect to its structure or mechanical properties. After the characteristic areas are defined on the basis of the reference samples, details and materials with unknown parameters can be tested. In Fig.4 such measurements of materials with unknown properties are shown with a cross sign. Materials whose measurements lie outside the characteristic area 3, do not possess the necessary hardness. Similar is the methodology for comparative analysis of the results from the non-destructive testing of the groups of foundry cast iron samples (Table 1, right column), where the informative parameters are the velocity and damping of ultrasound in cast iron mouldings. The measurements and analyses are described in more detail in works [3,8].



**Fig.4. Characteristic areas of the steel 40X samples obtained after complex measurement of the two non-destructive informative parameters  $E_{NB}$  and  $E_{MAE}$**

## 5. Conclusions

The developed devices “MULTITEST-MC 10” (for complex measurement of the non-destructive informative parameters magnetic noise voltage  $E_{NB}$  and magneto-acoustic voltage  $E_{MAE}$ ) and “MULTITEST-CD 10” (for fast measurement of the speed of volume ultrasound waves in solid materials) can be used for performing non-destructive testing of the structure and mechanical properties of metal materials and details, both in laboratory and industrial conditions. For this purpose, it is necessary to have preliminary measurements and correlations of the magneto-noise characteristics, speed and attenuation of the ultrasound through comparative samples with referenced structural-mechanical properties of the tested material.

## References

1. Afifi A., S. Azen, Statistical Analysis, A Computer Oriented Approach, Academic Press, New York,1982.
2. Velev B., Iv. Ivanov, Kr. Banov, Study of Ferromagnetic Materials with the Methods of Magnetoacoustic Emission and Magnetic Noise, NDT 2018, Volume 1, Issue 4, 2603-4018,Year 2018.
3. Kamenov VI., Y. Mirchev, Metrological Provision of MULTITEST CD010 Device for Measuring the Velocity and Attenuation of Ultrasound in Materials, International Journal “NDT Days”, Volume II, Issue 4, pp 462 – 466,Year 2019.
4. Dzhudzhev B., V. Angelov, M. Zlatkov, P. Kostadinov, Testing of Automaticized System for Complex Non-destructive Study of Metallic Materials, International Scientific Journal “Machines, Technologies, Materials”, Vol. 13, Issue 6, pp. 273-276, 2019.
5. Velev B., B. Dzudzev, Y. Avzali, Optimization of “Multitest MC010” for complex non-destruction control of the structural status and properties of feromsgnetic materials, Bulgarian Journal of Engineering Design, issue 40, pp.23-26, ISSN 1313-7530, 2019.
6. Velev B., V. Kamenov, Metrological provision of a magnetic noise measurer and magnetic acoustic emission in ferromagnetic materials, Bulgarian journal of engineering design, issue 40, pp.47-51, ISSN 1313-7530, 2019.
7. Dzhudzhev B., B. Velev, M. Zlatkov, P. Kostadinov, Study on the structure and composition of new ferromagnetic materials with an automated system for complex non-destructive testing, Proc. of 2020 XXX International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance (MMA)”, DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254265, 2020.

8. Velev B., Iv. Ivanov, Vl. Kamenov, Automated System for Complex Non-Destructive Testing of the Structure and Mechanical Properties of Mechanical Engineering Materials, ISSN 1061-8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, Vol. 57, No. 3, pp. 203–211. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021. Russian Text © The Author(s), 2021, published in Defektoskopiya, 2021, No. 3, pp. 17–27.
9. Velev B., and V.Kamenov, Automated Processing of Data from Measurement of Thermo-Electromotive Voltage and Magnetic Noise Voltage in Metals and Alloys, ISSN 1061-8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2022, Vol. 58, No. 11, pp. 1026–1034. Pleiades Publishing, Ltd., 2022.
10. Dzhudzhev B., B. Velev, Vl. Kamenov, Non – destructive Analysis of Ferromagnetic Materials by Means of Barkhausen Effect Methods, 2022 XXXII International Scientific Symposium “Metrology and Metrology Assurance (MMA)” 2022, DOI: 978-1-6654-8569-2/22/, 2022 IEEE.



## Optical Gas Sensor for Industrial Applications

Halina BOHDAN, Mykhailo HLUSHCHENKO, Anatolij PROTASOV,  
Oleksandr MURAVIOV

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

### Abstract

The purpose of this work is to develop an optical sensor for measuring the concentration of carbon monoxide in the air of industrial enterprises, which implements the method of laser absorption spectrometry and has a high sensitivity. A feature of this sensor is the use of two radiation receivers in the design, which register different wavelengths. The achieved resolution of the sensor when determining the CO concentration is 3 ppm.

**Keywords:** carbon monoxide, laser absorption spectrometry, gas sensor.

## Оптический датчик угарного газа для промышленности

Галина БОГДАН, Михаил ГЛУЩЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ,  
Александр МУРАВЬОВ

### 1. Введение

Монооксид углерода (угарный газ) CO – это газ, который не имеет запаха, цвета и вкуса, обычно присутствует в атмосфере в низких концентрациях (0,03-0,20 частей на миллион). Увеличение концентрации CO в воздухе непосредственно связано с активной деятельностью промышленных предприятий, из-за больших объемов сжигания природного газа (метана или пропана), что является основным источником образования угарного газа. Как показывают статистические данные [1-2] совокупная заболеваемость и смертность от отравления CO в 2017 году по всему миру составили 137 случаев на миллион и 4,6 смертей на миллион соответственно. Сильная токсичность монооксида углерода для человека вызвана его высокой скоростью взаимодействием с гемоглобином (примерно в десять раз выше скорости присоединения кислорода), и низкой скоростью диссоциации (расщепления) образованного химического соединения карбоксигемоглобина [1]. Увеличении концентрации CO в окружающем воздухе до 1,28% приводит к смерти человека в течении 1-3 минут, но даже небольшие дозы угарного газа приводят к неприятным последствиям для организма: тошнота, усталость, головная боль, потеря сознания. Кроме того, значительное количество людей, переживших отравление CO, страдают длительными неврологическими и аффективными осложнениями [3]. Кроме нанесения вреда организму человека, соединение угарного газа с гидроксидом (ОН) в воздухе, вызывая глобальное потепление [4]. Поэтому важной задачей является разработка чувствительных надежных и недорогих датчиков CO для автоматизированных систем мониторинга качества воздуха на промышленных предприятиях.

Для измерения содержания CO в воздухе промышленных предприятий используют различные методы [5-6], такие как: инфракрасная спектроскопия, вакуумная ультрафиолетовая резонансная флуоресценция, диодно лазерная абсорбционная

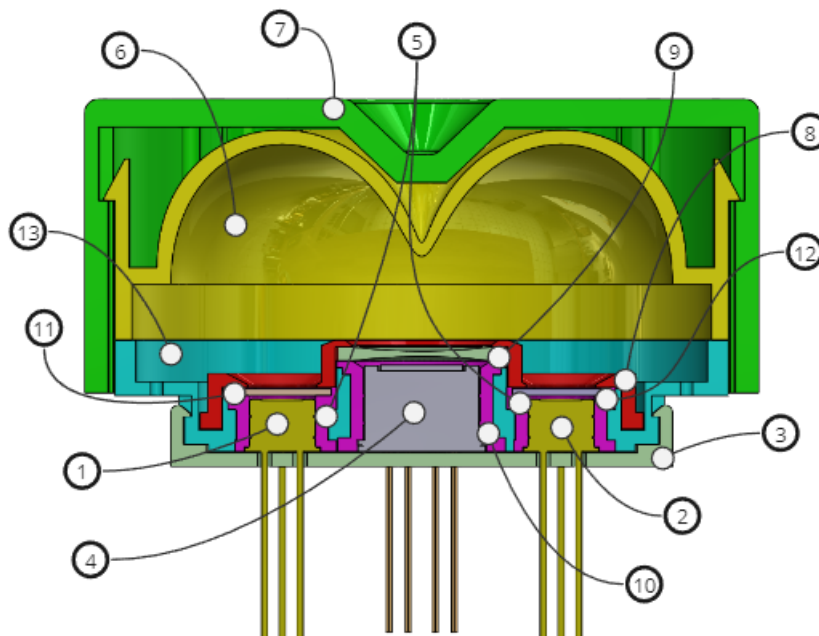
спектроскопия, инфракрасное поглощение с Фурье-преобразованием по замкнутому пути, газовая хроматография в сочетании с детектором на основе оксида ртути или пламенно-ионизационным детектором, фотометрические методы и др.

В последнее время, при разработке датчиков CO все шире начинают применять оптические методы лазерной абсорбционной спектроскопии (ЛАС) [7-10]. Данный метод абсорбционной спектроскопии, использует лазер в качестве источника света и измеряет концентрацию CO в воздухе на основе обнаружения изменения интенсивности лазерного луча после прохождения вдоль оптического пути. Метод ЛАС один из наиболее чувствительных для определения концентрации химических веществ в газовой фазе, поскольку почти каждая молекула имеет уникальный спектроскопический отпечаток в инфракрасной области спектра [8]. К преимуществам данного метода относят: возможность определять концентрацию CO в воздухе бесконтактным методом, быстрое время отклика, высокая чувствительность и избирательность, не требует калибровки, простота в обслуживании, длительное время работы. Датчики, принцип работы которых основан на методе ЛАС, хорошо совместимы с автоматизированными системами мониторинга воздуха на промышленных предприятиях, которые снимают показания в реальном времени.

Целью данной работы, является разработка оптического датчика, для измерения концентрации монооксида углерода в воздухе промышленных предприятий, который реализует метод лазерной абсорбционной спектроскопии и обладает высокой чувствительностью.

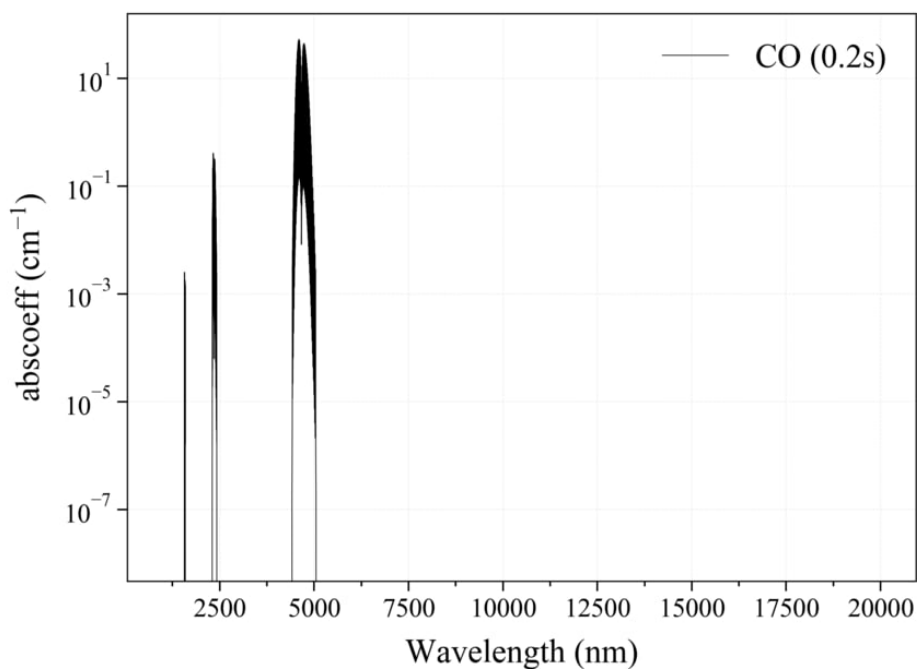
## 2. Конструкция датчика угарного газа

Конструкция разработанного датчика для определения концентрации угарного газа показана на Рис. 1



**Рис. 1. Конструкция оптического датчика для определения концентрации CO в воздухе: 1, 2 – приемники излучения; 3 – фиксатор активных оптических элементов; 4 – излучатель; 5 – силиконовая прокладка для приемника; 6 – зеркало; 7 – защитный корпус; 8 – фиксатор пассивных оптических элементов; 9 – рассеивающая линза; 10 – силиконовая прокладка для излучателя; 11 – полосовой фильтр, 2000 нм; 12 – полосовой фильтр, 2300 нм; 13 – корпус**

Процесс работы датчика следующий: излучатель (4) генерирует излучение с длиной волны, которая соответствует абсорбции угарного газа (Рис. 2). Это излучение проходит через воздушную среду внутри датчика, которая идентична воздуху в месте контроля. Выбор длины волны, для спектроскопического датчика угарного газа, основан на абсорбционных свойствах CO, способности к чувствительному обнаружению и надежному измерению, а также техническим возможностям для работы с этой длиной волны. Для улучшения технических характеристик датчика предпочтительней работать на длине волны 4,5 – 5 нм (Рис. 2), где свойства поглощения излучения угарным газом выше, но в связи с высокой стоимостью излучателей, способных генерировать такие сигналы, была выбрана длина волны 2300 нм.



**Рис. 2. Типовые длины волн для обнаружения монооксида углерода**

Приемники излучения (1,2) принимают сигнал, прошедший через воздушную среду внутри измерительной камеры датчика. Первый приемник излучения (1), является основным, прикрыт полосовым оптическим фильтром, пропускающим излучение с длиной волны 2300 нм (12), измеряет интенсивность сигнала, проходящего через воздушную среду. Если монооксид углерода присутствует в исследуемой воздушной среде, то происходит процесс абсорбции некоторой части излученного сигнала, что приводит к понижению его интенсивности. Основной приемопередатчик регистрирует уменьшение интенсивности излучения и передает эту информацию для дальнейшего анализа.

Второй приемник (2) является референсным и также прикрыт полосовым оптическим фильтром, настроенным на длину волны 2000 нм (11) (длина волны излучения которое не поглощается угарным газом). Его главная функция заключается в измерении начального уровня интенсивности излученного сигнала. Он служит для компенсации влияния изменений интенсивности света, которые могут возникнуть в результате факторов, не связанных с присутствием угарного газа (например, изменения в источнике света или оптических свойств воздушной среды).

С помощью референсного приемника датчик может компенсировать изменения в базовом уровне излученного сигнала, что позволяет более точно определить уменьшение

интенсивности, вызванное угарным газом. По аналогии, измеренные значения основного приемника можно откалибровать и корректировать в зависимости от значений референсного приемника.

Силиконовые прокладки (5, 10) предназначены: для отвода тепла выделяющегося при работе излучателя; обеспечения герметичности системы, что позволяет защитить компоненты датчика от попадания влаги и тем самым уменьшить количество ложных срабатываний; компенсации неточности изготовления элементов датчика.

Предложенная форма зеркала (6) увеличивает равномерность рассеивания излучения внутри измерительной камеры датчика.

### 3. Результаты моделирования

Для определения технических возможностей разработанного датчика было проведено моделирование в среде Ansys SPEOS (Рис. 3).

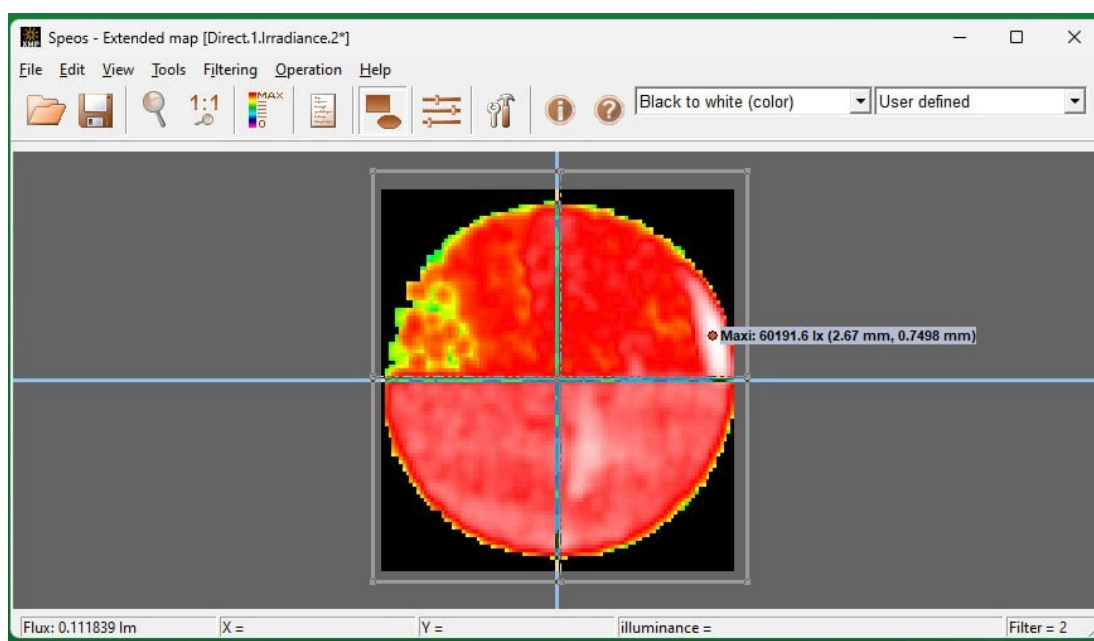


Рис. 2. Моделирование работы датчика в среде Ansys SPEOS при наличии в воздухе CO

В процессе моделирование были учтены разные оптические параметры сенсора (отражение, пропускание и рассеяние света в оптических элементах датчика); свойства материалов, из которых изготовлены элементы датчика (оптическая проницаемость, индексы преломления и коэффициенты поглощения); свойства источника излучения (спектральный профиль, мощность и пространственное распределение).

Концентрация монооксида углерода определялась по уменьшению интенсивности излучения. Моделирование показало, что минимальная концентрация CO в воздухе, которую способен улавливать данный датчик равна 0.3 ppm.

### 4. Выводы

Разработанный оптический датчик, для определения концентрации угарного газа в воздухе промышленных предприятий, с одним излучателем и двумя приемниками имеет ряд преимуществ:

1. Высокая чувствительность (определяет наличие СО в воздухе при концентрации 0.3 ppm).

2. Селективность. Благодаря использованию оптического фильтра, пропускающего только свет с длиной волны, специфичной для абсорбции угарного газа, датчик восприимчив исключительно к СО. Это означает, что он способен отличать угарный газ от других, составляющих среды, что может быть полезным на промышленных предприятиях.

3. Калибровка и компенсация. Наличие референсного приемника позволяет компенсировать фоновые изменения интенсивности света, не связанные с угарным газом. Это позволяет получить более точные измерения и обеспечить стабильность работы датчика в разных условиях.

4. Скорость отклика. Спектроскопические датчики обычно обладают высокой скоростью отклика, что позволяет мгновенно обнаруживать изменения концентрации угарного газа.

5. Долговечность и надежность.

6. Совместимость с автоматизированными системами мониторинга окружающей среды.

## Литература

1. Mattiuzzi C, Lippi G. Worldwide epidemiology of carbon monoxide poisoning. *Hum Exp Toxicol.* vol. 39(4), pp. 387-392, 2020.
2. Janík M, Ublová M, Kučerová Š, Hejna P. Carbon monoxide-related fatalities: A 60-year single institution experience. *J Forensic Leg Med.*, vol. 48 pp. 23-29, 2017.
3. Townsend C.L., Maynard R.L., Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide *Occupational and Environmental Medicine.* vol. 59, pp. 708-711, 2002.
4. Khalil, M.A.; Rasmussen, R.A. Carbon Monoxide in the earth's atmosphere: Increasing trend. *Science* 1984, Khalil, M.A.; Rasmussen, R.A. Carbon Monoxide in the earth's atmosphere: Increasing trend. *Science.* 224, pp. 54-56, 1984.
5. Chen, H., Karion, A., Rella, C. W., Winderlich, J., Gerbig, C., Filges, A., Newberger, T., Sweeney, C., and Tans, P. P.: Accurate measurements of carbon monoxide in humid air using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, pp. 1031–1040, 2013.
6. Bohdan H, Hlushchenko M, Bohdan I, The automated smoke detection system *International Journal «NDT Days» Volume V, Issue 5*, pp. 264-268, 2022.
7. Li, J. Laser Absorption Spectroscopy. *Encyclopedia.* Available online: <https://encyclopedia.pub/entry/1976> (accessed on 04 June 2023).
8. Du, Z.H.; Zhang, S.; Li, J.Y.; Gao, N.; Tong, K.B. Mid-Infrared Tunable Laser-Based Broadband Fingerprint Absorption Spectroscopy for Trace Gas Sensing: A Review. *Appl Sci-Basel.* №9, pp. 338, 2019.
9. Jane, H.; Ralph, P.T. Optical gas sensing: A review. *Meas. Sci. Technol.* 2013, 24.
10. Miller, D.J.; Sun, K.; Tao, L.; Khan, M.A.; Zondlo, M.A. Open-path, quantum cascade-laser-based sensor for high-resolution atmospheric ammonia measurements. *Atmos. Meas. Tech.* №7, pp. 81–93, 2014.



## Conventional Methods for Non-destructive Testing of Main Gas Pipelines

Tsvetomir BORISOV, Yordan MIRCHEV

Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [nntdd@abv.bg](mailto:nntdd@abv.bg)

### Abstract

The article examines the different types of main gas pipeline routes as one of the most critical and vulnerable parts of the gas infrastructure, ensuring energy sustainability and security. The main methods of non-destructive testing, possibly applicable to the specific maintenance activities and the removal of accidents on the transit routes during operation, are summarized. The moments surrounding the good production practices were considered and the great importance of performing an engineering critical assessment was touched upon, the results of which are directly related to the operational suitability of the gas pipeline under different technical conditions, which are also the main starting data for determining the residual resource of the facility.

**Keywords:** Main gas pipelines, non-destructive testing, welding, ultrasound, radiography, engineering critical assessment, workmanship criteria

## Конвенционални методи за безразрушителен контрол на магистрални газопроводи

Цветомир БОРИСОВ, Йордан МИРЧЕВ

### 1. Увод

Жизненият цикъл на дадено магистрално тръбопроводно трасе започва още от производството и монтажа на тръбните профили. Жизненият цикъл по време на експлоатация на тръбопровода зависи от степента на качество на изработката на тръбните профили и класа на качество на изработените челни заварени съединения. Надеждното откриване и правилното оценяване на съществуващите несъвършенства в продуктите (тръбен профил и челно заварено съединение) на тръбопроводите, предопределя качеството на експлоатационния живот на тръбопровода. Правилното прилагането на методи за безразрушителен контрол за откриване на несъвършенства и следене на състоянието на вече известните допустими несъвършенства по време на производство, монтаж и експлоатация на магистралните тръбопроводи намалява риска от аварии и нежелани спирания [1 ÷ 4].

Полето на приложимост на безразрушителното изпитване е много широко, интердисциплинарно, което изисква значителни познания от специалистите за да се подберат правилните методи и технологии за изпитване на обектите в зависимост от материала и вида, разположението и големината на изпитваните дефекти в тях.

**Целта на настоящата работа** е да се представят възможните дефекти при производство, монтаж и експлоатация и методите за тяхното безразрушително изпитване, както и видовете критериите за оценка на магистрални тръбопроводи.

## 2. Дефекти в тръбопроводите

Дефектите възникват по време на различните етапи на производство, монтаж и експлоатация на магистрални газопроводи. Причините за тяхната поява се определят от качеството на технологичните процеси за производство на отделните продукти, лош монтаж и условията за експлоатация на газопроводите.

Обобщен анализ на видовете дефекти, възникващи на различен етапи от жизнения цикъл на газопроводите, е дадено на фиг. 1.



Фиг.1. Видове несъвършенства и отклонения в газопроводи.

Половината от отказите на газопроводите се дължат на различни причини за възникване и/или развитие на дефекти по време на работа на газопроводите. Дефектите, които не са открити по време на производство и монтаж, могат да се развият по време на експлоатация и да причинят аварии.

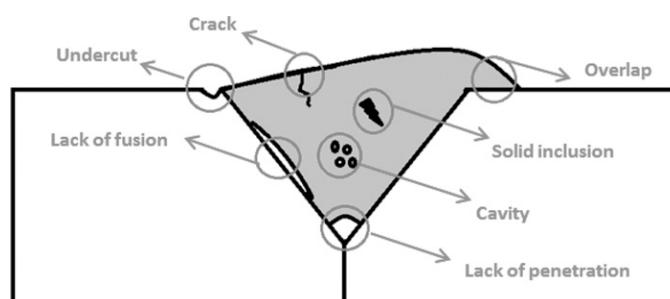
Разпределението на отказите в газопроводи, по причина на тяхното появяване, е представено в таблица 1, като се използват данни, приведени в [4].

Таблица 1. Разпределение на отказите в газопроводи.

№	Видове откази в газопроводи	Разпределение
1	Вътрешна корозия и ерозия	2.5 %
2	Външна корозия и корозия под напрежение	29%
3	Повреди при експлоатация	16%
4	Несъвършенства в тръбите при изработването им	14%
5	Несъвършенства на оборудването при доставката	1%
6	Нарушаване на режима на експлоатация	1.5%
7	Несъвършенства при монтаж на оборудването	23%
8	Стихийни бедствия	7%
9	Други причини	5%

Производствените дефекти се получават по времена технологични процеси за обработване на металите, като леене, валцуване, заваряване, термообработване и др. След всеки технологичен процес за производство на съответния продукт прокат, тръбен профил или заварено съединение се провежда безразрушителен контрол за оценка наличието на дефекти.

Основните откази по време на експлоатация на газопреносната мержа са вследствие на развитие на *дефекти по време на монтаж в заварените съединения* – 23 %. Несъвършенства в заварените съединения са класифицирани в стандарт EN ISO 6520-1 [5], а тяхната оценка за качество на завареното съединение се провежда по EN ISO 5817 [6] с допълнителни изисквания дадени в продуктовете стандарти за производств и монтаж на тръбопроводи. Един пример за обобщение на видовете несъвършенства в заварени съединения е даден на фиг.2.



Фиг.2. Основни видове несъвършенства в заварени съединения.

Несъвършенствата, дадени на фиг. 2, се класифицират в следните групи съгласно EN ISO 6520-1:

- група 100 – пукнатини;
- група 200 – кухини (газови включвания);
- група 300 – твърди включвания;
- група 400 – несплавявания и непроваряване;
- група 500 – дефекти при монтажа;
- група 600 – други.

Качеството на завареното съединения за съответната група и подгрупа несъвършенства се определя съгласно три нива дадени в EN ISO 5817. Клас за качество е В, С и D, като класа на качество намалява от В към D. За оценяване класа на качество се използват резултати получени от методи за безразрушително изпитване на тръбопроводите.

Преносът на природен газ през цялата дължина на магистралния преносен напорен тръбопровод е непрекъснат през времето процес извършващ се при постоянно положително, високо налягане на транспортируемият газ. В различните участъци налягането варира в известни граници, но въпреки тези явления налягането е в диапазона 50-100 Bar. Наблюдават се и циклични непостоянни положителни флукуации в налягането в различните участъци на тръбопровода, които се характеризират, като вредни и водят до пряко влияние върху механичните свойства на метала, увеличавайки възможността за развитието на структурни изменения в него и появата на умора в материала. Всичко това води до *развитие на несъвършенствата до дефекти по време на експлоатация*.

Значителен обем от всички несъвършенства в процентно съотношение се пада на несъвършенствата свързани с външна корозия на газопровода – 29 %. Най-опасни са несъвършенствата, свързани с корозия под напрежение, които нарушават целостта на тръбопровода, което води и до аварии. Най-често местата, където се появяват тези поражения, като комплекси от повреди, са областите, в които възниква концентрация на механичните напрежения.

По време на транспорт на различни типове природен газ (съответно с различна концентрация на включеният водород) през тръбопроводното трасе, като съпътстващ примес в газа се наблюдава и наличието на газ водород. Неблагоприятното разпадане на молекулата му води до появата на атомен водород, в следствие на което се наблюдава появата на водородна крехкост в метала. Крайно нежелано явление водещо до промяна на механичните свойства на метала, което е свързано с по-бързо развитие на дефекти при условията на механични и термични натоварвания на материала по време на експлоатация.

В зависимост от вида и местоположението на несъвършенствата се използват различни методи и технологии за безразрушително изпитване. Разработени са достатъчно технически спецификации за прилагане на методите за безразрушително изпитване за контрол на тръбопроводи за пренос на газ и нефт [7 ÷ 11].

## 2. Методи

В таблица 2 са дадени използваните методи и стандарти за безразрушителен контрол в заварени съединения на Европейски офшорни газопроводи за пренос на природен газ [12 ÷ 19].

**Таблица 2. Методи и стандарти, прилагани при безразрушително изпитване на заварарени съединения в Европейски офшорни газопроводи за природен газ**

Метод за изпитване	Стандарт за изпитване
Визуален	ISO 17637 и ISO 5817
Магнитно-прахов	ISO 17638
Капилярен	ISO 3452-1
Радиографичен	ISO 17636-1
Ръчен ултразвуков	ISO 17640
Ръчен или автоматизиран с фазираци осезатели	ISO 13588
Автоматизиран с фазираци осезатели, технология за зонално разделяне	ASTM E-1961-16 ISO 13847, Annex G
Ултразвуков за разслой	ISO 10893-8
Време-дифракционен (TOFD)	ISO 10863

Методите за безразрушително изпитване се разделят на две основни групи, обемен и повърхностни. Обикновено за получаване на цялостна информация за изпитваният тръбопровод се използват в комбинация обемен и повърхностен метод.

### 2.1 Повърхностни методи за безразрушително изпитване

Това са методите, които се прилагат за изпитване на повърхностния и подповърхностния слой на обекта:

- визуален;

- капилярнен;
- магнитно-прахов;

Повърхностен метод е също така вихровотоковият, но той не се разглежда в настоящата работа, понеже не се прилага за изпитване в продуктите стандарти за изграждане на газопроводи.

Всеки от повърхностните методи има своите предимства и недостатъци в зависимост от изпитвания материал, вид и разположение на изпитваните несъвършенства. На основата на физичните принципи на прилаганите методи, на техните предимства и недостатъци се определя кой от методите е по-подходящ за решаване на конкретната задача за безразрушително изпитване на тръбопроводите.

Визуалният метод регистрира несъвършенства с по-големи размери спрямо останалите повърхностни методи, но е по-бърз за провеждане и не изисква технически средства за безразрушително изпитване а само такива за осветление, измерване и увеличение. При визуален контрол се използват осветителни тела, увеличителни лупи и измерителни технически средства, като шублер, краещни мерки, шаблони и компаратори.

Капилярният метод е с най-голяма чувствителност към откриване на малки дефекти спрямо останалите повърхностни методи. Предимство на капилярния метод пред магнитно-праховият е че може да се използва за изпитване на неферомагнитни материали, като аустенитна стомана. Недостатък на капилярния спрямо магнитно-праховия метод е, че несъвършенството трябва да бъде с разкритие на повърхността и да не е запълнено със замърсявания.

Трябва да се отбележи че магнитно-праховият метод има възможността да открива и подповърхностни нецялостности, с дълбочина на залягане до приблизително 2 mm в зависимост от създаваното магнитно поле в изпитвания материал.

## ***2.2. Обемни методи за безразрушително изпитване***

Това са методите, които се прилагат за изпитване на приблизително целия обем на обекта, като регистрираните отклонения от стандартните или зададените норми под формата на индикации от нецялостности и несъвършенства, се отнасят индиректно за състоянието на обема на изпитвания обект, чрез интерпретация на получените сигнали и индикации посредством физичните характеристики на съответния метод:

- радиография;
- ултразвук.

Въпреки, че се явяват обемни, двата метода не могат напълно да изпитат 100% от обема за изпитване на обекта.

Радиографският метод за изпитание не е достатъчно прецизен при регистрирането на линейни несъвършенства и несъвършенства, перпендикулярни на направлението на пролъчване.

Ултразвуковият метод за изпитание не е достатъчно прецизен при регистрирането на линейни несъвършенства и несъвършенства, съвпадащи с направлението на прозвучаване. Един обширен преглед на ултразвуковите методи за контрол на магистрални тръбопроводи за пренос на газ и нефт е даден в [3].

Въз основа на спомената по-горе информация се налага комбинирано използване на няколко съществуващи методи за безразрушително изпитване, за да може да се изпита целият обем на обекта и да се елиминират слабите страни на методите.

### 3. Критерии за оценка

Традиционните критерии за оценка с използване на резултати чрез изпитване с безразрушителни методи се основата на добрата производствена практика (workmanship criteria). Голяма част от стандартите за оценка чрез безразрушителен контрол, в т.ч EN ISO 5817 са разработени на основата на критериите за добра производствена практика (изработка). Критериите за добра производствена практика са разработени с ограничено влияние на характеристиките на материала и не взема под внимание приложението по предназначение (fitness for service) на оценяваният продукт или съоръжение. Взета е предвид само дължината на даден дефект на заваръчния шев.

В резултат на остарелите разбирания за процесите, с времето, критериите за изработка стават все по-консервативни. Този консерватизъм води до ненужни ремонти, които могат да увеличат разходите за производство на продукта, също така водят и до нежелани остатъчни заваръчни напрежения и деформации в мястото на извършения ремонт, което е нежелателно.

През 70-те до началото на 80-те години на миналия век инженерната критична оценка (engineering critical assessment – ECA) започва да се появява като алтернатива на традиционните критерии за добра производствена практика. ECA разчита до голяма степен на последните разработки и иновации в областта на механиката на разрушаване. При ECA критерии за приемане на несъвършенства се вземат предвид допълнителни фактори относно приложението по предназначение на оценяваното съоръжението като:

- история на натоварването на заваръчния шев, включително всички циклични и статични напрежения, очаквани през целия жизнен цикъл на заварената конструкция;
- якост на основния метал и заваръчния материал ;
- якост на разрушаване на основния метал и заваръчния материал;
- ориентация на несъвършенството (напр. измерване на неговите дължина, височина и обемния му вид, за разлика само от дължината на несъвършенството).

Заедно анализирани, тези допълнителни фактори позволяват по-точни критерии за приемане на несъвършенства, което води до толерантност към дефектите (damage tolerance) и по-малко ненужно ремонтирани заварени съединения.

Задълбочен анализ на предимствата и недостатъците между ECA и Workmanship criteria за оценка на изпитваните с безразрушителни методи продукти и съоръжения е направен в [20].

Критериите за приемане на дефекти, базирани на инженерната критична оценка, успешно се използват в нефтената и газовата промишленост, особено по отношение на оценката на челно заварените съединения на тръбопроводи за магистрален пренос на нефт и газ. По-лесно се прилага ECA за оценка на заварени съединения на магистрални тръбопроводи, защото тези свързващи заварени съединения са еднакви по цялата дължина, което позволява да се използва автоматизирано заваряване, което ги прави еднотипни по свойства елементи, част от структурата. Прилагането на ECA за оценка на заварени съединения в магистрални тръбопроводи за пренос на газ и петрол е валидирано в със стандарти EN 12732 [7] и ISO 13847 [9].

### 4. Изводи

Анализът на проведените изследвания за видове дефекти в газопроводи и откази показва, че най-голям процент от всички причини за аварии са вследствие на външна корозия и корозия под напрежение, както и вследствие на несъвършенства, възникнали

при монтаж на оборудването чрез заваряване. В резултат на анализа е проведено допълнително изследване за възможностите на прилагане на методи за безразрушителен контрол на несъвършенства в заварени съединения на тръбопроводи.

Анализът на проведените изследвания за прилагане на методите за безразрушително изпитване показва, че за цялостна оценка на завареното съединение трябва да се прилагат минимум по един обемен и един повърхностен метод. Това ще гарантира покриване на целия обем по време на изпитването. От разгледаните по-горе конвенционални методи за изпитване и оценка на заварени съединения използвани при строежа на магистрални газопроводи, като най-безопасен и с достатъчна за практиката надеждност и достоверност е определен ултразвуковият метод. Той ни дава информация за наличие или липса на несъвършенства в обема на завареното съединение. Предимствата на ултразвуковият пред радиографичния метод от гледна точка на безопасност по време на извършване на изпитанието е липсата на опасно лъчение (гама или рентгеново) и възможността за прилагането му в присъствие на други работещи по време на изпитанието. Изключително голямата бързина, с която се осъществява ултразвуковото изпитание (особено при автоматизация на изпитването), както и възможността за предоставянето на резултат, непосредствено след изпитанието, открояват ултразвукът, като го правят по-подходящ метод за извършването на дейностите по изпитване и оценка.

Не на последно място трябва да се спомене за наличните съвременни технологични решения при прилагането на ултразвуковото изпитване, разполагащи с големи възможности и чувствителност на изпитването спрямо конвенционалната ултразвукова техника [21].

## **6. Заключение**

Направеният обзор дава възможност да се придобие професионална представа за основните дефекти и техните причини за откази на газопровода, възникващи при изграждането, монтажа и експлоатацията им.

Разгледани са безразрушителните методи за контрол на тръбопроводи за нефт и газ, като са посочени валидирани решения за тяхното приложение чрез стандарти.

Разгледани са двата основни обемен метода за контрол на заварени съединения на газопровода, като са отбелязани характерните им особености с техните силни и слаби страни. Безразрушителното изпитване трябва да демонстрира не само способността за надеждно откриване на потенциално критични несъвършенства, но обикновено трябва също така да демонстрира способността си количествено да оразмерява и точно да позиционира несъвършенствата в компонента или обекта.

Засегната и разгледана е темата за важността за провеждане на безразрушително изпитване. Резултатите от него оказват непосредствено влияние върху икономическите и техническите експлоатационни параметри, които неминуемо оказват и пряко обществено влияние върху здравето и безопасността на хората. Данните, които се използват за извършване на инженерна критична оценка в по-големият си процент се получават на базата на получените резултати от приложените методи за безразрушителен контрол.

Засегнато е понятието „приложение по предназначение“, като е спомената възможността за „толерантност към дефектите“, защото в някои случаи е по-добре да наблюдаваме развитието на даден дефект до достигането му на ниво на недопустимост, отколкото извършването на ремонтни дейности по отстраняването му още по време на производството или когато е регистрирано по време на експлоатация на съоръжението.

Може би най-голямото погрешно схващане, поддържано от специалистите за безразрушителен контрол, е идеята, че стандартните критерии за добра производствена практика, съдържащи се в действащите стандарти, са пряко свързани с безопасността на компонентите или обекта. Когато персоналът приеме едни критерии за оценка на дадена изработка на обект, се възприема позицията, че резултатите от изпитването „трябва да гарантират, че дефектите са открити и отстранени като част от стандарт за добра производствена практика“, това показва, че концепцията за качество на изработка не се разбира. Може би този вид твърдение е добронамерено, но въпреки това, за да се дефинира „дефект“, потребителят на обекта трябва да извърши критична инженерна оценка (ЕСА), за да определи размера и позицията на несъвършенствата, която може да бъде критична за съоръжението и да доведе до разрушаване. След това процедурата за изпитване ще трябва да бъде валидирана, за да се гарантира, че може надеждно да открие този геометричен размер на дефекта и да може с достатъчна прецизност да оразмери положението на наличната му индикация, за да го сравни с предварително определен и разрешен размер на несъвършенствата.

Когато се използват критерии за оценка на добрата производствена практика, потребителите трябва да имат предвид, че действителната им функция е, просто, да се оцени „качеството“ на изработваната продукция или на изпитваното съоръжение. Човек не трябва да се придържа към някакво фалшиво чувство за безопасност, свързано с него. В следствие на засиленият интерес от много индустрии към възможностите на ултразвуковият метод, се наблюдава допълнително развитието на нови валидирани и внедрени в промишлеността технологии и технически средства за изпитване, с предполагаеми възможности за решаването на сериозни технологични проблеми.

## Литературни източници

1. Mihovski M., M. Sotirova, Non destructive testing of pipelines state and methods for its repairing, Scientific proceeding on STUME (ISSN 1310-3946), Edition XXI, Number 2 (139), International conference “NDT days 2013”, Sozopol, June 2013, pp. 392-410.
2. Skordev Al., Validated technical solution for non-destructive inspection of welded gas pipelines, International Journal “NDT Days”, ISSN 2603-4018, 2019, Vol. 2, Issue 4, pp. 450 – 461.
3. Mihovski M., P. Chukachev, Y. Mirchev, V. Sergienko, Application of ultrasonic methods for manufacture of pipelines and maintenance, 19<sup>th</sup> World Conference of NDT, Munich, 2016.
4. Конов В.В., Комплексная дистанционная диагностика подземных газопроводов, Территория NDT, 2013, 2, 43-52.
5. БДС EN ISO 6520-1. Заваряване и сродни процеси. Класификация на геометричните несъвършенства в метални материали. Част 1: Заваряване чрез стопяване.
6. БДС EN ISO 5817. Заваряване. Заваряване чрез стопяване на съединения от стомана, никел, титан и техните сплави (с изключение на лъчево заваряване). Нива на качество според несъвършенствата.
7. БДС EN 12732. Газова инфраструктура. Заваряване на стоманени тръбопроводи. Функционални изисквания.
8. БДС EN ISO 13686. Природен газ. Определяне на качеството.
9. ISO 13847. Petroleum and natural gas industries- Pipeline transportation systems- Welding of pipelines.
10. ASTM E-1961-16. Standard Practice for Mechanized Ultrasonic Testing of Girth Welds Using Zonal Discrimination with Focused Search Units.
11. ASME Code Boiler and Pressure Vessel Code. Sec. V. Nondestructive Examination.
12. БДС EN ISO 17637. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Визуално изпитване на заварени чрез стопяване съединения.
13. БДС EN ISO 17636-1. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Радиографично изпитване. Част 1: Технологии за изпитване посредством рентгеново и гама лъчение с използване на индустриални радиографични филми.

14. БДС EN ISO 17636-2. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Радиографично изпитване. Част 2: Технологии за изпитване посредством рентгеново и гама лъчение с използване на цифрови индикатори.
15. БДС EN ISO 17640. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Ултразвуково изпитване. Технологии, нива на изпитване и оценяване.
16. БДС EN ISO 10863. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Ултразвуково изпитване. Използване на време-дифракционна технология (TOFD).
17. БДС EN ISO 10893-8. Изпитване (контрол) без разрушаване на стоманени тръби. Част 8: Автоматизирано ултразвуково изпитване на безшевни и заварени стоманени тръби за откриване на плоски несъвършенства.
18. БДС EN ISO 3452-1. Изпитване (контрол) без разрушаване. Изпитване с проникващи течности. Част 1: Общи принципи.
19. БДС EN ISO 17638. Изпитване без разрушаване на заварени съединения. Магнитно-прахово изпитване.
20. Edward A. Ginzel, Misconceptions about NDT Workmanship Acceptance Criteria for Quality Control, Materials Research Institute, Waterloo, Ontario Canada.
21. Mirchev Y.N., Chukachev P.H., Mihovski M.M., Yanev P.A., Automatic systems for ultrasonic inspection of pipelines. International Journal NDT Days, ISSN 2603-4018, 2018, Vol. 1, Issue 1 (2018), pp. 27-37.



## Non-destructive Research for the Assessment of the Structure and Stress State of Materials

Yonka IVANOVA

<sup>1</sup> Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics, Sofia, Bulgaria  
email: [yonivan@phys.uni-sofia.bg](mailto:yonivan@phys.uni-sofia.bg)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

### Abstract

This work presents completed and published research results under Project No. BG05M2OP001-1.002-0011 “Building and Development of a Center for Competence in Mechatronics and Clean Technologies MIRACLe (mechatronics, innovation, robotics, automation, clean technologies)”, financed by Operative program “Science and education for intelligent growth”, co-financed by the European Regional Development Fund on the subject, “New methods and means for control and testing of mechatronic elements and systems” at the Institute of Mechanics – BAS.

**Keywords:** Non-destructive research, Non-destructive assessment, Structure, Stress state, MIRACLe project, Contract BG05M2OP001-1.002-0011-C02

## Безразрушителни изследвания за оценяване на структурата и напрегнатото състояние на материали

Йонка ИВАНОВА

### 1. Увод

По проект MIRACLe – BG05M2OP001-1.002-0011-C02 в тематичното направление „Нови методи и средства за контрол и изпитвания на мехатронни елементи и системи“ в Институт по механика –БАН е създадена лаборатория „Мониторинг, безразрушителен контрол, изпитвания и характеризирание на мехатронни системи“. По същия проект беше закупено оборудване, което представлява комплект от апарати за безразрушително изследване на материали в различни индустриални области, включително и в мехатрониката:

- Ниско и високочестотна ултразвукова сканираща система;
- Система за измерване на времето и разпространение на ултразвукови вълни;
- Апаратура за вихровотоков метод;
- Апаратура за акустична емисия.

По проекта MIRACLe по отношение на безразрушителния контрол в Институт по механика-БАН са предвидени следните научно-изследователски дейности, които са свързани с определяне, анализ и оценка на механичните характеристики, напрегнатото състояние, свойствата и експлоатационната надежност на материали и конструкции, използвани в мехатрониката, роботиката и във водещи индустриални отрасли като транспорт, енергетика и т.н. при различни режими на натоварване чрез съвременни

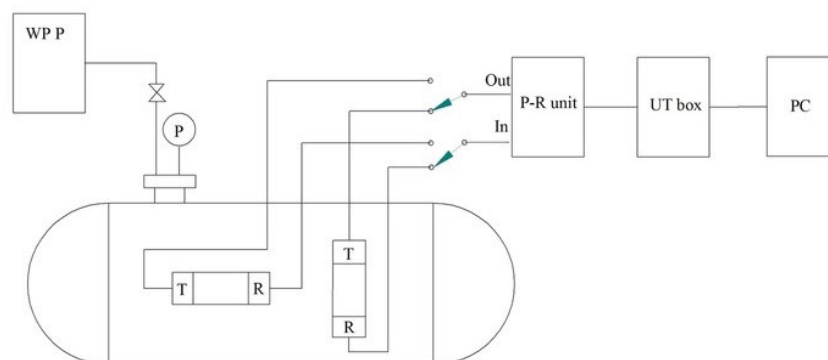
експериментални, безразрушителни и вибродиагностични техники и методи за изпитване.

В лабораторията „Мониторинг, безразрушителен контрол, изпитвания и характеризирание на мехатронни системи“ бяха проведени научни изследвания в няколко направления:

- Изследване на механичното напрегнато състояние на тънкостенни съдове под налягане с използване на ултразвукови методи.
- Изследване на възможностите на електромагнитен магнитношумов метод за контрол на качеството на термична обработка на стомани с приложение в транспорт, енергетика, машиностроене и др.отрасли с цел оценка на остатъчния технически ресурс на конструктивни елементи.
- Експериментално изследване на композитни материали с полимерна матрица при наличие на нееднородности и дефекти от типа на пукнатини под действие на различни по характер натоварвания.

## 2. Изследване на напрегнато състояние на тънкостенни съдове под налягане с използване на ултразвукови методи

В [1] се представя експериментално изследване на разпространението на ултразвукови вълни на Релей в стените на съд под налягане. Възможността за оценка на напреженията чрез ултразвукови методи се основава на акустоеластичния ефект. Експериментите бяха проведени с помощта на хидравличен тест, проведен в съд под налягане. Измерванията на времето за преминаване на ултразвуковата повърхностна вълна в стените на съда в аксиална и периферна посока се извършват при промяна на налягането до 7 МРа при постоянна температура. Бяха открити корелации между относителните промени във времето на преминаване на вълните и промяната в налягането. Влиянието на температурата и термичните напрежения върху скоростите на ултразвуковите вълни не се отчита.



Фигура 1. Експериментална установка [1]

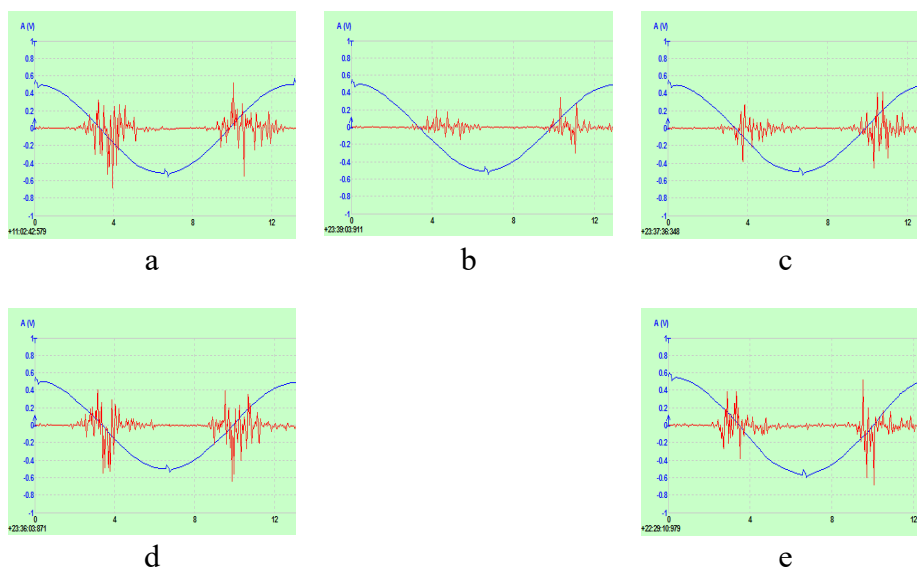
Някои от получените резултати са показани в Таблица 1 [1].

Pressure p, MPa	Estimated Hoop stress $\sigma_1$ , MPa	$\frac{\Delta f_{R1}}{f_{R01}}$ , %	Estimated axial stress $\sigma_2$ , MPa	$\frac{\Delta f_{R2}}{f_{R02}}$ , %
0	0	0	0	0
1.0	30	0.0320	15	0.0390
2.0	61	0.0820	30	0.0510
3.0	91	0.1000	45	0.0710
4.0	121	0.1400	61	0.0730
5.0	151	0.1500	76	0.0830
6.0	182	0.1650	91	0.0878
7.0	212	0.1900	106	0.0891

### 3. Изследване на възможностите на електромагнитен магнитношумов метод за контрол на качеството на термична обработка на стомани с приложение в транспорт, енергетика, машиностроене и др. отрасли с цел оценка на остатъчния технически ресурс на конструктивни елементи

В [2] се представят резултатите от изследване, проведено върху пробни тела от качествена термично обработена въглеродна стомана чрез метода на магнитния шум. Целта на работата беше да се намерят подходящи информативни параметри за идентифициране на получените структури с различна твърдост. За тази цел бяха приготвени образци чрез термична обработка при различни температури. След микроструктурен анализ и измерване на твърдостта, образците бяха изследвани с помощта на метод на магнитния шум. Сигналите бяха визуализирани и анализирани чрез цифров осцилоскоп и софтуерната програма Multi Instrument 3.8. Информационните параметри RMS и времето за регистриране на сигналите от магнитен шум бяха използвани за идентифициране на получените микроструктури с различни характеристики и твърдост.

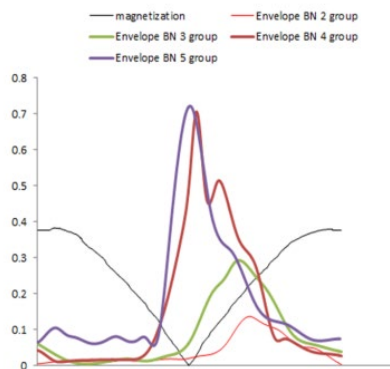
Фигура 2 показва част от записи, извършени по време на намагнитването на тестваните пробни тела и магнитните шумове, които се появяват при ток на намагнитване от 200 mA.



Фигура 2. Записи на магнитни шумове във времето, получени от тестваните групи проби при намагнитващ ток от 200 mA: група образци 1 (a), група 2 (b), група 3 (c), група 4 (d), група 5 (e).

Най-ниски RMS стойности имат образците, подложени на закаляване и нискотемпературно отвърщане, които имат микроструктура отвърнат мартензит. При останалите групи образци /3, 4, 5/ се наблюдава повишаване на RMS стойността, което може да се обясни с вида на получените микроструктури троостит и сорбит. След обработката на сигналите от магнитните шумове бяха определени обвивките на магнитните шумове и пиковите стойности [2].

Времето на поява на магнитен шум, определено от максималната стойност на обвивката на сигнала спрямо нулевата стойност на полето на намагнитване, се определя като параметър, който се използва за идентифициране на типа микроструктура. Фигура 3 показва обвивките на магнитните шумове от пробните тела. Има изместване на пиковите стойности при стойност на полето нула, както и разлики във формата на обвивката. В мартензитните структури пиковата стойност е малка и обвивката на магнитния шум е широка. При прехода от отвърнат мартензит с висока твърдост към троостит и сорбит с твърдост, близка до първоначалната, се наблюдава повишаване на пиковите стойности и изостряне на обвивката на магнитния шум при стойности на магнитното поле около нула.



**Фигура 3. Обвивки на магнитните шумове при ток на намагнитване  $I_n = 150$  mA, получени от тестваните групи образци с различна микроструктура**

Разликите в изместването във времето, както и във формата на магнитния шум могат да се обяснят с необратимото движение на доменните стени при преодоляване на препятствия, дължащи се на особеностите в различните микроструктури, т.е. микроструктурата на материала пряко влияе върху динамичното поведение на магнитните домени по време на намагнитване.

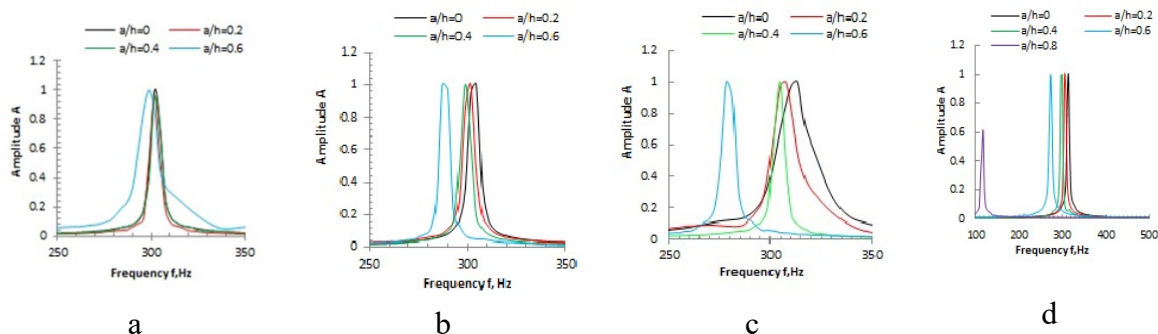
Чрез изследване на подходящо обработени образци от стомана с помощта на метода на магнитния шум бяха получени данни за серия от магнитошумови импулси като функция на времето и съответните стойности на магнитното поле. За характеризиране на шумовите сигнали бяха използвани различни параметри като RMS на шума, броя на магнитния шум за цикъл на намагнитване и т.н.

Беше установено [2], че времето на регистриране на шума, определено от нулевата точка на синусоидалната вълна на намагнитване до максималната стойност на обвивката на магнитния шум, е подходящ информативен параметър за анализ на микроструктури. След обработката на сигнала са определени стойностите на този параметър и е анализирано изменението му поради особеностите в микроструктурите, получени след термична обработка. Установени бяха линейни зависимости между RMS, времето на възникване на магнитния шум и твърдостта на структурите, получени след термична обработка [2].

#### 4. Експериментално изследване на композитни материали с полимерна матрица при наличие на дефекти от типа на пукнатини под действие на различни по характер натоварвания чрез модален анализ

В [3,4] са публикувани резултати от експериментални изследвания на композитни материали, тип стъклопласти с използване на вибрационен метод чрез импулсно възбуждане на свободни огъвачи [3] и надлъжни трептения [3,4]. От композитна плоча тип стъклопласт със съдържание на стъклени влакна е 50% бяха изрязани достатъчен брой образци тип греда с размери  $L=0,25\text{m}$  дължина,  $b=0,025\text{m}$  ширина и  $h=0,005\text{m}$  дебелина. За да се установи чувствителността на метода с импулсно възбуждане на трептения за откриване на дефекти, бяха симулирани дефекти от тип правоъгълен прорез на различни разстояния от ръба на образците ( $x_i$ ), а именно на  $0,1L$  и  $0,2L$ ,  $0,3L$  и  $0,5L$ . Прорезите са напречни, разположени перпендикулярно на подредените слоеве стъклопакет. Симулираните канали бяха с различна дълбочина, равна на  $0.2h$ ,  $0.4h$ ,  $0.6h$  и в някои случаи  $0.8h$ . Бяха направени и изследвани достатъчен брой проби, за да се изследва местоположението на изкуствените дефекти при фиксирана дълбочина на дефекта.

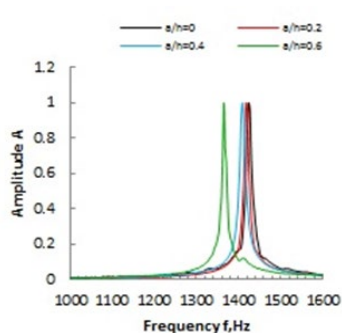
Целта на изследването беше да се изследва ефектът на пукнатините върху естествените честоти на възбудени огъвачи и надлъжни трептения на греди от стъклопласт. Първите собствени честоти на вибрации при огъване извън равнината и в равнината, както и надлъжните вибрации са използвани за характеризирание на единична греда с дефекти. Изследвано е и влиянието на местоположението и дълбочината на изкуствените пукнатини.



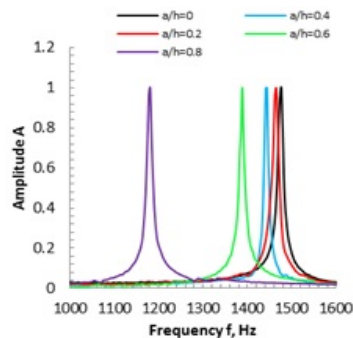
**Фигура 4. Първа собствена честота на изпитване на вибрации при огъване за здрави греди и повредени греди а) прорези, разположени при  $x=0,1L$  с различни дълбочини  $a=0,2h$ ,  $a=0,4h$ ,  $a=0,6h$ ; б) прорези, разположени при  $x=0,2L$  с дълбочини  $a=0,2h$ ,  $a=0,4h$  и  $a=0,6h$ . в) прорези, разположени при  $x=0,3L$  и дълбочини  $a=0,2h$ ;  $a=0,4h$ ;  $a=0,6h$ , д) прорези, разположени при  $x=0,5L$  с дълбочини  $a=0,2h$ ;  $a=0,4h$  и  $a=0,6h$ .**

Най-значимите промени в първата резонансна честота се получават при пукнатина в средата на композитните греди. При дълбочина на пукнатината  $3\text{ mm}$  честотното изместване достига 14%. Допълнително е изследвана греда с дълбочина  $a=0,8h$ . Резултатите показват относителна промяна от около 64%.

Резултатите от експериментите при огъвачи трептения в равнината на огъване са показани на фигура 5, където са дадени честотните характеристики за греди с изкуствени дефекти на разстояния  $x=0,3L$  и  $x=0,5L$ . Относителното изместване на първата резонансна честота не се забелязва при местоположението на дефект  $x/L=0,1$ . С увеличаването на параметъра  $x/L$  честотата намалява и достига 6% за най-дълбоката пукнатина.



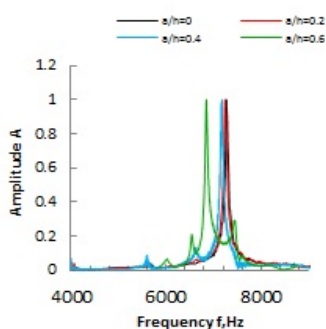
a



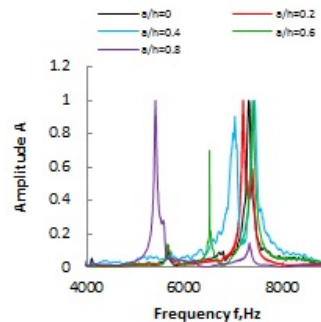
b

**Фигура 5. Първа резонансна честота за вибрации при огъване в равнината а) местоположение на дефекта  $x/L=0,3$ , дълбочина на дефекта  $a/h = 0,2, 0,4$  и  $0,6$ ; б) местоположение на дефекта  $x/L=0,5$  и дълбочини  $a/h = 0,2; 0,4; 0,6$  и  $0,8$ .**

Резултатите от изпитванията на режим на надлъжни трептения са показани на фигура 6. Промените в честотите при пукнатина, разположена в средата на образци достига от 11% до 26%. Ако се оцени енергията на импулсния удар, може да се заключи, че при такава малка импулсна енергия напреженията и деформациите са много малки. Поради тази причина се регистрира значително намаляване на резонансната честота, когато дебелината на материала на мястото на дефекта е поне 5 пъти по-малка от дебелината на образца.



a



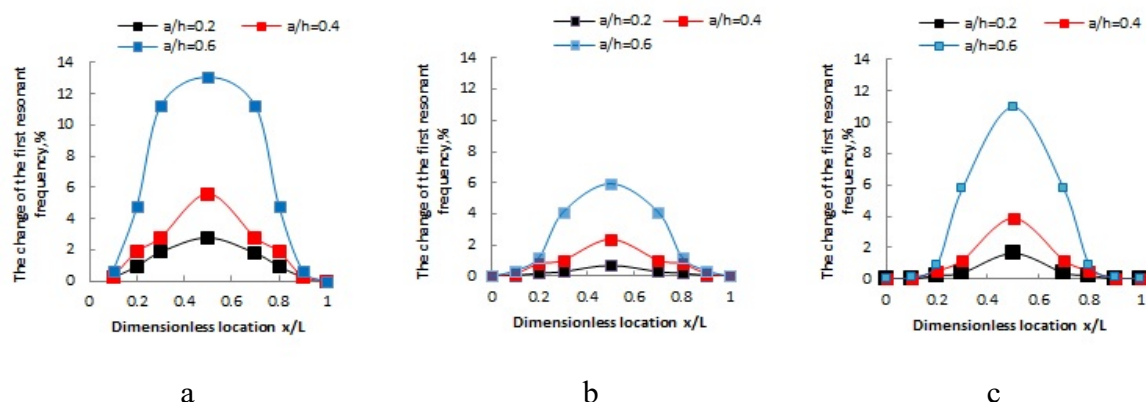
b

**Фигура 6. Първи резонансни честоти на надлъжни тестове а)  $x/L=0,3$  и дълбочини на дефекти  $a=0,2h; a=0,4h$  и  $a=0,6h$  б)  $x/L=0,5$  и дълбочини на дефекта  $a=0,2h; a=0,4h; a=0,6h$  и  $a=0,8h$ .**

Ефектът на пукнатината върху резонансната честота се проявява различно в режимите на трептене и зависи от закрепването на гредата, както и от формата, местоположението и дълбочината на пукнатината. За напречни пукнатини увеличаването на дълбочината на пукнатината води до намаляване на честотата. Пукнатина с определена дълбочина и ширина предизвиква различни честотни промени в експерименталните режими на вибрации, в зависимост от местоположението на пукнатината.

Фигура 7 представя влиянието на положението и дълбочината на дефекта тип пукнатина върху резонансната честота при огъващи и надлъжни трептения. Максимално отместване в резонансната честота се получава при най-дълбоката пукнатина ( $a=0,6h$ ),

разположена на разстояние  $x=0,5L$ . Изместването на честотата е съответно 13%, 6% и 11% за огъващи трептения извън равнината, в равнината и за надлъжни трептения.



Фигура 7. Ефект от местоположението на дефекта върху честотното изместване а) огъване извън равнината; б) огъване в равнина; в) надлъжни трептения

Беше установено, че има определени места, където увреждането, т.е. пукнатината почти не променя честотата и те са близо до възловите линии на закрепване на гредата [4]. Ако пукнатината е разположена на места, където кривината на модалната форма има максимални стойности, се получават най-големите промени в честотата. Най-добра чувствителност за откриване на пукнатини се получава при изпитванията, когато пукнатината е в средата на гредата с трептения на огъване извън равнината [4].

Приносът на изследването [3,4] е, че е направено ново системно експериментално изследване на устойчивостта на повреди на широко използвани композитни материали с използване на комбинация от огъващи и надлъжни трептения.

### Благодарности:

Настоящата разработка се осъществява с финансовата подкрепа на договор Проект № BG05M20P001-1.002-0011 „Изграждане и развитие на Център за компетентност по мехатроника и чисти технологии MIRACle (mechatronics, innovation, robotics, automation, clean technologies)“, финансиран от Оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж“, съфинансиран от Европейския фонд за регионално развитие (ЕФРР).

### Литература

1. Y. Ivanova, Study of Mechanical Stresses in Thin-Walled Pressure Vessels Using Ultrasonic Methods, *Materials Research*. 2022; 25:e20210495.
2. Y. Ivanova, Investigation of Heat-Treated Steels Using the Magnetic Noise Method, *Machines. Technologies. Materials.*, Vol. 16 (2022), Issue 4, pg(s) 138-141.
3. Y. Ivanova, Defect detection by frequency analysis of flexural vibrations of free-free composite beam, *Industry 4.0*, Vol. 7 (2022), Issue 6, pg(s) 219-221.
4. Y. Ivanova, Damage Detection in Free-Free Glass Fiber Fabric Composite Beams by measuring Flexural and Longitudinal Vibrations”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 10685–10690, Jun. 2023.



## Determining the Simultaneous Influence of Several Factors on Abrasive Wear after Layer Welding

Daniela SPASOVA

Technical University of Varna, Varna, Bulgaria,  
e-mail: [danielats@tu-varna.bg](mailto:danielats@tu-varna.bg)

### Abstract

Welding with wear-resistant electrodes is a commonly used method that is used in the restoration of parts operating in contact friction conditions. Steel 40X, one of the commonly used structural steels, is medium- carbon, low-alloy steel and with low wear resistance. Its wear resistance can be increased by welding the contact surface with wear-resistant electrodes. In the present paper, 5 types of samples were investigated, 4 of them were welded with wear-resistant electrodes (EH550; Abradur 64; Abradur 66; OK Weartrode 60T;), and the fifth sample is a comparison sample made of 40X steel. Tribological studies of the welded samples were carried out in dry friction mode and the influence of the carbon equivalent and the chromium equivalent on the hardness and dimensional stability (change in mass of the specimen) of the welded surfaces was investigated. Macrohardness was measured along the depth of the welded layer and a metallographic structural analysis was carried out.

**Keywords:** tribology, welded layers, wear resistance, phase composition.

## Определяне на едновременното влияние на няколко фактора върху абразивното износване след наваряване

Даниела СПАСОВА

### 1. Увод

Абразивното износване е механизъм на износване, който води до разрушаване на повърхностните слоеве на материала, вследствие триене на твърди частици върху контактната повърхност на материала. Когато твърда повърхност или частици взаимодействат или се плъзгат върху по-мека повърхност, причиняват загуба на материал. Това е вид износване, което възниква поради натоварването на твърди частици върху повърхността на материала, който има твърдост, равна или по-малка в сравнение с натоварващите частици [1]. Практически износването е резултат от взаимодействието на работното тяло на машината или конструкцията със съответната част или с обработваната среда. При износването протичат редица механични, химични и структурни процеси в триещите се части [2]. Големината на износване, в зависимост от състоянието на материала, може да се изрази в загубата на материала, в неговата деформация, в изменение на свойствата му и в пренасянето на материал между контактуващите тела [3, 4].

Наваряването с износоустойчиви електроди е сполучлив, често използван метод, който се използва при възстановяване на детайли, работещи в екстремални условия на контактни взаимодействия, каквито са експлоатационните условия на земеделската и строително-пътна техника – висока запрашеност с абразивни микрочастици, наличие на

влага и агресивни компоненти. Сплавта от наваряващите електроди се отлага равномерно върху повърхността на меки материали (обикновено ниско или средно въглеродни стомани) чрез наваряване, с цел увеличаване на твърдостта и устойчивостта на износване, без значителна загуба на пластичността и издръжливостта на основния материал [5].

Един от най-важните параметри, при абразивното износване е химичния състав на наварения материал, определящ структурата и свойствата на наварения слой. Това обстоятелство наложи и идеята на настоящите изследвания, а именно да се изследва влиянието на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху твърдостта и износоустойчивостта (износената маса), след наваряване на стомана 40X с различни видове електроди (EH550; Abradur 64; Abradur 66; OK Weartrode 60T;)

## 2. Експериментална част

Изследвани са 5 вида образци, като 4 от тях са наварени ръчно електродъгово с износоустойчиви електроди, а петия образец е еталонен образец, изработен от нисколегирана стомана 40X, който се използва за базов при сравнителните изследвания. Образците са предварително подгряти, след което са многослойно наварени [6].

Проведени са трибологични изследвания на наварените образци, в режим на сухо триене, осъществени по кинематична схема – челно триене между неподвижен цилиндричен образец и въртящ се диск. За изпълнение целите на изследването е измерена макротвърдост на образците (по метода на Викерс) по дълбочина на наварения слой, с натоварване 5 kg, съгласно БДС EN-ISO 6507-2006) и е проведен металографски структурен анализ.

### 2.1 Химичен състав на използваните материали и параметри при режима на наваряване

В табл. 1 е даден химичния състав на електродната тел на електродите за наваряване, както и параметрите на използваните режими на наваряване, а в табл. 2 е даден химичния състав на основния материал- стомана 40X.

Таблица 1. Химичен състав на електродната тел на електродите за наваряване и параметрит на използваните режими на наваряване

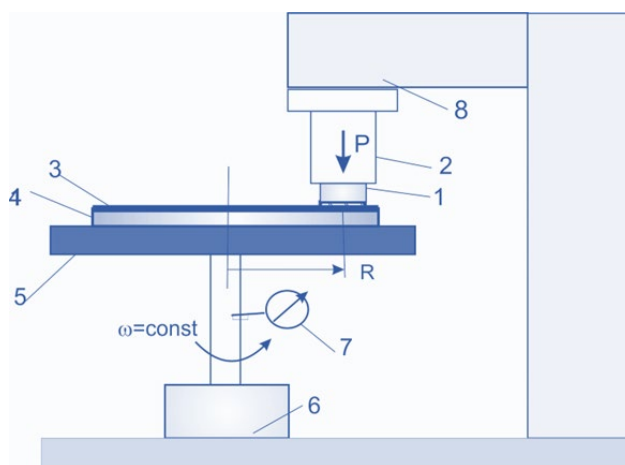
Марка	Химичен състав				D на електрода, mm	I, A (1 слой)	I, A (2 слой)	
	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %				
EH 550 / E Fe8/	0.5	2.4	0.4	9.0	3.2	140	170	
OK Weartrode 60T / E ZFe14/	4.8	0.7	1.0	34.3	3.2	115	160	
Марка	Химичен състав					D на електрода, mm	I, A (1 слой)	I, A (2 слой)
	C, %	Mo, %	Nb, %	Cr, %	W, %			
Abradur 66 /E Fe 16/	6.0	6.0	6.0	22.0	2.0	3.2	100	120
Abradur 64 E Fe 15/	6.0	-	7.5	26.0	-	3.2	110	140

Таблица 2. Химичен състав на стомана 40X

Марка	Химичен състав					
	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	V, %
40X	0,36-0,44	0,2-0,4	0,5-0,8	0,8-1,1	-	-

## 2.2 Методика за изпитване на абразивно износване в режим на сухо триене

Провеждането на изследванията, осигуряващи условия на изпитване максимално близки до реалните се осъществява на лабораторен стенд (триботестер) показан на фиг. 1. Абразивното износване на образците се изследва в условия на сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици. Изследваният цилиндричен образец 1 се закрепва неподвижно в леглото на държач 2 в натоварващата глава 8, така че челната повърхнина на образца да контактува с абразивната повърхнина 3, захваната неподвижно за диск 4. Дискът 4 се задвижва от електродвигател 6 и се върти вертикално около оста си с ъглова скорост  $\omega = const$ . Образца се притиска с натоварваща сила  $P$ , осигурявана с тежести с помощта на лостова система в центъра на контактната площадка. С оборотомера 7, чрез броя обороти (цикли), се задава пътят на триене [6].



Фигура 1. Триботестер за изследване на износването при сухо триене

Скоростта на плъзгане може да се регулира чрез изменение на ъгловата скорост на диска от управляващ блок, както и чрез променяне на разстоянието между оста на въртене на диска 4 и оста на образца 1. Абразивната повърхнина 3 на диск 4 се състои от импрегниран корунд (P) с твърдост 9.0 по скалата на Моос.

Основният показател на трибологичното изследване се състои в измерване на износването на масата ( $\Delta m$ ) на всеки образец за определен път на триене  $L$  (брой цикли на триене) и изчисляване на интензивността на износване  $V$  по формула (1)-

$$V = \frac{\Delta m}{L} \quad [\text{g/m}] \quad (1)$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad [\text{g}], \quad (2)$$

където:  $m_1$  – маса на образеца в началото на изпитването, g;  $m_2$  – маса на образеца в края на изпитването, g;

$$L = \pi D \omega t [m], \quad (3)$$

където:  $D$  – диаметър на диска, mm;  $\omega$  – брой обороти на фрикционния диск за минута;  $t$  – общо време за изпитване, min. Износоустойчивостта  $E$  е реципрочна стойност на интензивността на износване  $V$  (4):

$$E = \frac{1}{V} \quad (4)$$

Всички изпитвания са проведени при еднакви условия на абразивно износване, параметрите на които са дадени в табл. 3.

**Таблица 3. Параметри на изпитване при абразивно износване**

Нормално натоварване	$P = 10,8 \text{ [N]}$
Номинална контактна площ	$A_a = 225 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$
Номинално контактено налягане	$P_a = 4,8 \text{ [N/cm}^2\text{]}$
Средна скорост на плъзгане	$V = 0,155 \text{ [m/s]}$
Абразивна повърхнина	Корунд Р 120
Път на триене	465 m

## 2.3 Фактори, влияещи на абразивното износване

### 2.3.1 Въглероден еквивалент

Условен фактор, който отчита степента на влияние на съдържанието на въглерод и основни легиращи елементи, върху характеристиките на шева, е Въглеродният еквивалент. Той е определен по следната формула (5) [7, 8]:

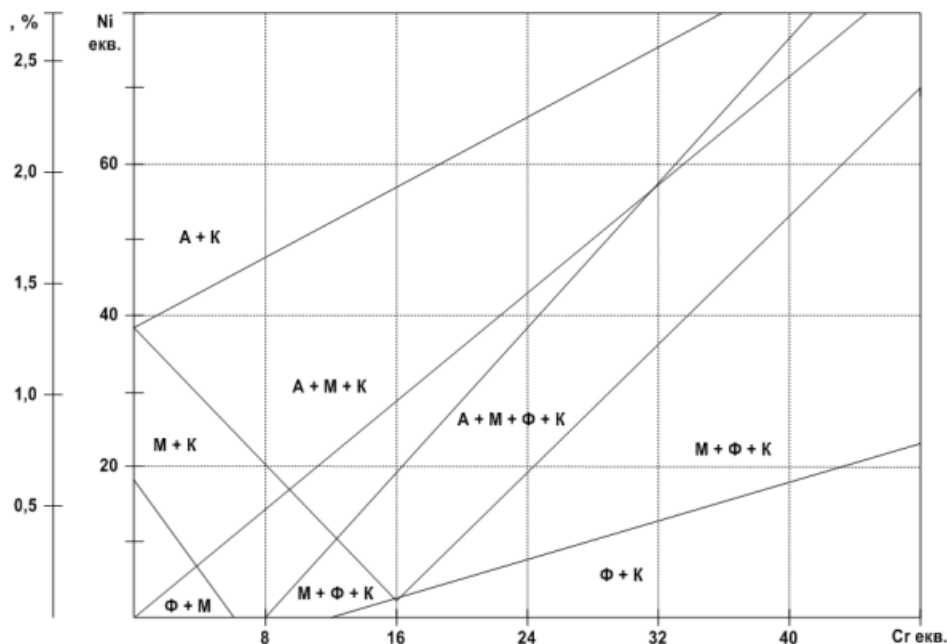
$$C_{eq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (5)$$

### 2.3.2 Хромов еквивалент

Най-добра устойчивост на абразивно износване се наблюдава при материали богати на карбиди, като определящ химичен елемент е хрома. Връзката между структурата и химическият състав, определен на базата на хромовия еквивалент се изразява чрез диаграмата на Елагина и Попов (фиг. 2). Диаграмата отчита влиянието на най-често използваните карбидообразуващи елементи (V, W, и Ti) в материалите на електродите за наваряване [7].

Хромовият еквивалент се изчислява по следната формула (6) [7, 8]:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 0.75\%W + 5\%V + 1.75\%Nb + 1.5\%Si \quad (6)$$



Фигура 2. Диаграма на Елагина и Попов (А-аустенит, Ф-ферит, М-мартензит, К-карбиди)

#### 2.4. Визуализиране на едновременното влияние на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху износената маса в режим сухо триене

Използвана е софтуерна програма на програмен език Delphi, адаптирана за конкретните условия, която интерполира и визуализира:

- износената маса в зависимост от въглеродния еквивалент и твърдостта на материала.
- износената маса в зависимост от хромовия еквивалент и твърдостта на материала.

Като входящи данни са използвани следните параметри:

- динамиката на износване;
- средната стойност на отчетената твърдост по дълбочина на наварения слой;
- изчисления въглероден еквивалент в различните материали;
- изчисления хромов еквивалент в различните материали;

### 3. Резултати и анализи

#### 3.1 Резултати и анализи след проведеното абразивно износване в режим на сухо

След проведените изпитвания и изчисления, описани по методиките в т. 2, са обобщени всички получени резултати, като са определени техните средни стойности, които са дадени в табл. 4. От получените резултати се вижда, че при конкретните условия на износване – сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици, най-висока износоустойчивост се получава при образец 4, при който основния материал е наварен с електрод „Abradur 66“, който е комплексно легиран, с висока твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидни включвания. При този образец е измерена и многократно по-висока твърдост от тази на еталонния образец 1 (стомана 40Х). С по-ниска стойност на износоустойчивост и съответно измерена твърдост е образец 3 (наварен с електрод „Abradur 64“), което показва, че с повишаване

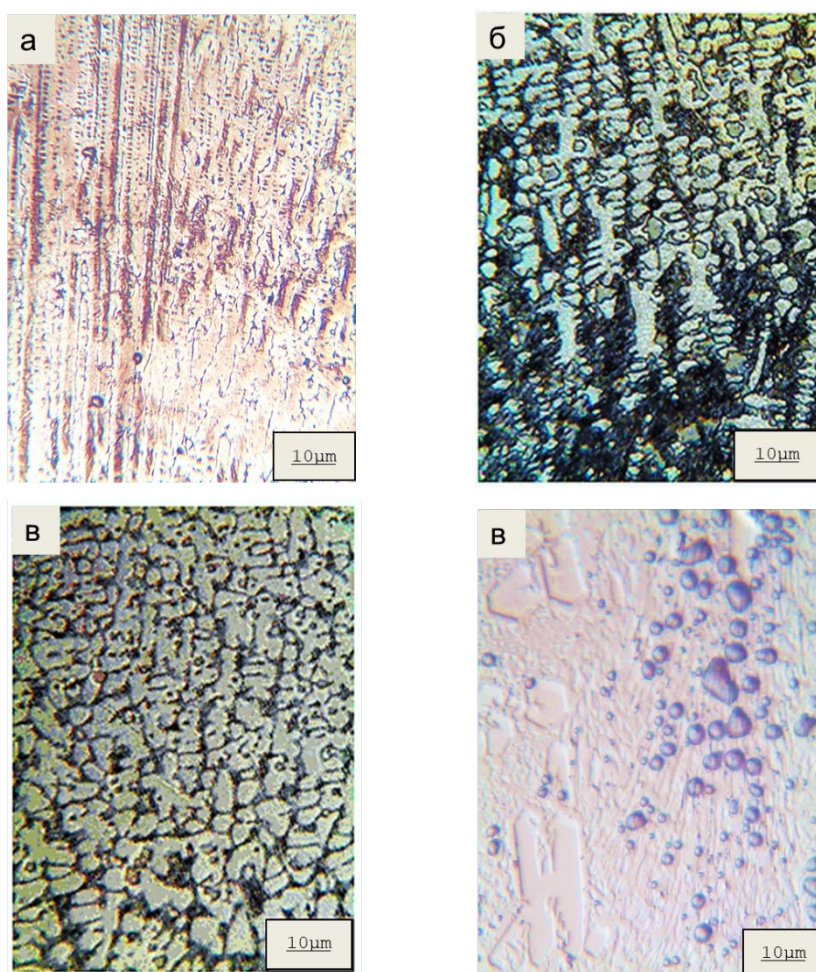
на твърдостта на наварения слой, се повишава износоустойчивостта. Това твърдение се оказва не особено достоверно, т.к. при достигане на стойности на твърдост над 700HV (образец 5, наварен с електрод „Ok Weartrode 60T“), се наблюдава повишаване на износената маса, съответно намаляване на износоустойчивостта. Този факт най-вероятно се дължи на отронване на частици от повърхността на материала (поради високата твърдост, водеща до крехкост), които попадат между абразивния диск и образеца, при което процеса от абразивното износване на две тела преминава в абразивно износване на три тела. При абразивно износване с три тела, степента на износване се увеличава с увеличаване на диаметъра на абразивните частици, което води до намаляване на износоустойчивостта.

Таблица 3. Параметри на износване при режим на сухо триене

Образец №	Вид (материал)	Твърдост HV	Въглероден еквивалент C eq	Хромов еквивалент Cr eq	Износена маса $\Delta m$ , g	Износоустойчивост E
1	Еталонен образец-стомана 40X	345	0.8	1.5	0.5	995
2	Образец наварен с EN 550	475	2.37	12.6	0.0705	6 667
3	Образец наварен с Abradur 64	526	11.2	39	0.0087	53 476
4	Образец наварен с Abradur 66	695	11.6	40	0.0037	125 628
5	Образец наварен с Ok Weartrode 60T	725	11.83	36.4	0.0385	12 150

### 3.2 Резултати и анализи от проведения микроструктурен анализ

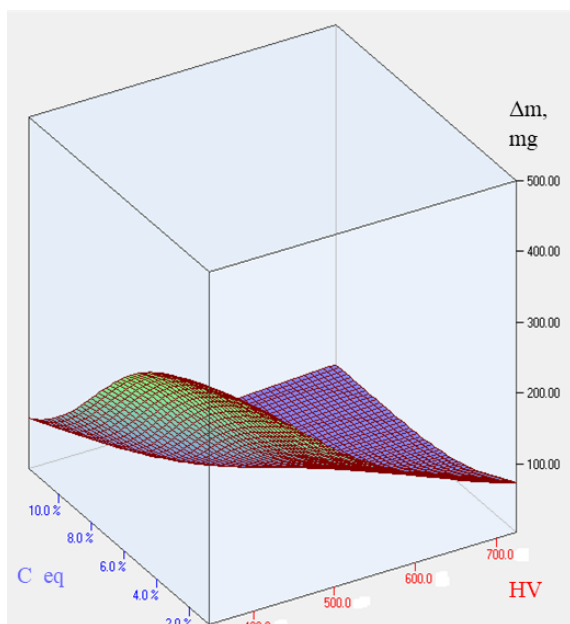
Проведеният микроструктурен анализ допълнително визуализира получените резултати. На фиг. 3 са дадени микроструктури на наварените образци в зоната на наварения слой. При образец 2, наварен с електрод EN 550 (Фиг 3, а) се наблюдават дендритни кристали с образуван мартензит по техните граници, както и неравномерно разпределение на въглерода и хрома в тях, което води и до по-ниските стойности на измераната твърдост, съответно и занижената износоустойчивост. При останалите образци микроструктурата на наварените слоеве е изградена от силно изразена дендритна структура с аустенитно-мартензитна матрица и първични хромови карбиди, формирани в процеса на кристализация. Според химичния състав, определен от високото съдържание на въглерод и хром, може да се предположи, че хромовите карбиди са от типа  $(Cr,Fe)_7C_3$  [9]. Те са определящи за високата твърдост и по добрата износоустойчивост на образците. При образец 4, наварен с Abradur 66 (фиг 3, в), се наблюдава равномерно разпределение на фини дисперсни карбиди в аустенитно-мартензитната матрица, което обяснява и резултатите за получена най-висока износоустойчивост.



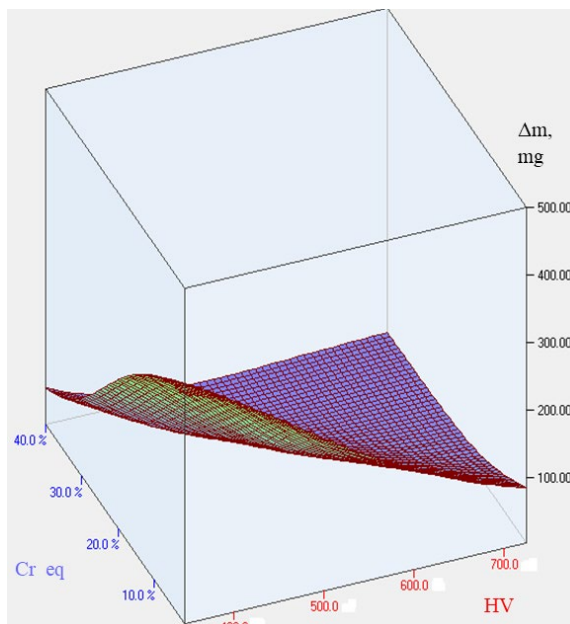
Фигура 3. Микроструктура на наварените слоеве: а- образец 2, наварен с ЕН 550 х250; б- образец 3, наварен с Abradur 64 х400; в- образец 4, наварен с Abradur 66 х400; г- образец 5, наварен с Ok Weartrode 60Т х500

### ***3.3 Резултати от визуализирането на едновременното влияние на въглеродния еквивалент и хромовия еквивалент върху износената маса в режим сухо триене***

След генериране на отделните файлове с въведените входящи данни, на база проведените изследвания, са получени пространствени графичните зависимости между отделните параметри в режим на сухо триене, показани на фиг. 4 и фиг. 5. От представената графична зависимост на фиг. 4 може да се определи степента на влияние на твърдостта (HV) и въглеродния еквивалент (C eq) върху износената маса ( $\Delta m$ ), определяща износоустойчивостта на материалите. А от графичната зависимост на фиг. 5 може да се определи степента на влияние на твърдостта (HV) и хромовия еквивалент (Cr eq) върху износената маса ( $\Delta m$ ), определяща износоустойчивостта на материалите.



Фигура 4. Зависимост между HV, Cr eq и износена маса



Фигура 5. Зависимост между HV, C eq и износена маса

### 3. Изводи

След проведените изследвания се установи, че наваряването с абразивно износоустойчиви електроди значително повишава износоустойчивостта в режим на сухо триене. Най-висока износоустойчивост се получава при наваряване на основния материал с електрод „Abradur 66“, който е комплексно легиран, с висока твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидни включвания, а най-ниска износоустойчивост се наблюдава при наваряване с електрод „EH 550“, което се дължи на по-ниското хромово и въглеродно съдържание. Също така се установи, че не винаги високата твърдост води до висока износоустойчивост. Материалите с висока твърдост са крехки и създават предпоставка за изронване на частици, които водят до преминаване в режим на абразивно износване на три тела, и съответно до намаляване на износоустойчивостта.

От интерполираните пространствени графичните зависимости, между отделните параметри в режим на сухо триене, може да се направи извод, че износената маса спада значително при стойност на хромовия еквивалент над 10% и твърдост над 500 HV, както и при стойност на въглеродния еквивалент над 4% и твърдост над 450 HV.

### Литература

1. Mahadeshwara, Manoj Rajankunte. Abrasive Wear. <https://www.tribonet.org/wiki/abrasive-wear/?amp=1>
2. Кандева-Иванова М., Цикъл лекции по инженерна трибология, ПРОЕКТ BG051PO001-3.3.06-0046 „Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени в областта на виртуалното инженерство и индустриалните технологии“.
3. Kanjilal P., T.K. Pal, S.K. Majumdar. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal. Journal of Materials Processing Technology, Volume 171, Issue 2, 20 January 2006, Pages 223-231.
4. Горкунов. Д.Н., Триботехника, Москва „Машиностроене“, 1989.

5. Buchely, M. F., et al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *wear*, 2005, 259.1-6: pp 52-61.
6. Yankova R., Spasova, D., Petrov P., „Abrasion of welded layers in dry friction“, „Научни известия“, Година XXV/ Брой 1 (216), J 2017, с. 258-261.
7. Тончев Н., Лазарова Р., Кандева М., Христов Н., „Металографски и механични изследвания на наварени слоеве със специфични свойства“, *Journal of Fundamental Sciences and Applications*, Vol. 15, 2009, с. 92 – 99.
8. Tonchev, N., Kandeва, M., & Hristov, N. Методика за определяне параметрите на качеството на композитни покрития при наваряване на ротационни повърхнини. *Scientific Proceedings VIII International Congress “Machines, Technologies, Materials” 2011, Volume 1, p.p. 141-144.*
9. Konyaeva, M. A., Medvedeva, N. I. (2009). Electronic structure, magnetic properties, and stability of the binary and ternary carbides (Fe, Cr) 3 C and (Fe, Cr) 7 C 3. *Physics of the Solid State*, 51, 2084-2089.



## Experimental Determination of the Static Characteristic of the Arc

Deyan GRADINAROV, Yuri BIJEV

Institute of Metal Science, Equipment and Technology with Hydroaerodynamic Center  
at Bulgarian Academy of Sciences, 67 Shipchenski Prohod Street, 1574 Sofia, Bulgaria  
e-mail: [dgradinarov@ims.bas.bg](mailto:dgradinarov@ims.bas.bg), [bijevu@abv.bg](mailto:bijevu@abv.bg)

### Abstract

In the conditions of TIG welding, to determine the arc voltage at a set welding current, it is necessary to know the static characteristics of the welding arc. In the proposed study, the static characteristics of the welding arc in the TIG process are with different electrodes and determined experimentally. This dependence facilitates the use of methods for simulation modeling of welding processes, and the numerical results are processed and regression dependences are obtained.

**Keywords:** TIG welding, Static characteristic of welding arc

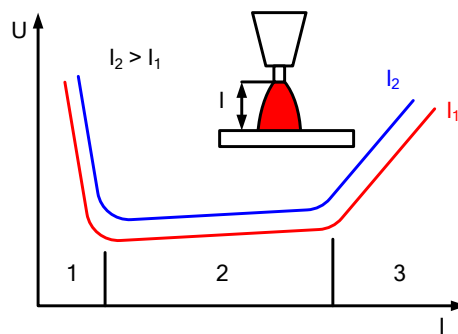
## Експериментално определяне на статични характеристики на дъгата

Деян ГРАДИНАРОВ, Юри БИЖЕВ

### 1. Увод

Процесът на заваряване се използва в почти всяка област на човешката дейност, като непрекъснато се повишава нуждата от продуктите на заваръчните процеси. С повишаване на отговорността на заварените детайли се повишава и изискването към качеството на заваряване. Въпреки технологичните и физичните различия между различните заваръчни процеси и заваръчните им параметри, параметрите, които дават основната информация за протичащия заваръчен процес са заваръчните ток и напрежение, както и време на заваряване и почивка. Заваръчната дъга е форма на газов разряд с ниска степен на йонизация. Напрежението на дъгата има пет компонента – катодна зона, зона на катоден пад, плазма, зона на аноден пад и анодна зона. Статичната характеристика на дъгата е зависимостта на напрежението на дъгата спрямо големината на тока в установен режим при непроменени условия на съществуване на дъговия разряд. Съпротивлението на дъгата (и съответно падът на напрежение) се изменя в зависимост от температурата [1÷4], степента на йонизация, плътността на тока и др. Поради тази причина то не е постоянна величина. По този начин законът на Ом не се прилага за заваръчната дъга. На фиг.1 са показани статичните характеристики на дъгата. При нисък ток [2] (област 1 на дъгата), когато токът се увеличава, напрежението на дъгата намалява. Това се дължи на интензивното увеличаване на броя на заредените частици в дъгата в резултат на увеличаване на излъчвателната способност на катода с повишаване на температурата му (уравнение на Ричардсън). Във втората зона на дъгата характеристиката е почти хоризонтална, което се обяснява от една страна със затрудненото протичане на йонизационните процеси в дъговия стълб, а от друга със забавянето на нарастването на емисията на електрони [5÷7]. В третата област на дъгата тези процеси са толкова затруднени, че характеристиката на дъгата става нарастваща – повишаването на температурите не е достатъчно, за да компенсира свиването на дъгата от нейното собствено магнитно поле. В тази част от характеристиката на дъгата се

прилага законът на Ом. С увеличаване на дължината на дъгата напрежението, необходимо за постигане на даден ток, се увеличава.



Фигура 1. Статични характеристики на заваръчната дъга

Работата на източници на заваръчен ток, изпълняващи различни технологични процеси, се основава главно на познаването на статичните характеристики на дъгата. При РЕДЗ, ВИГ и подфлюсово заваряване с ниска плътност на тока, заваряването се извършва във втората зона на дъговата характеристика с вертикална или рязко падаща статична външна характеристика на източника на ток – големината на тока се стабилизира. МИГ/МАГ и подфлюсово заваряване с висока плътност на тока работят в третата област на характеристиката на дъгата с твърда (леко спадаща) характеристика на източника на ток и използване на процеса на саморегулиране на дъгата.

В настоящата публикация е направен преглед на експерименталното конструиране на статичната характеристика на дъгата при ВИГ заваръчния процес.

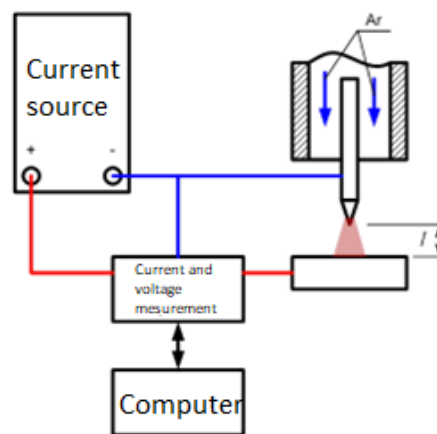
## 2. Експериментална постановка

За целите на това изследване бяха проведени експерименти в съответствие със класическата схема [8,9], Използваният източник на заваръчен ток предназначен за ВИГ заваряване, с възможност за настройка на големината на тока със стъпка 1 [A]. По време на процеса се визуализират стойностите на заваръчния ток и напрежението. След изключване на източника на захранване показаните стойности се запаметяват. В допълнение, токоизточникът осигурява плавно увеличаване на тока при запалване на дъгата и плавно намаляване при прекратяване на процеса. Максималният заваръчен ток на захранващия източник е 200[A]. Заваръчната горелка беше поставена неподвижно и дължината на дъгата  $l = 2,4$  [mm] беше една и съща при всички проведени експерименти. Дъгата се запалва върху плоча с размери  $6 \times 350 \times 120$  [mm]. Защитният газ (Ar) има дебит 15 [l/min]. По време на процеса на изгаряне на дъгата, моментните стойности на тока и напрежението се записват с помощта на монитор за заваръчен процес Arc Tracker. Данните се предават и записват в реално време на преносим компютър, на който е инсталиран софтуерът Power Wave Manager. Този софтуер позволява параметрите на заваряване да се наблюдават и съхраняват в реално време. Данните се предават в реално време и по интернет чрез софтуерния продукт Team Viewer до отдалечен компютър, където се визуализират и съхраняват. Използваните електроди са посочени в таблица 1. Ъгълът на заточване на електродите е  $15^\circ$ .

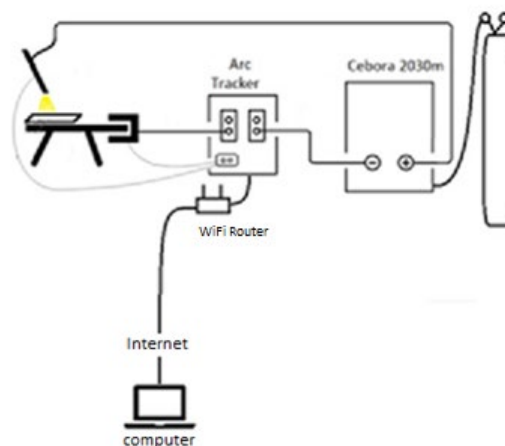
Таблица 1. Използвани електроди

№	d, mm	Състав	Цвят
1	2.4	W+1.4±1.6% La	Gold
2	2.4	100% W	Green

Експериментите бяха проведени както следва. Големината на тока се задава, като в диапазона от 20 до 100[A] изменението е на 5[A] стъпки, а в диапазона от 100 до 200[A] – на 10[A] стъпки. Започва запис на стойностите на тока и напрежението на дъгата. Заваръчната дъга се запалва. След преминаване към установения режим на работа се отчитат стойностите на източника на ток. Продължителността на горене на дъгата за един запис е  $8 \div 20$ [s]. След изключване на дъгата и прекратяване на процеса, записът на данни се спира (автоматично). Процедурата се повтаря за зададените токове с четирите различни електрода. Никой друг параметър не се променя по време на експеримента (напрежението на дъгата се променя от източника на ток, за да се постигне зададеният ток). Паузата между отделните експерименти е такава, че продължителността на запалената дъга да не надвишава 35%.



Фигура 2. Схема за провеждане на експеримента



Фигура 3. Опитна постановка.

### 3. Получени резултати

От заснетите параметри са направени графики на зависимостта на заваръчното напрежение и ток от времето (в таблица 2 са показани резултати за електрод №1 и електрод №2). Времевият интервал на установен процес се определя от тези графики. В рамките на този интервал от време се определят средните стойности на тока и напрежението на дъгата. Получените резултати са показани в Таблица 3.

Таблица 2. Примерни записи на записаните заваръчни напрежения и токове

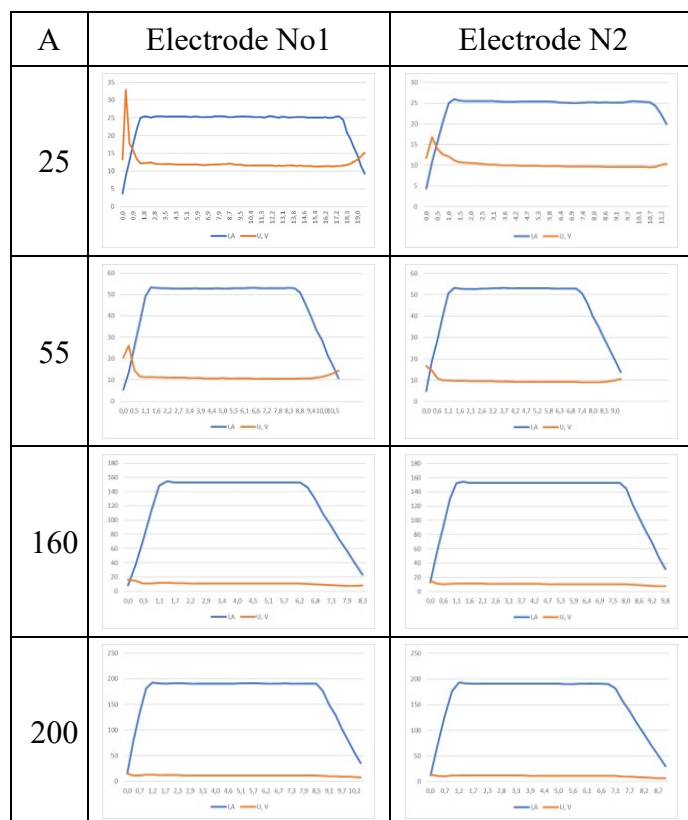


Таблица 3. Експериментални резултати за електрод №1 и електрод №2

Електрод 1					Електрод 2				
Заваръчен ток, А			Заваръчно напрежение, V		Заваръчен ток, А			Заваръчно напрежение, V	
Set	Delivered	Measured	Delivered	Measured	Set	Delivered	Measured	Delivered	Measured
20	21	20.1	12.5	11.8	20	21	20.9	10.4	10.3
25	25	25.2	11.45	11.7	25	25	25.3	9.8	10
30	30	30.3	11.25	11.6	30	30	30.5	9.7	9.7
35	35	34.9	11.45	11.6	35	35	34.7	9.7	9.5
40	39	39.4	11.2	11.3	40	39	39	9.4	9.2
45	44	44.0	10.5	10.6	45	44	44.3	9.3	9.3
50	49	48.5	10.4	10.5	50	49	48.6	9.4	9.3
55	54	52.9	10.6	10.4	55	53	53	9.4	9.3
60	58	58.1	10.5	10.2	60	58	58.1	9.4	9.2
65	62	62.3	10.5	10.2	65	62	62.5	9.2	9.2
70	68	67.7	10.5	10.1	70	67	67	9.2	9.1
75	72	72.7	10.45	10	75	72	72.3	9.1	9.2
80	77	76.7	10.3	9.9	80	55	76.7	9.1	9.2
85	82	80.8	10.4	9.8	85	81	81.1	9.1	9.3

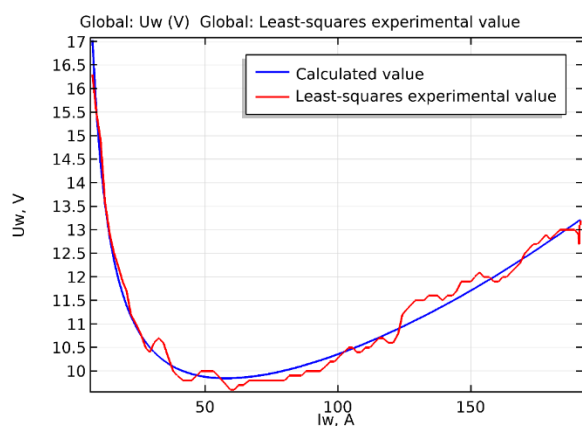
90	86	86.1	10.4	9.9	90	86	86.3	9.1	9.3
95	92	90.8	10.3	9.8	95	90	90.4	9.1	9.3
100	97	96.5	10.25	9.8	100	96	95.6	9.4	9.5
110	106	104.9	9.7	9.9	110	106	105.6	9.5	9.7
120	115	115.1	10.0	10.1	120	115	115.4	10.0	10.1
130	125	124.9	10.25	10.2	130	125	124.9	10.4	10.3
140	134	133.6	10.3	10.4	140	134	133.8	10.5	10.4
150	143	143.1	10.7	10.7	150	143	143.2	10.5	10.5
160	153	152.9	11.1	11.1	160	153	152.7	10.7	10.7
170	162	161.8	11.15	11.1	170	162	161.6	11.1	11.2
180	172	171.3	11.2	11.2	180	171	171.4	11.3	11.4
190	181	181.1	11.6	11.5	190	181	181.1	11.4	11.5
200	191	190.8	11.5	11.6	200	191	190.8	11.7	11.6

Статичните характеристики за използваните електроди са изградени на базата на получените данни от експерименталния процес. Експерименталните данни за статичните характеристики на заваръчната дъга са обработени по метода на най-малките квадрати и са получени съответните регресионни уравнения. Използваният тип уравнение е:

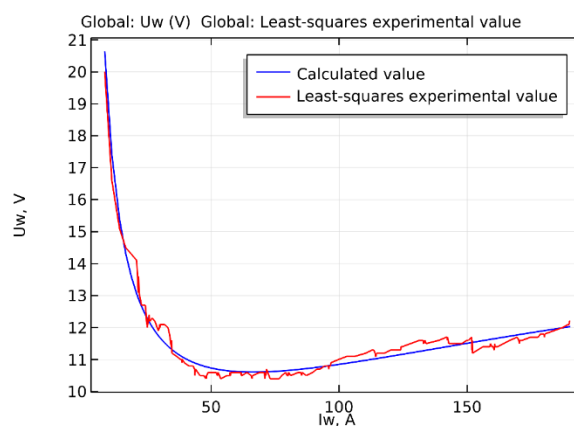
$$U_w = \frac{B}{I_w} + C_0 + C_1 I_w + C_2 I_w^2 \quad (1)$$

Резултатите са илюстрирани на Фигури 3-6. Тази зависимост улеснява използването на методи за симулационно моделиране на заваръчни процеси.. Тези резултати показват, че по време на проведените експерименти параметрите на процеса са били такива, че заваръчната дъга се е появила в първата и втората част на нейната характеристика. Освен това може да се види, че заваръчната дъга гори стабилно и в първата част на своята характеристика.

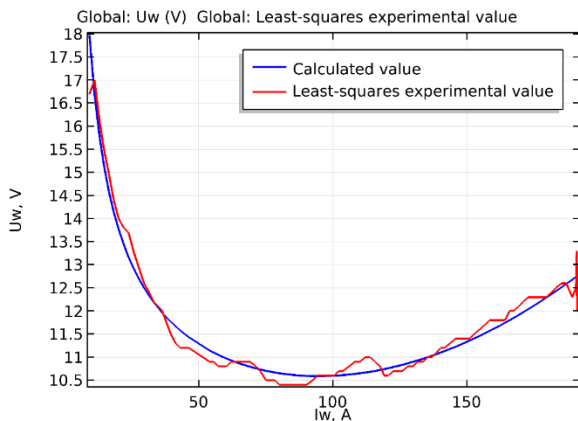
Експериментално изградените статични характеристики на заваръчната дъга съответстват на нейното качествено представяне, показано на фигура 1.



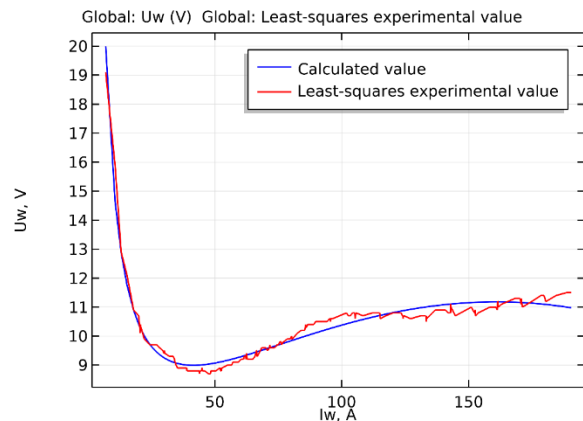
**Фигура 3. Статични характеристики – Електрод №1 (W + 1.4÷1.6% La) при намаляване на заваръчния ток от 200А до 20А.**



**Фигура 4. Статични характеристики – Електрод №1 (W + 1.4÷1.6% La) при увеличаване на заваръчния ток от 20А до 200А.**



**Фигура 5. Статични характеристики – Електрод №2 (100% W) при намаляване на заваръчния ток от 200А до 20А.**



**Фигура 6. Статични характеристики – Електрод 2 (100% W) при увеличаване на заваръчния ток от 20А до 200А.**

#### 4. Изводи

Налични са възможности за оптимизиране и усъвършенстване на заваръчните процеси чрез апаратите за следене на параметрите по отношение на тяхната вариативност и комбинативността. Определянето на статичната характеристика на дъгата при ВИГ заваръчен процес може успешно да се извърши през интернет на отдалечен компютър, чрез измерване на заваръчните процеси със система за наблюдение на заваряването в реално време.

Експериментално изградените статични характеристики на заваръчната дъга съответстват на нейното качествено представяне в класическите модели. Установи се, че в рамките на проведените експерименти втората част от характеристиката на дъгата не е значително изразена.

По-нататъшни проучвания ще определят и попълнят базата данни за статичната характеристика на дъгата в процеса на заваряване ВИГ с различни електроди, вариращи както по химически състав, така и по диаметър.

#### Благодарности:

Тези изследвания станаха възможни благодарение на проект КП-06-Н37/31/19.12.2019, финансиран от ФНИ.

#### References

1. Álisson Fernandes da Rosa, Felipe Batista, Victor Igor Barbare Lemos, Régis Henrique Gonçalves e Silva. Experimental Analysis on the Performance of SMA Welding Electrodes. 26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, November 22-26, 2021. Florianópolis, SC, Brazil.
2. Wooho Kim, Yong-Jung Kim and Hyosung Kim. Arc Voltage and Current Characteristics in Low-Voltage Direct Current. *Energies* 2018, 11, 2511; doi:10.3390/en11102511, <https://www.mdpi.com/journal/energies>
3. Antoni Sawicki. Static Characteristics of Defined Ignition Voltage Used in the Modelling of Arc within a Wide Range of Current Excitation. *Bulletin of the Institute of Welding, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, ISSN 2300-1674

4. Li, Y., Yang, J.C., Liu, Z. Welding performance of tungsten electrodes with different contents of rare earth oxides. (2015) *Materials Science Forum*, 814, pp. 631-635. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.814.631
5. Wang, R., Xue, J. Study on arc length stability of pulsed MIG welding based on average output characteristics of pulse cycle. (2012) *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 48 (10), pp. 50-55, DOI: 10.3901/JME.2012.10.050
6. Zhou, C.-F., Jiao, X.-D., Xue, L., Chen, J.-Q., Wang, Z.-H., Lu, T., Fang, X.-M. Arc static characteristics of gas tungsten arc welding under high air ambient pressure. (2008) *Shiyou Huagong Gaodeng Xuexiao Xuebao/Journal of Petrochemical Universities*, 21 (1), pp. 66-69.
7. Martínez, A., Blasco, N., Pérez, F.J., Vicuña, J.E., Lacámara, I., Oliva, J.A. Static output characteristic of a peak current controlled arc welding machine. (2006) *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1, art. no. 4267220, pp. 636-639. DOI: 10.1109/MWSCAS.2006.382143W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
8. Deyan Gradinarov, Set up for real time capturing of welding parameters (2021), *Proceedings of the VI International Scientific Conference Winter Session*. Volume 2, 259-260
9. Tongov M., Gradinarov D., Tashev P., Experimental Determination of Static Characteristic of Welding Arc in TIG Welding (2022), *Bulgarian Society for NDT International Journal "NDT Days"*, Volume V, Issue 3, Year 2022, pp.152-160



## The Equilibrium between Rouging and Derouging: A New Method for “Green” Derouging and Rust Removal for Industrial Applications

Nikolay T. TZVETKOV<sup>1</sup>, Tsvetomir R. BORISOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Biochemical Pharmacology and Drug Design, Institute of Molecular Biology “Roumen Tsanev” at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [ntzvetkov@bio21.bas.bg](mailto:ntzvetkov@bio21.bas.bg)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [ts.borisov07@gmail.com](mailto:ts.borisov07@gmail.com)

### Abstract

The present work is focused on a huge economic and environmental problem worldwide – rusting and rouging. The process of deposits formation of different types, structure and layer thickness, in the form of fine iron oxides/hydroxides on the surface of special chromium-nickel stainless steels (Cr/Ni, AISI class 304, 304L, 305–308) and/or chromium-nickel-molybdenum (Cr/Ni/Mo, AISI class 316, 316L, 904, 904L) austenitic alloys, is known in the practice as rouging. This is a specific form of corrosion of special steel alloys. Herein, we present a novel procedure for a pH neutral “GREEN” derouging and rust-removal of austenitic alloys (all-in-one CIP), useful for different industrial branches, such as biopharmacy, chemistry, and energy. The novel CIP-procedure is easy to perform, convenient, and environmentally friendly.

**Keywords:** Corrosion, derouging, rust removal, cleaning-in-place (CIP), austenitic alloys, pH neutral

## 1. Introduction

The aim of the present study is to offer an innovative, effective, cost-efficient, and importantly, environmentally friendly procedure for non-destructive derouging and rust removal. As well-known, rusting and rouging represent a huge economic and environmental problem worldwide. The process of deposits formation of different types, structure and layer thickness, in the form of fine iron oxides/hydroxides on the surface of special chromium-nickel stainless steels (Cr/Ni, AISI class 304, 304L, 305–308) and/or chromium-nickel-molybdenum (Cr/Ni/Mo, AISI class 316, 316L, 904, 904L) austenitic alloys, is known in the practice as *rouging*. This is a specific form of *corrosion* of special steel alloys.

These partial or massive deposits have a typical red-orange or orange-black color of varying intensity and are characteristic of equipment, apparatus, and installations, as well as supply piping systems (operating with ultra-pure water WFI/UPW with a temperature above 70°C and/or water vapor), used mostly in the high-tech production of pharmaceutical and biotechnological products, and other relevant industrial branches like chemistry and energy suppliers. In other words, the blushing phenomenon is typically found in the so-called “clean/sterile productions”, where it is mandatory to work under the modern requirements of good manufacturing practice (GMP/cGMP/GAMP). In most cases, such colored deposits, dirt and other visual changes can only be removed mechanically by wiping from the surface of the steel, which is practically impossible. Prolonged deposition of various forms of oxidized iron and other heavy metals on the surface of different types of stainless steel can lead to varying degrees of corrosion, leading to the formation of permanent rust, and subsequently, to contamination of the final products. In addition, such pollution also leads to technological problems related to the security and safety of the production itself. The process of removing traces of oxidized iron (Fe<sup>3+</sup>) and other heavy metals is known in the practice as *derouging*. The necessary instructions and requirements are given by the International Health Organization

(WHO), the International Society for Pharmaceutical Engineering (ISPE), the International Council on Technical Requirements for Medicinal Products for Human Medicine (ICH), as well as the most important regional pharmaceutical and biotechnology control organizations such as FDA (USA) and EMA (Europe) [1,2,3].

The implementation of rehabilitation activities (derouging, removal of incipient corrosion and re-passivation) takes place in accordance with the requirements of good manufacturing practice (GMP) and the internal production Quality Management System (QMS) through the application of the relevant Standard Operating Procedure (SOP). The frequency of carrying out this type of activities depends on the intensity, type (working parameters), and volume of the respective production, which are specific for each production company [4].

The aim of this study is to present a novel procedure for a pH neutral “GREEN” derouging and rust-removal of austenitic alloys (all-in-one CIP). The industrial application of this procedure is feasible due to the newly developed aqueous formulations allowing an efficiently and residual-free cleaning of austenitic steels, which are used in different industrial branches, such as biopharmacy, chemistry, and energy. The novel CIP-procedure and the pH neutral derouging/rust removing formulations are easy to perform, convenient, and environmentally friendly.

## 2. Discussion and results

### 2.1 State of the art: standard methods for cleaning of stainless steels at $\text{pH} < 2$ or $\text{pH} > 11$

From a technological point of view, the removal of any type of contamination (also known as *decontamination*) on the contact surfaces of stainless Cr/Ni-, Cr/Ni/Mo- and Cr/Ni/Mo/Ti-alloyed steel used in the construction of equipment for pharmaceutical and biotechnological production includes four main and two preparation steps, as follows:

- 1) Preparation of aqueous cleaning solution (preparation step 1)
- 2) Derusting/removal of traces of corrosion (main step 2)
- 3) Intermediate cleaning with clean (RO/WFI/UPW) water (main step 3)
- 4) Preparation of re-passivating aqueous solution (preparation step 4)
- 5) Re-passivation of the cleaned metal surfaces (main step 5)
- 6) Final cleaning with clean (RO/WFI/UPW) water (main step 6) (*cf.* Figure 3).

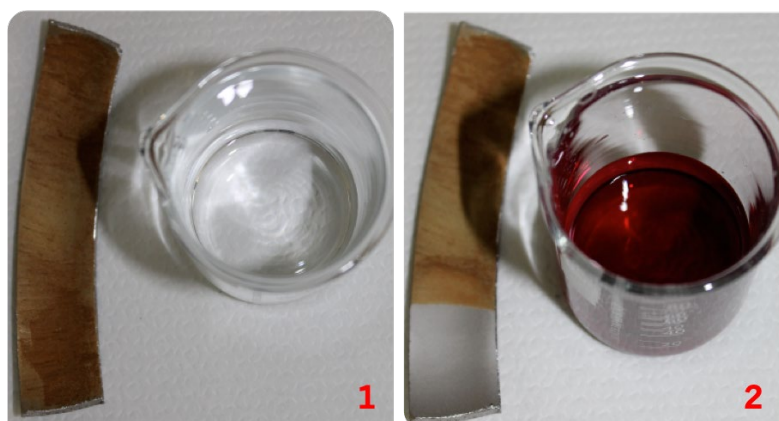
For the removal of any type of contamination (rouge type deposits, early stage of corrosion and related to them visual changes) from the surface of stainless steels, the so-called *wet-chemical methods* for cleaning (decontamination) and recovering of the passive  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  layer (re-passivation) of the contact surfaces of production installations and systems are widely used. These methods include mostly the use of concentrated and/or dilute aqueous solutions of strong inorganic mineral acids (e.g., 3–12% phosphoric acid,  $\text{HNO}_3$  in different concentrations, and others) and for re-passivation also of the application of organic water-soluble acids (e.g., citric acid, and others). In some cases, concentrated aqueous solutions of inorganic strong bases (such as NaOH) in combination with ionic and/or non-ionic surfactants (detergents) are also used. However, in all cases, the decontamination and re-passivation processes are carried out under unfavorable pH conditions ( $\text{pH} < 2$  or  $\text{pH} > 11$ ), which is associated with several problems, including neutralization of wastewater mixtures, strict safety control when using strong acids and bases, possible secondary destruction of the passive chrome layer, faster wear of the material and destruction of metal components, increased costs, and last but not least – serious environmental (ecological) problems.

There are two main approaches for application of the wet-chemical methods for industrial cleaning: (i) cleaning-in-place (CIP) using an automatized fine injection and/or multiple circulation, and (ii) cleaning-out-of-place (COP), which is suitable for detachable elements or parts of production installations – both mechanical and automated methods of fine injection, circulation, and immersion water bath can be applied.

## 2.2 Innovative pH neutral formulations for cleaning of stainless steels at pH 5–7

In view of the number of shortcomings and the strict norms, introduced by the relevant regulatory authorities regarding the use of aggressive chemicals, the so-called “GREEN methods” have been rapidly introduced in recent years [2–4]. In these modern procedures, water-neutral chemical formulations (pH 4–8) are preferably used as for the main processes of derouging and rust removal as for (re-)passivation of production installations.

In this context, innovative aqueous pH neutral formulations *NTZ<sub>clean neutral</sub>* and *NTZ<sub>neutra pass</sub>* (NTZ Lab Ltd., [www.ntzlab.com](http://www.ntzlab.com)) have been recently developed in order to ensure an efficiently and residual-free cleaning of austenitic steels, which are used in different industrial branches, such as biopharmacy, chemistry, and energy. The series of universal and highly effective colourless aqueous formulations for water-neutral derouging in a pH range of 5–7 is useful for removing of all forms of rouge, corrosion (rust), coloured and other types of impurities (deposits) on the surface of stainless steels with Cr/Ni and Cr/Ni/Mo alloys (e.g., 304/304L and 316/316L). These aqueous formulations offer several benefits over the standard cleaning aqueous solutions used so far, as follows: (i) low costs, (ii) not necessary use of a protective nitrogen environment during their application, (iii) environmentally friendly and safe for people and nature, (iv) simple preparation, (v) quick and easy implementation, (vi) no special neutralization of wastewater is required, (vii) adaptive procedure for application depending on the client’s requirements, (viii) conducting the cleaning and re-passivation process in the pH range 5–7, (ix) adaptive working parameters (pH, T, time), (x) optimal physicochemical characteristics, (xi) applicable for CIP and COP applications under GMP conditions, (xii) non aggressive against different polymers (e.g., PE, PP, PTFE, PVDF, EPDM, and others), (xiii) non special requirements for their long-time storage, and others. Some examples of the application of these new formulations under pH neutral conditions in laboratory and in the practice are presented in Figures 1 and 2, respectively.



**Fig. 1.** An example of derouging with pH neutral NTZ<sub>clean</sub> formulation (pH 6.93) of a sample plate made from stainless steel (AISI 316L) taken from a pharmaceutical WFI system (rust layer thickness >10 μM) before (1) and after (2) derouging for 5 min at 45°C. Solution discoloration into red provides the transformation of the insoluble Fe<sup>3+</sup> oxides/hydroxides into their soluble form.



Fig. 2. Tube plate of a steam raising unit before (1) and after (2) derouging. Pipe system before (3) and after (4) rust removal with new pH neutral formulations with NTZ<sub>clean neutral</sub>.

The technological scheme for application under pH neutral conditions is presented in Figure 3. The scheme offers the possibility of carrying out of either cleaning of the steel surface (e.g., derouging) or passivation (two-single step procedures), as well as successive re-passivation of the steel surface that is cleaned in the first step, completely carried out in a water-neutral environment.

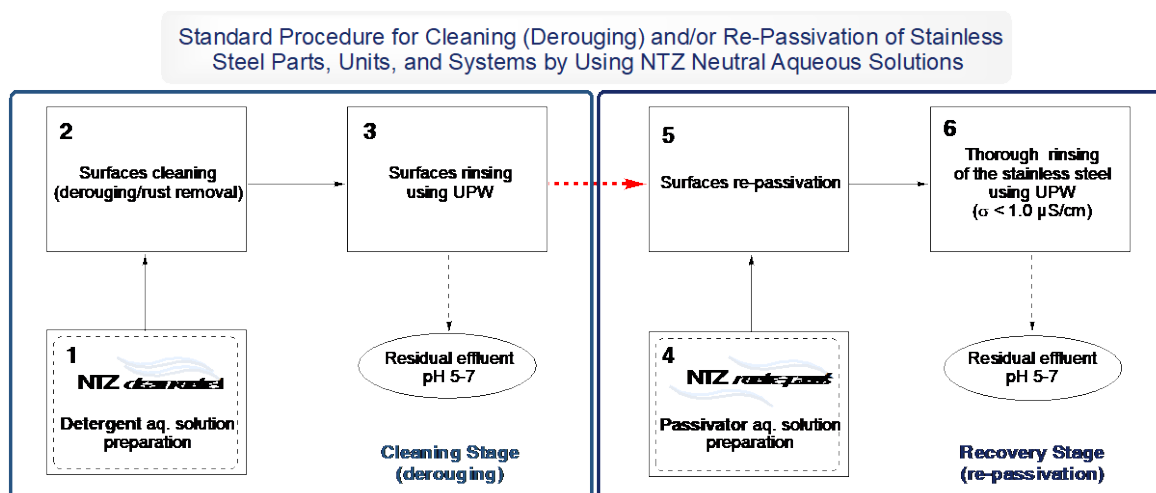


Fig. 3. Standard successive scheme procedure for derouging/rust removal and re-passivation with NTZ<sub>clean neutral</sub> and NTZ neutral pass aqueous solutions.

## References

1. Webpages of the cited International organizations:  
<https://www.who.int/>, <https://ispe.org/>, and <https://www.ich.org/>.
2. Henkel G., B. Henkel. Derouging von austenitischen Edelstahloberflächen mittels pH-neutraler Hochleistungschemikalien. TechnoPharm, Vol. 1, No. 1, 2011, pp 46-53.
3. Czech A. Rouging – Erfahrungen aus der Praxis am Beispiel einer WFI-Anlage. Pharmind Vol. 72, No. 1, 2011, 184-190.
4. Gohen N. How to determine rouge limits to initiate derouging and passivation. Pharmaceutical Engineering Vol. 34, No. 1, 2014, 1-4.



## Investigating the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Aluminium Alloys after Gaz Nitro-Carburizing

Siyana ZABUNOVA, Plamen PETROV, Desislava MINCHEVA

Technical university of Varna, Department of Material science and technology  
e-mails: [siyana.zabunova@gmail.com](mailto:siyana.zabunova@gmail.com); [petpl@abv.bg](mailto:petpl@abv.bg); [desislavamincheva76@gmail.com](mailto:desislavamincheva76@gmail.com)

### Abstract

The investigations of the microstructure and properties of aluminium alloys are through all the stages of the technological process. The aluminium alloys with Si and Cu have good castability and heat-resistance, but low corrosion resistance. The aluminium alloy containing Zn that is used in his scientific paper has age-hardened naturally in normal conditions and is very appropriate for application from technological, economical and ecological point of view. The purpose of the science for development of this light modern materials is connected with exploring and improving different conditions in order to make the technological process adequate to the contemporary requirements.

This investigation represents some results about experimental thermo-chemical treatment of hypoeutectic aluminium alloy AlSi9Cu3(Fe) and AlZn10Si8

**Keywords:** aluminium alloys, gaz nitro-carburizing, surface treatment, automotive, aluminium nitride,

## Изследване на микроструктурата и механичните свойства на алуминиеви сплави след газово карбонитриране

Сияна ЗАБУНОВА, Пламен ПЕТРОВ, Десислава МИНЧЕВА

### 1. Увод

Алуминиевите сплави притежават висока топло и електропроводимост, пластичност, корозионна-устойчивост. Обработват се чрез леене, пластична деформация и рязане. Чистият, нелегиран алуминий се използва основно в електротехниката за кондензатори, електропроводници както и за производство на фолия, телове, листове, тръби, съдове и др, [1]. Поради технико - икономически и екологични фактори съществува непрекъснат стремеж на изследователите в тази област за търсене на по-добри решения по отношение на технологиите и използваните материали като само-уякчаващи се сплави, при които технологичния цикъл на термообработка е съкратен, [1]. От съществено значение е да се спомене фактът, че използваните сплави в индустриалното производство са вторичен, рециклиран материал, няколкократно претопяван, чийто свойства е редно да отговарят на изискванията за съответния детайл, [2,3,4].

Алуминиевите сплави, които се използват в зависимост от начина на производство се делят основно на деформируеми и леярски. Физико-химичния механизъм и влиянието на легиращите елементи, въпреки многогодишните интензивни индустриални и научни проучвания все още не са напълно и абсолютно доизучени и са предмет на експериментиране. Интерес за учените представлява проследяване на микроструктурните особености през всички етапи на технологичния процес от леенето до окончателната термична обработка, [5]. Сплавите от системата Al-Si-Cu са с добри

леярски свойства и голяма топлоустойчивост. В автомобилната индустрия за компоненти на двигатели (бутала , цилиндрови глави) се използват сплави със съдържание минимум 3% мед ,  $AlSi7Cu3Mg$ ,  $AlSi8Cu3$  ,  $AlSi9Cu1Mg$ . Тяхната корозионна устойчивост е ниска, заради повишеното съдържание на мед, което намалява количеството на гама кристалите  $Al_2O_3$  в зависимост от температурата. Експериментално е установено също, че при  $475^{\circ}C$  плътността на оксида на алуминиева сплав със съдържание на цинк е по-ниска, в сравнение с плътността на оксида, образуван на повърхността на чист нелегиран алуминий,[6]. Сплави от системата Al-Si, които се използват за производство на бутала на двигатели в автомобилната индустрия обикновено са легирани с елемента никел за да се осигури високо ниво на якост при завишени температури и ниска стойност на коефициента на термично разширение.

## 2. Обект на изследване

Предмет на настоящото изследване представлява наблюдение в изменененията на микроструктурата на подевтектични алуминиево-силициеви сплави  $AlSi9Cu3(Fe)$ ,  $AlZn10Si8Mg$  след нискотемпературно газово карбонитриране.



Фигура 1. Образци от използваните алуминиеви сплави преди и след обработка

Проследено е влиянието на технологичните параметри на процеса и химичния състав (таблица 1, таблица2) на образци от двете сплави (фиг.1) върху микротвърдостта след проведената химико-термична обработка.

Таблица 1. Химичен състав на  $AlSi9Mg(Fe)$

<i>Cu%</i>	<i>Mg%</i>	<i>Si%</i>	<i>Fe%</i>	<i>Mn%</i>	<i>Ni%</i>	<i>Zn%</i>	<i>Ti%</i>	<i>Pb%</i>	<i>Sn%</i>	<i>Al%</i>
2,33	0,51	8,84	0,67	0,23	0,06	1,12	0,05	0,08	0,04	86,01

Таблица 2. Химичен състав на  $AlZn10Si8Mg$

<i>Cu%</i>	<i>Mg%</i>	<i>Si%</i>	<i>Fe%</i>	<i>Mn%</i>	<i>Ni%</i>	<i>Zn%</i>	<i>Ti%</i>	<i>Pb%</i>	<i>Sn%</i>	<i>Al%</i>
0,07	0,50	7,94	0,26	0,11	0,020	10,02	0,05	0,010	0,00	87,30

## 3. Методика

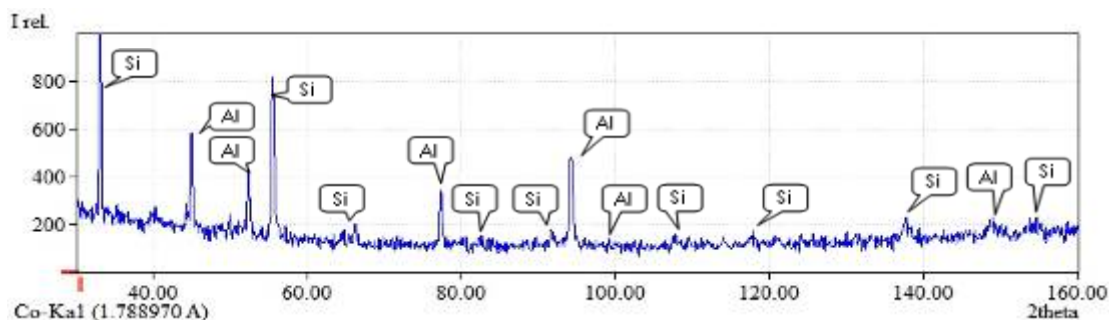
Образците и от двете марки сплави бяха подложени на ниско-температурно газово карбонитриране (НТГК) по метод “Карбонит“, който е разработен в Технически университет , гр. Варна. Технологичното оборудване, което е използвано е лабораторна пещ с обем на ретортата 2 литра. Насищането се осъществява в среда от амоняк ( $\text{NH}_3$ ) и въглероден диоксид ( $\text{CO}_2$ ). Температурата на нагряване от  $510^\circ\text{C}$  не преминава евтектичната за силумините  $575^\circ\text{C}$ , а времето на задържане е 15h (фиг.2). Проведени са металографски анализ и измерване на микротвърдост за двата вида алуминиеви сплави. Базирано на досегашни проучвания и публикации по темата, свързана с депасивирането на повърхността на алуминиевите сплави, т.е разрушаването на естествено формирания се защитен слой от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с цел интензифициране на дифузионния процес на насищане по време на химико-термичната обработка в пещта са използвани депасивиращи агенти соли на магнезиев хлорид, [7,8,9,10,11]. Използван е и амониев хлорид ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), стандартно прилаган при химикотермична обработка на неръждаеми стомани.



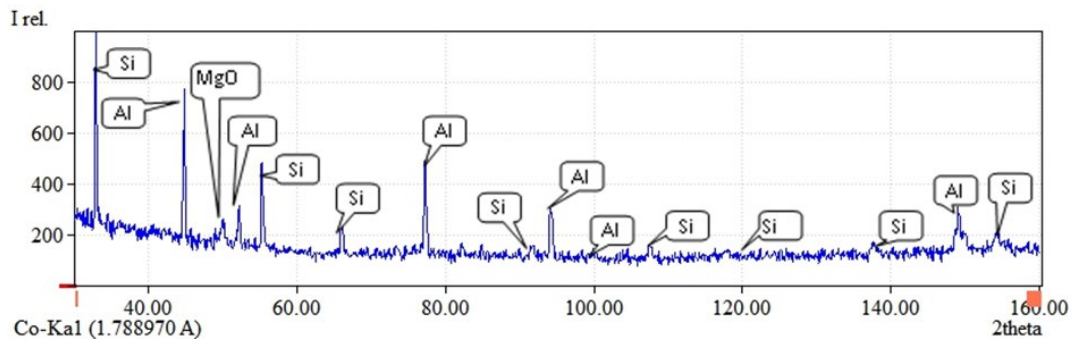
Фигура 2. Циклограма на технологичния процес

#### 4. Резултати

Фазовия анализ на образците (фиг.3; фиг.4) е извършен с ретгеноструктурен дифрактометър в  $\text{Co-K}\alpha 1$  излъчване преди и след като са подложени на НТГК.

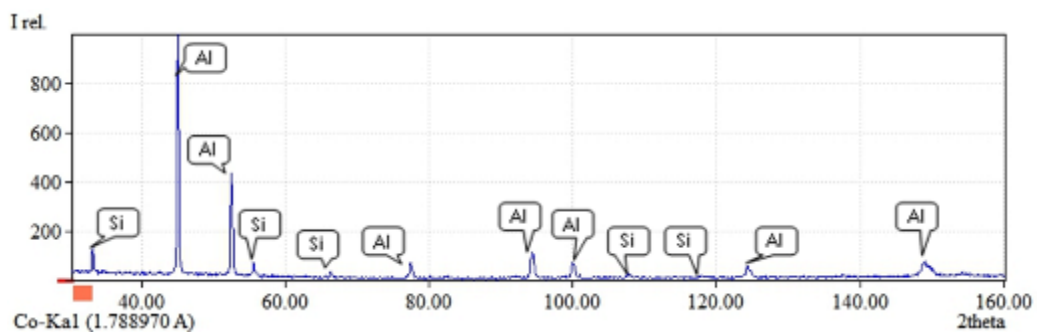


a)

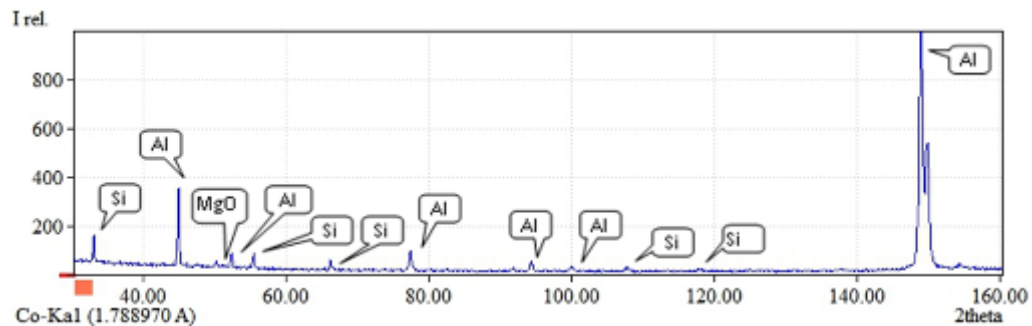


б)

Фигура 3. Рентгенов анализ на проба AlSi9Cu3(Fe) а) в сурово състояние; б) след обработка



а)



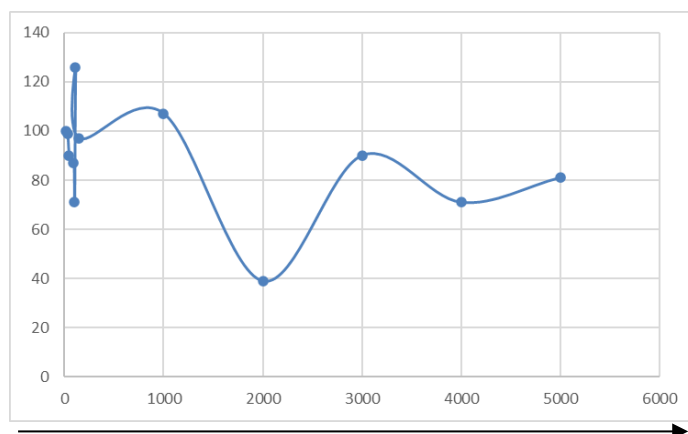
б)

Фигура 4. Рентгенов анализ на проба AlZn10Si8Mg а) в сурово състояние; б) след обработка

Обемна твърдост HV <sub>0,025</sub> на AlZn10Si8Mg преди обработката											
72	70	86	78	63	56	110	88	82	78	средно 78,3	
Обемна твърдост HV <sub>0,025</sub> на AlSi9Cu3Mg преди обработката											
105	72	101	103	83	89	96	60	113	66	средно 88,8	

Фигура 5. Обемна твърдост на образците





Дълбочина от повърхността към сърцевината, μm

**Фигура 8. Разпределение на микротвърдост на образец от AlSi9Cu3(Fe) от повърхността към сърцевината на сплавта след НТГКН**

#### **4.1 Анализ на получените резултати**

Анализът на рентгенографските изследвания показва намаляване на интензитетите на линиите, отговарящи за алуминия след провеждане на обработката, което означава, че е протекло дифузионно взаимодействие вследствие на което има зараждане на нова фаза или химично съединение на повърхността на материала. При сплавта AlSi9Cu3(Fe) това е по-силно изразено и кореспондира с металографските снимки, на които се вижда частично насищане на повърхността и поява на слой, неравномерен, с малка плътност и повишена твърдост в участъци, в които има изменение на размера и формата на силициевите зърна и формиране на SiN. От измерванията за обемна твърдост на самоуякчаващата се сплав, сравнено и с предишни получени резултати от други учени след провеждане на хомогенизиращо отгряване може да се направи заключение, че за сплавта AlZn10Si8Mg НТГК не дава резултат по отношение на формиране на плътен слой, но има увеличаване на твърдостта по целия обем, в следствие на изменение на формата и размерите на силициевите кристали, отделянето им по границите и формирането на различни интерметални съединения като Mg<sub>2</sub>Si, [6].

### **5. Изводи**

Получените данни от металографски, рентгенографски анализ и стойностите за микротвърдостта показват, че при сплавта, съдържаща Mg и Cu има частично насищане на повърхността. Данните за повърхностната твърдост не показват линейно нарастване, по-скоро има вероятност за формиране на по-твърди интерметални съединения. За сплавта с цинк, която има склонност към самоуякчаване не се потвърди насищане на повърхността, но има нарастване на обемната твърдост. Нужни са допълнителни изследвания, които да анализират характера на протеклите процеси.

## Литература

1. Varshney D., K. Kumar, Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 12, Issue 1, 2021, Pages 1143-1152, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.013>.
2. Tillová E., M. Chalupová, L. Hurtalová, J. Belan, Impact Properties of Self-Hardening Aluminium Alloy (AlZn10Si8Mg) at Elevated Temperatures, September 2015, Vol. 15, No. 4, *Manufacturing Technology*, ISSN 1213–2489
3. Medvecka D, E. Tilova, L. Kucharikova, M. Chalupova, D. Zavodska, A. Vasko, Influence of iron content on mechanical properties of secondary AlZn10Si8Mg cast alloy, 36 th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics 24-27.09.2019, Plzeň, Czech Republic
4. Tillová E., E. Ďuriníková, M. Chalupová, Structural Analysis of Secondary AlZn10Si8Mg Cast Alloy, *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol. 17, 2011, No. 1, p. 4-10
5. Bolibruchová D., M. Matejka, Analysis of Microstructure Changes for AlSi9Cu3 Alloy Caused by Remelting, December 2018, Vol. 18, No. 6 *Manufacturing Technology*, ISSN 1213–2489
6. Dziubinska, A. The New Technology of Die Forging of Automotive Connecting Rods from EN AB-71100 Aluminium Alloy Cast Preforms. *Materials* 2023, 16, 2856. <https://doi.org/10.3390/ma16072856>
7. Vargel Ch., The oxide film and passivity of aluminium, Chapter B.3 in *Corrosion of Aluminium* (Second Edition), Elsevier, 2020, Pages 91-111, ISBN 9780080999258, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00010-7>.
8. Yoshida M., T. Zhou., N. Utsumi. Formation of Aluminium Nitride Films by Gas Nitriding. *Key engineering materials*; 2014, Vol. 625, pp 651-656., <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.625.651>
9. Chen H., H. Stock., P Mayr, Plasma nitriding of Al 99.5, *Journal de Physique IV Proceedings*, EDP Sciences, 1993, 03 (C7), pp.C7-971-C7-979. [ff10.1051/jp4:19937150ff](https://doi.org/10.1051/jp4:19937150ff). [ffjpa-00251773](https://doi.org/10.1051/jp4:19937150ff)
10. Buchwalder A., J. Böcker, E. Hegelmann, V. Klemm, Investigations on the Microstructure of an Aluminium Nitride Layer and Its Interface with the Aluminium Substrate (Part I), 2022, <https://doi.org/10.3390/coatings12050618>
11. Pieczonka T., Disruption of an Alumina layer during sintering of aluminium in nitrogen. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, Vol. 62, 2B, pp 987-992 DOI: 10.1515/amm-2017-0139, ISSN 1733-3490
12. Yoshida M., T. Zhou, N. Utsumi, Formation of Aluminium Nitride Films by Gas Nitriding. *Key engineering materials*, 2014, Vol. 625, pp. 651-656, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.625.651>

## Effect of Gas Nitrocarburising on the Structure and Properties of Welded Joints of Corrosion-Resistant Steel

Plamen PETROV, Rusalena NICOLOVA, Daniela SPASOVA

Technical University of Varna, Varna, Bulgaria,  
e-mail: [petpl@abv.bg](mailto:petpl@abv.bg), [lisichek@abv.bg](mailto:lisichek@abv.bg), [danielats@abv.bg](mailto:danielats@abv.bg)

### Abstract

The present work investigates the possibility of changing the properties of welded joints of steel parts made of austenitic and duplex corrosion-resistant steels by subsequent nitriding/nitrocarburising of the joints. After nitrocarburising, the achieved hardness and microhardness in the individual zones of the compounds were measured and a microstructural analysis was carried out.

**Keywords:** stainless steels, welding, hardness, nitriding, nitrocarburising, s-phase

## Влияние на следващо газово карбонитриране върху структурата и свойствата на заварени съединения от корозионноустойчиви стомани

Пламен ПЕТРОВ, Русалена НИКОЛОВА, Даниела СПАСОВА

### 1. Увод

В настоящата работа поставената цел е изследването на възможностите за подобряване на свойствата на заварени съединения от корозионноустойчиви стомани с химико-термично обработване-газово карбонитриране, като подобни въздействия са обект на изследване и в [1], [2], [3] и [4]. Понастоящем е проследено изменението на твърдостта по зони, получена след заваряването на стоманени листи от подбраните стомани, чрез следващото им химико-термично обработване в среда от амониак и въглероден двуокис по нискотемпературен режим на газово карбонитриране, водещ до формирането на “s” –фаза на повърхността, за която се счита, че има равна или дори по-добра корозионна устойчивост от неръждаемите стомани, като подобни технологични варианти са използвани в [5] и [6]. Обхванати са съединения от два вида корозионно-устойчиви стомани –аустенитна (316L) и дуплексни (S31803; S32205), с химичен състав, съгласно фиг.1.

316L										
Химичен елемент	C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	N, %	
Изисквания по стандарт	max 0,030	max 2,00	max 0,040	max 0,015	max 1,00	16,5-18,00	10,00-13,00	2,00-2,50	max 0,100	
Определено за стоманата	0,018	1,13	0,036	0,006	0,39	17,00	10,22	2,05	0,027	

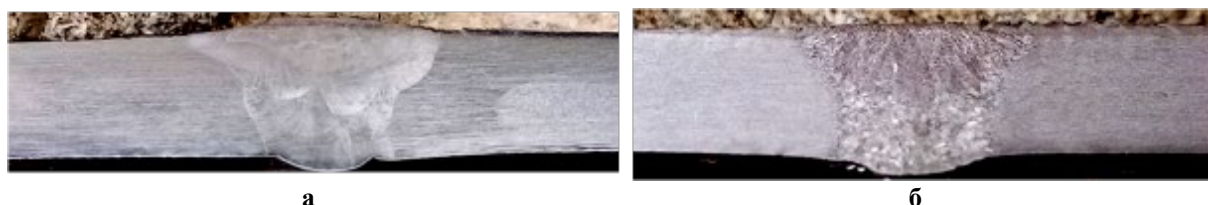
S31803; S32205										
Химичен елемент	C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	N, %	
Изисквания по стандарт	max 0,030	max 2,00	max 0,030	max 0,020	max 1,00	21,00-23,00	4,50-6,50	2,50-3,50	0,080-0,020	
Определено за стоманата	0,011	1,13	0,028	0,001	0,31	22,8	5,29	3,2	0,1970	

Фигура 1. Химичен състав на изследваните стомани

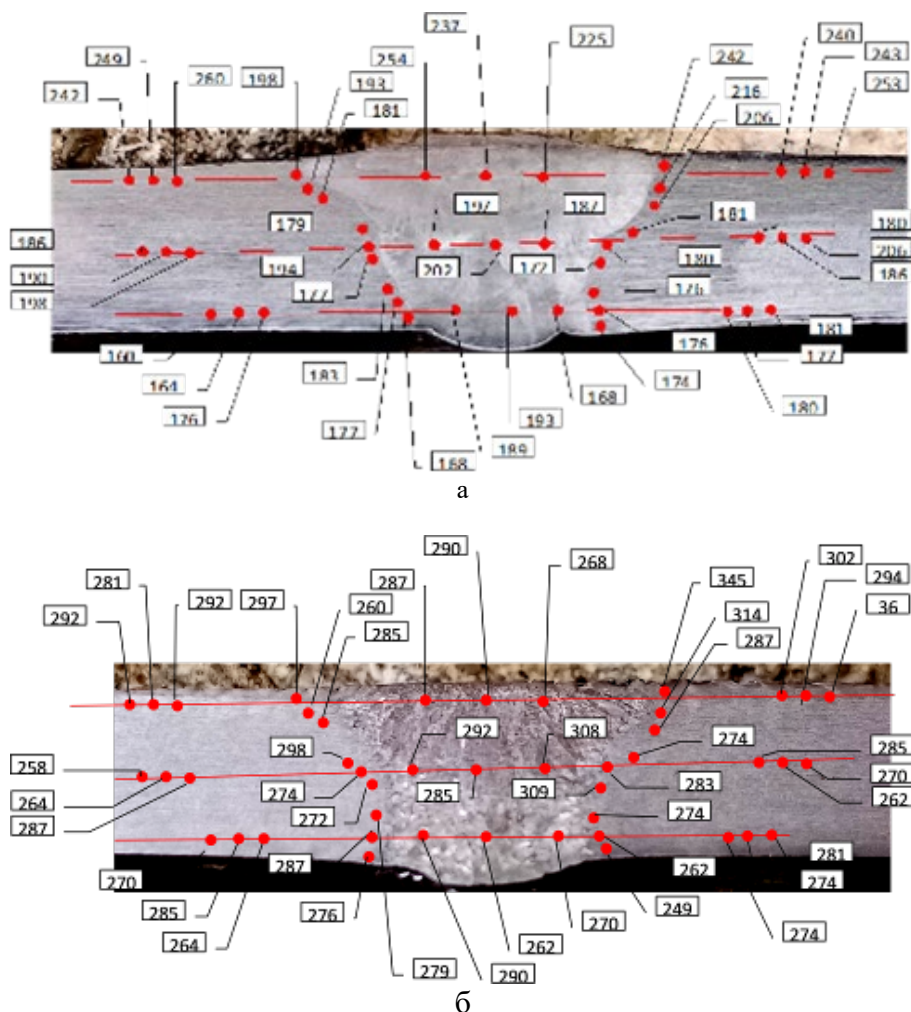
## 2. Експериментално изследване

### 2.1. Обекти на изследване

От корозионноустойчивите стомани са подготвени челно заварени съединения по подбрана технология, осигуряваща те да отговарят на предявяваните към тях изисквания по отношение на механични свойства, макроструктура-фиг.2 и разпределение на твърдостта по зони-фиг.3.



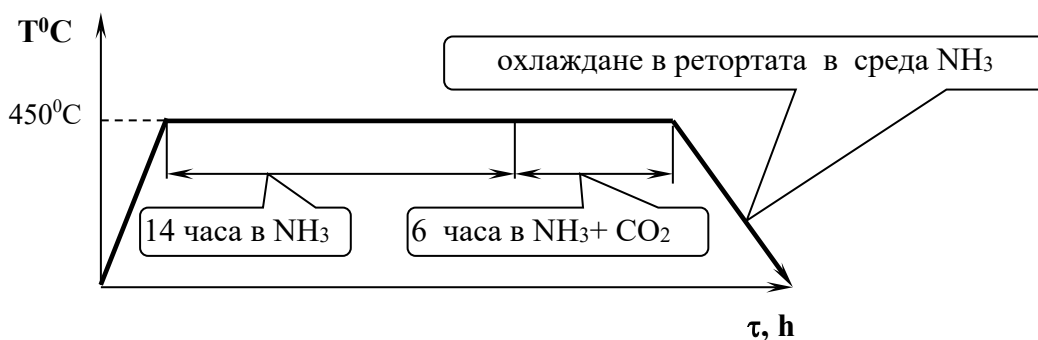
Фигура 2. Макроструктура на заварените съединения:  
а - от аустенитна стомана 316L, метод на заваряване W1; б - от дуплексна стомана S31803; S32205, метод на заваряване W1



Фигура 3. Разпределение на твърдостта HV10 в заварените съединения преди химико-термично обработване:  
а - в съединение от аустенитна стомана 316L; б - в съединение от дуплексна стомана S31803; S32205

## 2.2. Методика на експеримента

След премахване на усилването и корена на заваръчните шевове и шлифоване на повърхностите (операции извършвани преди механичните изпитвания на заварени съединения или за наварени изделия), заваръчните съединения са подложени на химико-термично обработване съгласно циклограмата представена на фиг. 4. След газовото карбонитриране са измерени постигнатите твърдоти и микротвърдоти в отделните зони на съединенията и е проведен микроструктурен анализ.



Фигура 4. Циклограма на проведеното химико-термично обработване:

## 3. Резултати

Определените след газово карбонитриране твърдост и микротвърдост по зони за заварените съединения са показани в табл. 1 и табл.2. По усреднените стойности на получените твърдоти са построени сравнителни хистограми-фиг.5.

Табл.1. Твърдост и микротвърдост по зони за стомана 316L.

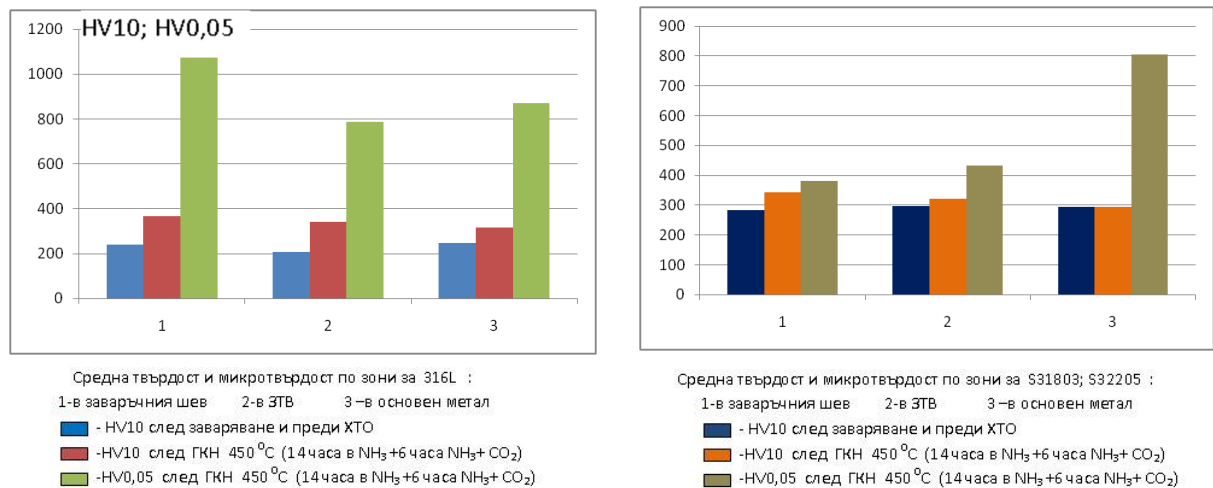
316L		Твърдост HV10				Микротвърдост HV0,05	
Зона	Състояние	След заваряването без ХТО		След ГКН		След ГКН	
		Заваръчен шев	254, 237, 225	Средно 239	351, 366, 383	Средно 367	1170, 934, 1084, 1044, 1132
ЗТВ	198, 193, 181, 242, 216, 206	Средно 206	342, 342, 339, 348, 345, 327	Средно 341	963, 869, 612, 732, 762	Средно 788	
Основен материал	242, 249, 260, 240, 243, 253	Средно 248	319, 327, 319, 314, 311, 309	Средно 317	943, 1177, 774, 670, 790	Средно 871	

Табл.2. Твърдост и микротвърдост по зони за стомана S31803;S32205.

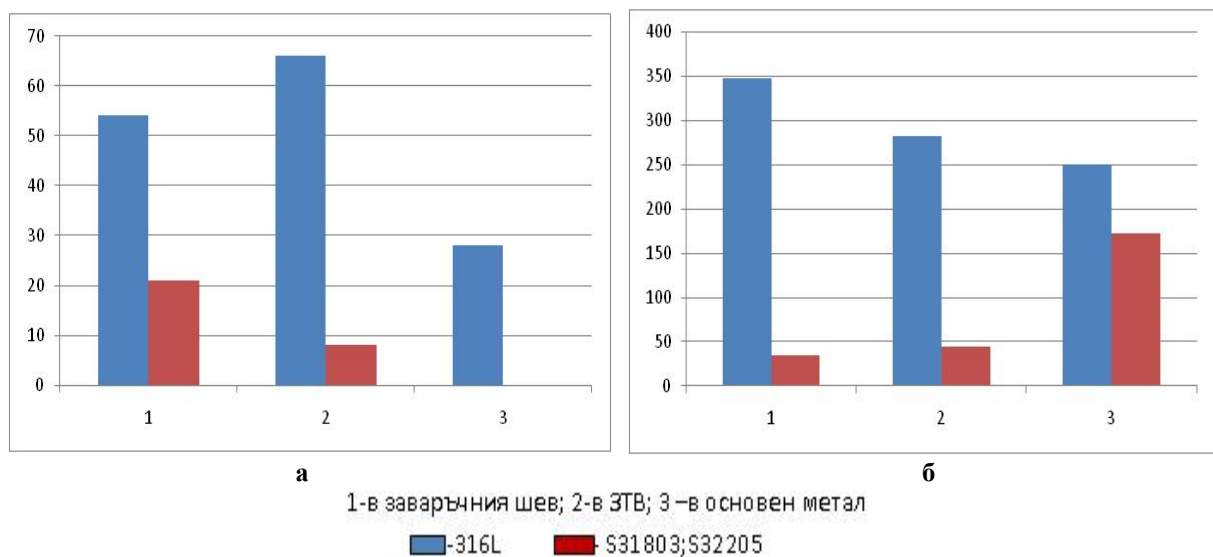
S31803;S32205		Твърдост HV10				Микротвърдост HV0,05	
Зона	Състояние	След заваряването без ХТО		След ГКН		След ГКН	
		Заваръчен шев	287, 290, 268	Средно 282	314, 330, 383	Средно 342	353, 346, 415, 401, 395
ЗТВ	297, 260, 285, 345, 314, 287	Средно 298	330, 345, 327, 311, 314, 304	Средно 322	322, 401, 436, 553, 448	Средно 432	

Основен материал	292, 281, 292, 302, 294, 306	Средно	292, 292, 287, 279, 302, 309	Средно	671, 752, 610, 1082, 908	Средно
		295		294		805

Постигнатата степен на уякчаване по зони е представена на фиг.6.

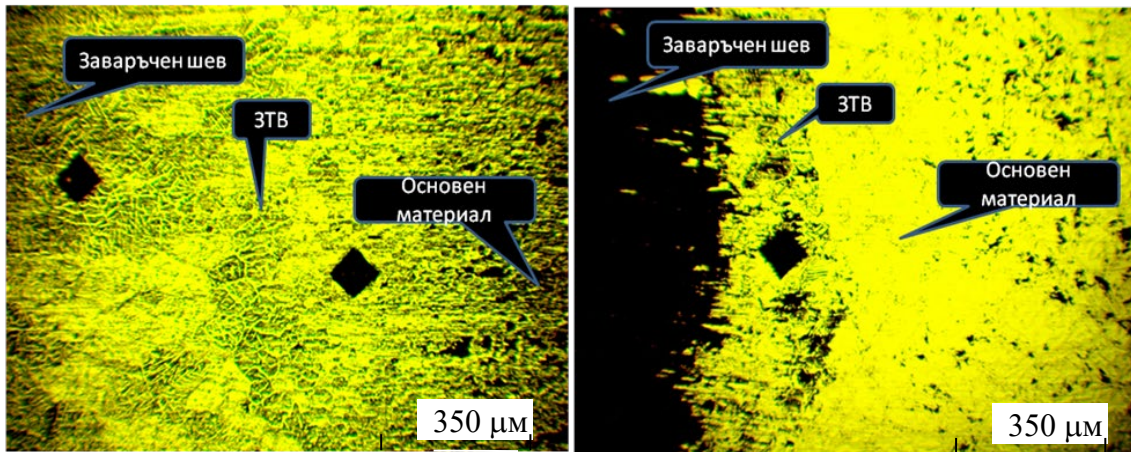


Фигура 5. Твърдост и микротвърдост по зони(по усреднени стойности)

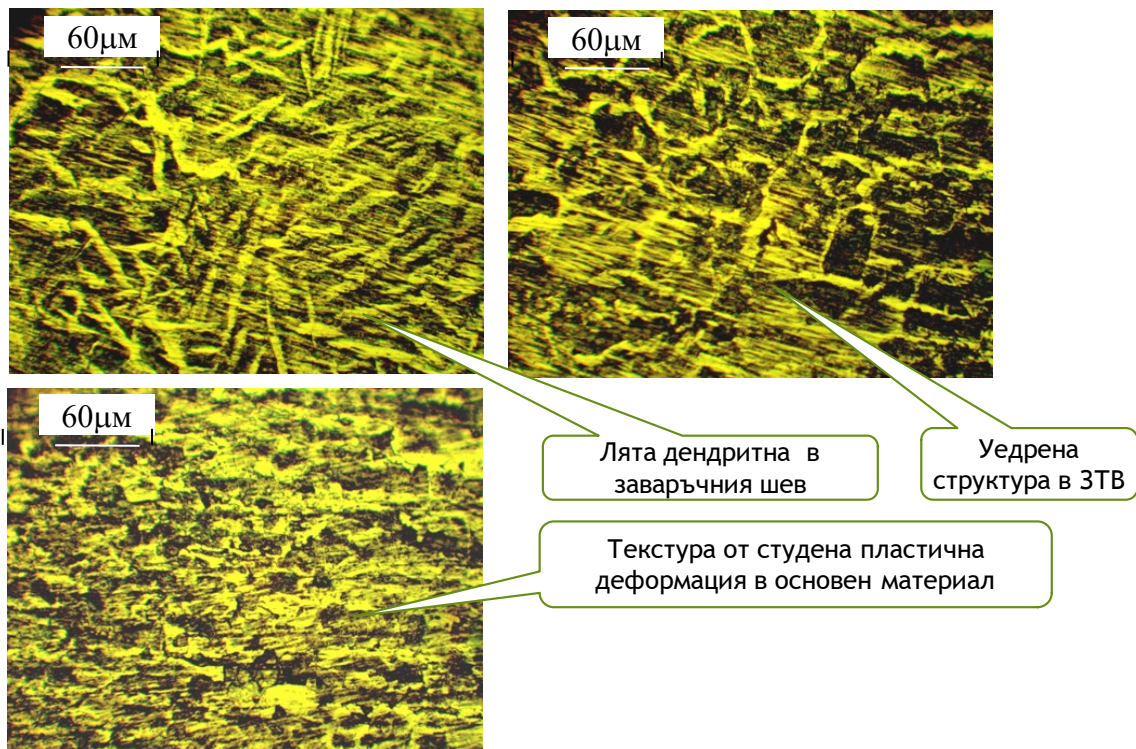


Фигура 6. Степен на уякчаване, % по зони: а-HV<sub>10</sub>; б-HV<sub>0,05</sub>

Резултати от проведения микроструктурен анализ са представени на фиг.7 и фиг.8.



Фигура 7. Микроструктура в план на заваръчните съединения след ГКН x50:  
а - 316L; б - S31803; S32205



Фигура.8 Микроструктура в план на заваръчния шев и ЗТВ и основата при 316L след ГКН:  
а - заваръчен шев-x400; б – зона на термично влияние-x400; в - основен материал-x 400.

#### 4. Анализ

Според проведеният фрактографски анализ изследваните заваръчни съединения са с добро качество, без наличие на дефекти от типа пори, пукнатини, непровари, подрези.

Проведеното нискотемпературно газово карбонитриране водещо до формиране на т.н. “s”-фаза води до по-значително уякчаване на аустенитната стомана в сравнение с дуплексната, като същото може да се заключи и за цялото заварено съединение от тази стомана. Прави впечатление, че подбраният електрод и режим на заваряване осигуряват най-висока твърдост след карбонитриране в зоната на заваръчния шев. Най-слабо

повърхностно уякчаване при това съединение е установено в ЗТВ, вероятно поради силно уедрената структура в тази зона.

При съединението от дуплексна стомана, значително повърхностно уякчаване е установено само за основния материал. Значително по слабо е за ЗТВ и най-ниско в заваръчния шев, което води до заключението, че не е избран подходящ електрод за заваряване. Освен това следва да се посочи, че полученият повърхностен уякчен слой е с по-малка дебелина и при определяне на повърхностна твърдост с натоварване 10 kg, уякчаването не се регистрира. Този резултат показва, че дифузионните процеси при дуплексната стомана от посоченият тип, протичат с по-малка скорост в сравнение с аустенитната стомана 316L

Уякчаването е по-значително и по-равномерно по зони при съединението от аустенитната стомана и това предполага разглежданата технология да може успешно да бъде приложена в разглеждания случай.

## 5. Изводи

Нискотемпературното газово карбонитриране с формиране на “s”-фаза води до значително уякчаване в отделните зони на завареното съединение от аустенитна стомана 316L. Максимална степен на уякчаване се постига в зоната на термично влияние, което е особено благоприятен факт, тъй като точно там се очаква влошаване на механичните показатели след заваряване. За доказване на благоприятното въздействие на тази обработка върху свойствата на завареното съединение следва да се извършат изпитвания на износоустойчивост и корозоустойчивост.

По отношение на дуплексната стомана следва да се предложи ревизия на избора на електрод за заваряване, тъй като е установена доста сериозна разлика по отношение възможността за насищане на основния материал и заваръчния шев.

## Литература

1. Alphonsa J., B.A. Padsala, B.J. Chauhan, G. Jhala, P.A. Rayjada, N. Chauhan, S.N. Soman, P.M. Raole, Plasma nitriding on welded joints of AISI 304 stainless steel, *Surface & Coatings Technology* 228 (2013), S306–S311
2. Nam T.-H., E. An, B. J. Kim, S. Shin, W.-S. Ko, N. Park, N. Kang, J. B. Jeon, Effect of Post Weld Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a Submerged-Arc-Welded 304 Stainless Steel, *Metals* 2018, 8, 26; doi:10.3390/met8010026
3. Sun Y., Effect of welding on the nitriding response of AISI 304 stainless steel, <https://www.researchgate.net/publication/287621000>
4. Brownlie F., T. Hodgkiess, A. Pearson, A.M. Galloway, Effect of nitriding on the corrosive wear performance of a single and double layer Stellite 6 weld cladding, [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/66448628/Brownlie\\_etal\\_Wear\\_2017\\_Effect\\_of\\_nitriding\\_on\\_the\\_corrosive\\_wear\\_performance.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/66448628/Brownlie_etal_Wear_2017_Effect_of_nitriding_on_the_corrosive_wear_performance.pdf)
5. Godec M., Č. Donik, A. Kocijan, B. Podgornik, D.A. Skobir Balantič, Effect of post-treated low-temperature plasma nitriding on the wear and corrosion resistance of 316L stainless steel manufactured by laser powderbed fusion, *Additive Manufacturing*, Vol. 32, March 2020, 101000, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101000>
6. Gokcekaya O., C. Ergun, T. Gulmez, T. Nakano, S. Yilmaz, Structural Characterization of Ion Nitrided 316L Austenitic Stainless Steel: Influence of Treatment Temperature and Time, *Metals* 2022, 12, 306, <https://doi.org/10.3390/met12020306>