

*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 2*

*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 Kableshkov University of Transport, Sofia, Bulgaria

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

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

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

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

**Boris MIHAYLOV**, SPECTRI Ltd, Sofia, Bulgaria

**Giuseppe NARDONI**, International Academy on NDT, Brescia, Italy

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

**Hristo PIROVSKI**, Technical University of Varna, Varna, Bulgaria

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

**Vladimir PROHOROVICH**, ITMO University, Saint Petersburg, Russia

**Nikolay RAZYGRAEV**, State Reseach Center of Russian Federation 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 VI (2023) of the International Journal “NDT Days” is partially financed by NPP Kozloduy and TU-Varna under the project HФ7/2023.

## Table of Contents

Comprehensive Approach of Testing and Evaluation and Involvement of NDT in the Ammunition Life Cycle .....	65
Petko BONCHEV, Delyan NEDELICHEV	
Mathematical Model of the Mechanical Activation Process of the Initial Components of Metal Matrix Nanocomposites .....	74
Vadim KOVTUN, Vladimir PASOVETS, Yordan MIRCHEV	
Curing Monitoring in Metal-Polymer Structures by Laser-Induced Ultrasound .....	80
Vitaliy MERINOV, Victor KOZHUSHKO, Vladimir SERGIENKO, Alexander ALEXIEV	
Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components.....	84
Iuliia LYSENKO, Yordan MIRCHEV, Oleksandr LEVCHEV, Yurii KUTS, Valentyn UCHANIN	
Technological Processes for Wire Arc Additive Manufacturing .....	89
Vladimir PETKOV, Manahil TONGOV, Marina MANILOVA, Radostina ZAEKOVA, Valentin ANGUELOV	
Технологични процеси за послойно изграждане на детайли	
Владимир ПЕТКОВ, Манахил ТОНГОВ, Марина МАНИЛОВА, Радостина ЗАЕКОВА, Валентин АНГЕЛОВ	
Analysis of the Causes of Low Impact Toughness in the Heat Affected Zone of AH36 Shipbuilding Steel Welded Joint after Submerged Arc Welding.....	97
Lyudmil CHOLAKOV, Plamen PETROV	
Анализ на причините на малка ударна жилавост на в зоната на термично влияние на заварено съединение от корабостроителна стомана АН36 след подфлюсово заваряване	
Людмил ЧОЛАКОВ, Пламен ПЕТРОВ	
Hybrid Non-equilibrium Composites Produced via Friction Stir Processing .....	105
Christo KONDOFF, Marina MANILOVA, Tatiana SIMEONOVA, Rumen KRASDEV, Plamen TASHEV	
Хибридни неравновесни композити получени чрез обработка с триене и размесване	
Христо КОНДОВ, Марина МАНИЛОВА, Татяна СИМЕОНОВА, Румен КРЪСТЕВ, Пламен ТАШЕВ	
Genesis of Destruction Steel Flange of Auto Concrete Pump .....	112
Tatyana MECHKAROVA, Nikolay VALCHEV	
Генезис на разрушаване на стоманен фланец на авто бетон помпа	
Татяна МЕЧКАРОВА, Николай ВЪЛЧЕВ	





## Comprehensive Approach of Testing and Evaluation and Involvement of NDT in the Ammunition Life Cycle

Petko BONCHEV, Delyan NEDELICHEV

Defence Institute, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [d.nedelchev@di.mod.bg](mailto:d.nedelchev@di.mod.bg)

### Abstract

In this article, we propose NDTs involvement as a part of comprehensive approach to support reliable evaluation of tools during ammunition life cycle. The comprehensive approach is based on the mix between traditional standardized (chemical stability, live-fire, etc.) and the non-destructive methods. This approach support adequate quality assurance, but most important ensures precisely evaluate safety and reliability during service life, to compensate existence of mixed results obtained from different parts of lots. In result of long storage, elements of ammunition are subjected to degradation by impact of environmental factors. Changes of temperature can accelerate these processes. During transport and service manipulations, mechanical damage can happen leading to formation of places susceptible to damage. Pyrotechnical materials undergo physicochemical changes (e.g. chemical reactions like decomposition, oxidation, and phase transitions). In whole, this triggers different hazards. The main problem for implementing NDT is the lack of standardization in this area, but in case the non-destructive methods applications is to provide additional information in order to “transfer” precisely the results obtained from destructive standardized methods over the whole lot, but non-destructive methods can be use widely as support tool adding valuable test data. Compensating the lack of standardization, this study conceptualize non-destructive methods and tools as a part of comprehensive approach.

**Keywords:** ammunition life cycle, ammunition service life, solid propellant rocket motor, non-destructive testing

### 1. Introduction

Nowadays, the emphasis in military understanding is on the provision of military capability, to which the weapon systems and ammunitions probably are the most significant and directly referred add of the materiel [14]. From logistics prospective, for ammunitions this means establishment of large stockpiles in order to ensure current and future operational or training activities and needs [8]. From manufacturing perspective the adequate structure for ensure quality of products and control of manufacturing processes. Being one-shot devices, the most important task during their life cycle is to ensure their safety during service life<sup>1</sup> and of course their performance. Starting in very early phase (in design and development stages) and continues during service, safety and performance lie on the munitions system reliability. To ensure it, the periodical tests, predominantly destructive ones, plays significant role.

The service life period seems more complex [8]. Service life assessment begins in the development phase and monitoring programs must be developed and implemented during the life span of the system and two interacting iteratively paths to produce current service life estimates are used [9]. One path is analytical which assesses the rate of material aging, the effect of material aging on the system (i.e., stability, performance, integrity, etc.) and the statistical probability of system failure during service life. The typical approach is to specify conservative service life period, determinated under harsh environment conditions and severe service loadings. Generally, the base for service life period for the whole system is this of the non-

---

<sup>1</sup> The service life is defined as the time that ammunition is able to operate reliably, safely, accomplish the setted requirements under the real life loads [8]

replaceable part with energetic material with the shortest service life period, nevertheless that the designed ammunition/missile or their elements can be used safely longer (Table 1) [8].

**Table 1. Expected service life for different tactical missiles components**

<b>Components</b>	<b>Expected service life, years</b>	<b>Possible degradation</b>
Pyrotechnics	20	- Destruction of pressed or glued joints [8];
Composite propellants (sealed)	20÷35	- Depletion of chemical precursors [5]; - Diffusion [5];
Propellants (sealed)	20÷35	- Micro and macrocracks generation [8]; - Moisture [5].
Electronic components	25-30	- “Electronic” aging; - Damages after service loads [8].
Optical components	>50	- Damages after service loads; - Moisture.
Power units	10-20 [9]	
Contact surfaces		- Damages of seals; - Contact corrosion.
Rubber and plastics components	10-20	- Damages after service loads; - Thermal degradation.
Metal components	>50	- Damages after service loads; - Thermal degradation [2].

Why the service life assessment is more important. During storage and deployment of ammunition and missiles, uncontrolled thermal environments and random vibratory loads due to transportation induce random stresses and strains in the propellant, which provoke mechanical damage [9]. In addition, structural capability degrades due to environmental conditions and induced stresses and strains as well as material capability parameters have inherent uncertainties [7]. In this proposed probabilistic service life prediction, uncertainties along with degradation mechanisms are taken into consideration [6]. Vibration loads are accounted by utilizing acceleration spectral density values, which are induced during various deployment scenarios of ground, air, and sea transportation [8, 9].

Furthermore, thermal loads are represented with a mathematical model being a harmonic function of time [8]. Throughout the finite element analyses, a linear viscoelastic material model is to be used for the propellant. Change in the structural capability of the propellant with time could be calculated using Laheru’s cumulative damage model [8]. Moreover, to include aging effect of the propellant, Layton model could be used [8]. To determine the effects of induced stress and strains under variations and uncertainties in the random loads and material constants, mathematical surrogate models are constructed using response surface method. These suggestions are valid for the majority of them use solid rocket motors and most of the propellants [8].

During its life cycle, ammunitions, and missiles elements experiences thermal loads under the variation of environmental storage temperature, but also vibrational and impact loads because of transportation and service handling. All of these affect on the rocket motor in distinct way depending from [8]:

- Design, materials and used technologies;

- Overall climatic profile of service life;
- Reaction of energetics to real environmental and service handling loads;
- Current service life period.

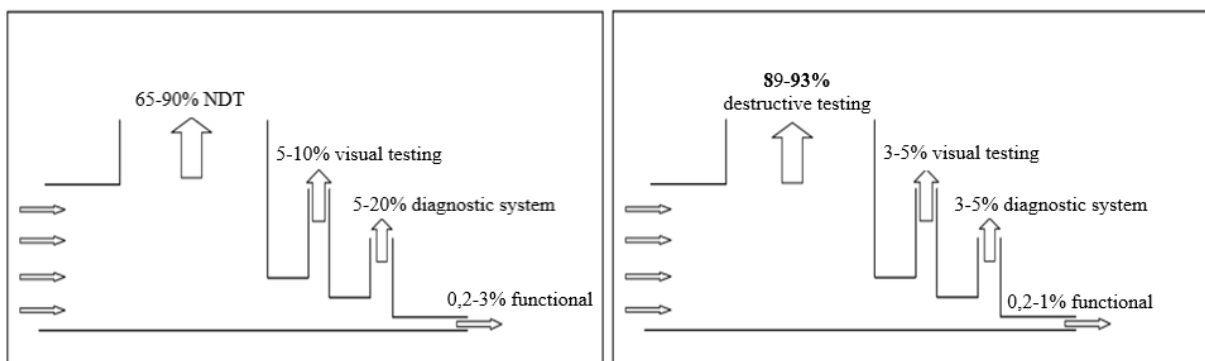
Negative combination from these factors could lead to irreversible changes in chemical composition and mechanical properties, cracking and other damages, which compromise normal engine performance. As a result, unstable combustion may occur, and worse – destruction or even explosion of the rocket engine and poor ballistic performance of propellants. [8].

Current munitions and their elements are designed to function within narrow performance boundaries. In order to guarantee safety and performance we must be able to predict their behaviour, as well as determine their residual life span after the system has been subject to handling and storage under varying conditions, which are not always being completely recorded.

The second path is system surveillance, which includes system observation and system trend analysis. As a result, the service life estimate may predict a minimum service life (safe interval) that will likely be extended on testing at a later period. All aspects of service life issues for solid rocket motor will be addressed including chemical and physical aging mechanisms, methodology and techniques for determining service life, application of the service life methodology and techniques to systems and non-destructive test methods. For these paths, except non-destructive methods, existing system of standards and best practices [8]. Most of them is based on the destructive methods – live firings, chemical analyses, aging, mechanical tests, etc. [8]. In turn, the non-destructive methods (NDT) methods are powerful tool for many industry areas, but due to their inherent limitations and complementary nature of different types, many of them need to be applied depending on their suitability as a service life estimation tool [8].

Unfortunately, they are not so popular tool (except the visual methods) in service life of ammunitions (except the production phase) (see Fig. 1) [8], following to the main problems for implementing NDT for qualification of the ammunition – the scope and lack of standardization. For inspection at various stages of its production and service life for instance [8]:

- NDT methods such as radiography, ultrasonic testing and dye-penetrant testing are being employed for the inspection of hardware [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12];
- Magnetic methods for shells and mortar bodies [10, 13],
- Ultrasonic testing is applied for checking the bond-line integrity of case, ammunition elements and insulation layer [5, 10] and
- X-ray radiography is employed for evaluating both the integrity of propellant mass and the bond-line integrity of propellant and insulation [3, 8].



**Fig. 1. Coverage of different methods in the industry (left) and in ammunition life cycle (right)**  
(Adapted by [8])

This was compensated in previous studies [5, 6, 7, 9] and in thesis [8], where some non-destructive methods were verified and this is stimuli for proposal in this study a methodology incorporated standardized destructive and non-destructive methods.

**Table 2. Review of applications in ammunition life cycles on non-destructive testing methods with their advantages and disadvantages [7]**

<b>NDT Methods</b>	<b>Testing Area</b>	<b>Applications</b>	<b>Advantage</b>	<b>Disadvantages</b>
Acoustic emission (AE)	Cracking, debonding and delamination	Composite, fiber materials	Easy detection of cracks, fractures, debonding, microcracks in matrix and delamination	Time consumed in data processing, required skills and experience, existence of external loads.
Ultrasonic (UT)	Material surface and internal defects	Elements, nonmetals, forging material and glued joints	Easy to detect, precession to find defects and adaptable defect area	Testing process on complex objects is complicated and more process time.
X-ray	Internal material defects	Material casting, non-metal parts and composites	Material defects i.e., porosity, slags, material abnormal penetration	Crack detecting is not possible in perpendicular axis; not possible to measure depth; costs are high.
Eddy current	Material surface and small defects	Electrically conductive material	The operational equipment is advanced; less time to complete the test	Delicate in signals owing edge effect, suddenly alter, easy to allow the wrong display.
IRT	Calculate thickness, interlayers, and surface	Metallic and Nonmetallic materials	Noncontact of testing object, working area is large	To detect the material defect depth, complex algorithm/mathematical calculations are required.
Magnetic Particle	Material surface and small defects	Ferromagnetic materials	It is low cost, portable and subsurface defects also detected	Restricted to ferromagnetic materials.

## **2. Concept for comprehensive approach for assessment of ammunition and missiles**

### **2.1. Justification of combined use of classical and non-destructive methods**

The current approach is periodically to test in field environment and initiating elements and electronics is subjected to laboratory testing [8]. Due to the fact most of these methods have got destructive outcome, quantities subjected to testing are low. The negative combination from this inefficient approach for surveillance and testing, lack of environmental records and the age of ammunitions and missiles often “produces” mixed results (see fig.2) when classical approach is used, based only on sampling of some numbers from one lot.

It is well a fact that the input elements, units, and aggregates change their characteristics [4, 5], and for munitions, producers tie the aggravable deadlines of the individual with the prescribed lifetime. The term aging is marked by the generalized change in mechanical and chemical factors as compared to properties immediately after production.

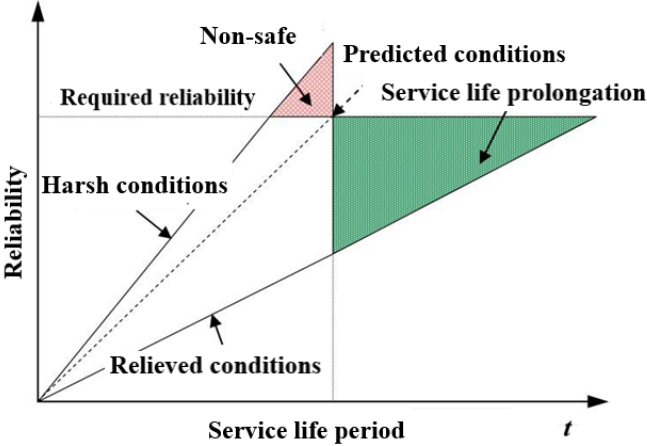


Fig.2. Different service life expectations for different specimens from one lot

Usually, the associated problems during the service life are related to explosives in rocket motors (solid propellant and pyrotechnics). During the service life they change their properties [10], the integrity of solid propellant is disturbed, the bond-lines are disintegrated, and defects like cracks, voids and depletion appear (fig. 3). Also, during the service life, the continuing changes in chemical composition are appeared. In detail, the aging processes in different energetic materials and their displays is described in [20].

The pyrotechnics are even more vulnerable, mainly because the trend to absorb the moisture.

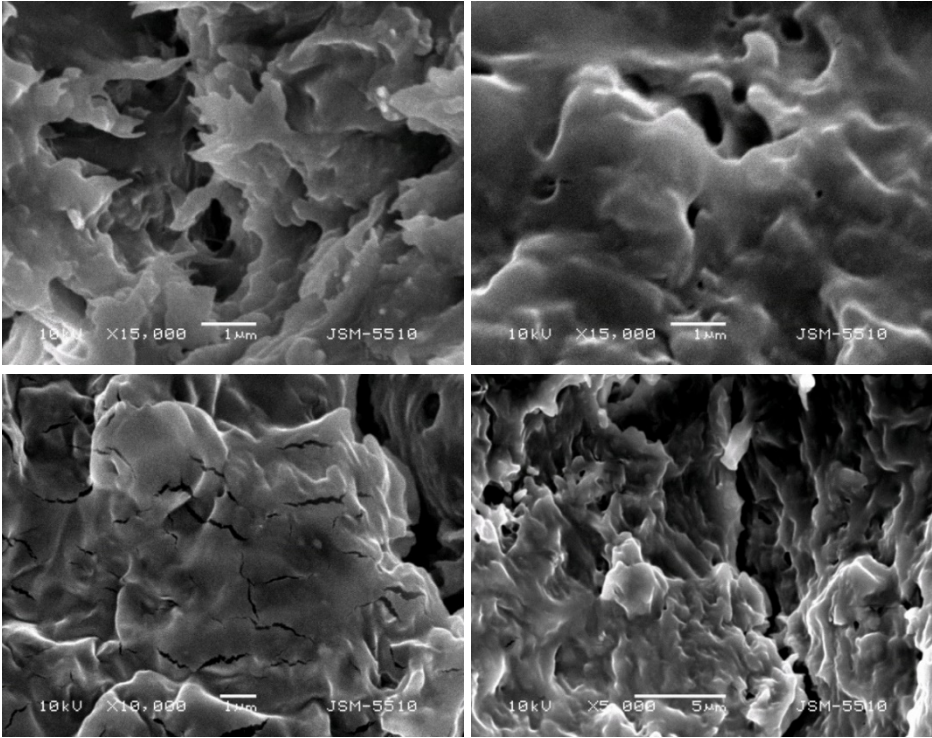


Fig. 3. “Sharpening” (first row, left), “rounding” (first row, right), micro (second row, left) and macro cracks (second row, right)

Complexity of these can affect negatively on performance and safety during service life and field and laboratory testing cannot provide reliable results [8].

To monitor these changes during service life in this study we propose comprehensive methodology for evaluation of ammunitions and tactical missiles.

## ***2.2. Comprehensive approach for service life assessment of solid rocket motors***

Schematic view of methodology for evaluation of ammunitions and missiles is showed in Figure 4. For expensive and complex systems, the number of sampled units for destructive full-system tests, which are considered the gold-standard measurements of the performance of the system, may necessarily be small and it's hard task to make conclusions for whole lot performance based on the full-system test result of several test samples [8]. Fortunately, there are other sources of information on the system or component level and in this methodology, we incorporate many other types as an alternate sources of information – from functional tests on component level to non-destructive testing, that practically could be performed on the whole lot [8]. Logically, the relative proportion of data available from these alternate sources may reduce the need for full-system and in our case – subsystem tests, and can enhance precision of evaluation [8].

The key aspects of this approach will be explained in some detail in this paper are: (1) how non-destructive methods can be added to “classical” destructive methods to produce single informative platform and (2) a unified methodology for precisely evaluating solid propellant rocket motors system level that combines with prediction up from the component level data, but for clarity of presentation we will not go into details for incorporation of data because this process we described well before – in [8] the author demonstrate Bayesian approach to incorporate data from different sources and here we present only the results on sub-system level. Also, due to same reasons, the sub-system decomposition process is not presented in details here.

The proposed methodology is divided into two branches – “destructive” and “non-destructive”. “Destructive branch” includes performance tests, all applicable standardized and validated methods, described in standardized documents (mainly STANAGs and allied publications) and specialized documentation – manuals, guidances etc.

The “non-destructive branch” combines different techniques. Two of them (Ultrasound technique implementation for aging characterization and X-Ray technique for defects characterization) are validated by the author in [8] and here only cursory notes are added. The rest non-destructive tests are well-known [8].

The proposed ultrasound technique, based on different propagation velocities for different aged samples. The technique is well described in [8] and here we will not go into details. This technique may give significant advantage, because other known techniques is based on chemical composition changes and related with destruction of the solid propellant. Otherwise using this ultrasound technique could be automated easily, it's fully non-destructive and hence all the lot could be subject on testing. The ultrasound technique is proposed as an additional tool in existing system of standards for service life qualification of solid rocket propellants. The method is partially proof for propellants include nitrate esters on micro level by electronic scanning microscopy.

Some notes regarding X-Ray technique proposed. It is verified by medium power industrial system with film with passable quality for relatively small rocket motors with thin metal case [8]. The results obtained showed possibility for detection of flaws with diameter less than 0,7-0,8 mm, that is not perfect but fully acceptable result for the designed purposes. Understandable, the limitations of x-rays (and  $\gamma$ -rays) in the control of materials with a small atomic number in the presence of materials with a large atomic number (a classic example is metal-lined explosives) still exist and we cannot expect to detect relatively small defects.

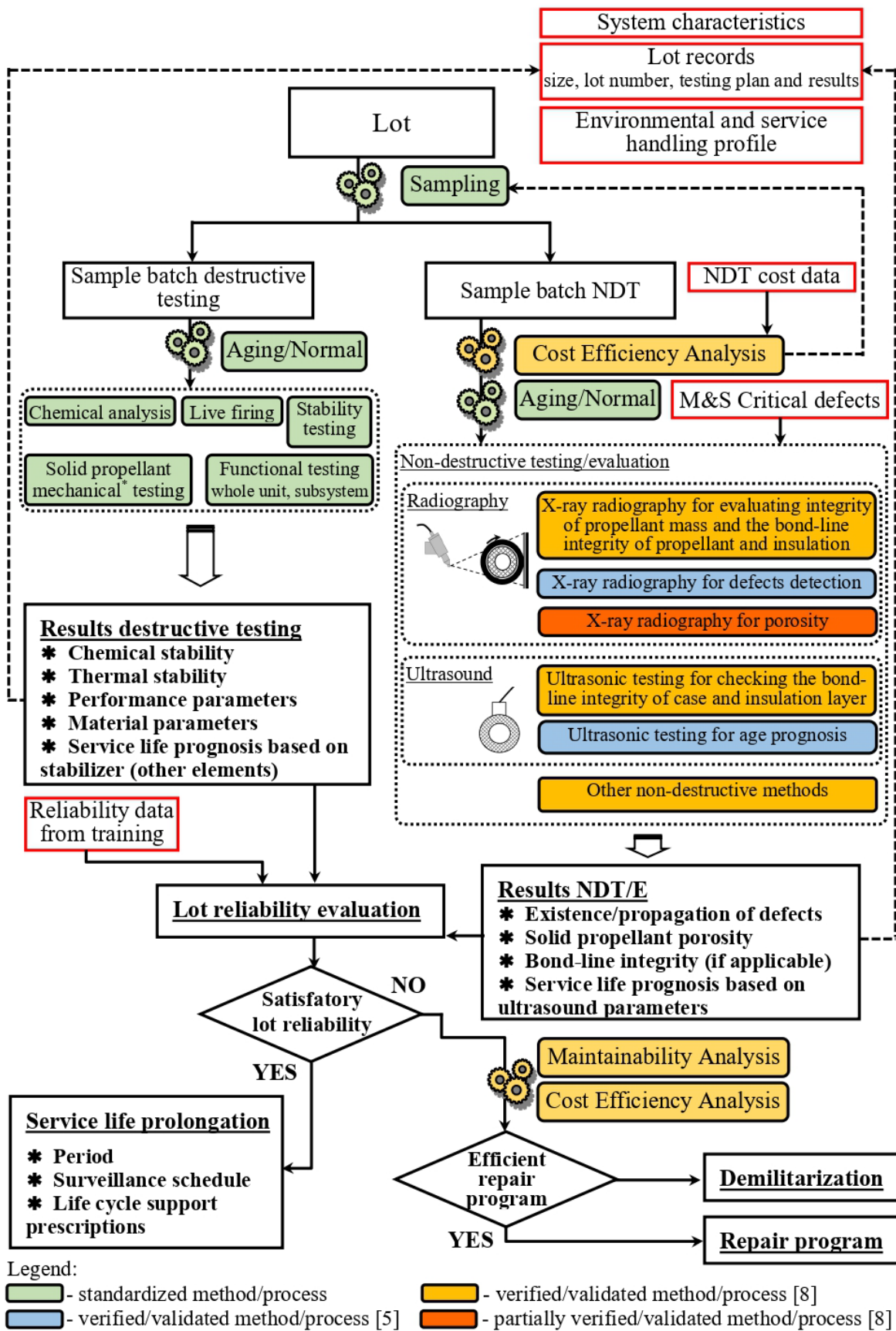


Fig. 4. Comprehensive approach for service life assessment of solid-propellant rocket motors [8]

### 3. Selected results – X-Ray

The results from X-Ray is shown on Figure 5.

Performed cost-efficiency analysis (subject on other article) showed that the (expected) whole cost of the performed test X-ray and ultrasound test is between 0,01 and 0,1 times of price of one unit in dependence of the type of the rocket. Nevertheless, one of the directions for future development, as well as improving sensitivity, precision, and productivity of the NDT methods) remains the cost reduction.

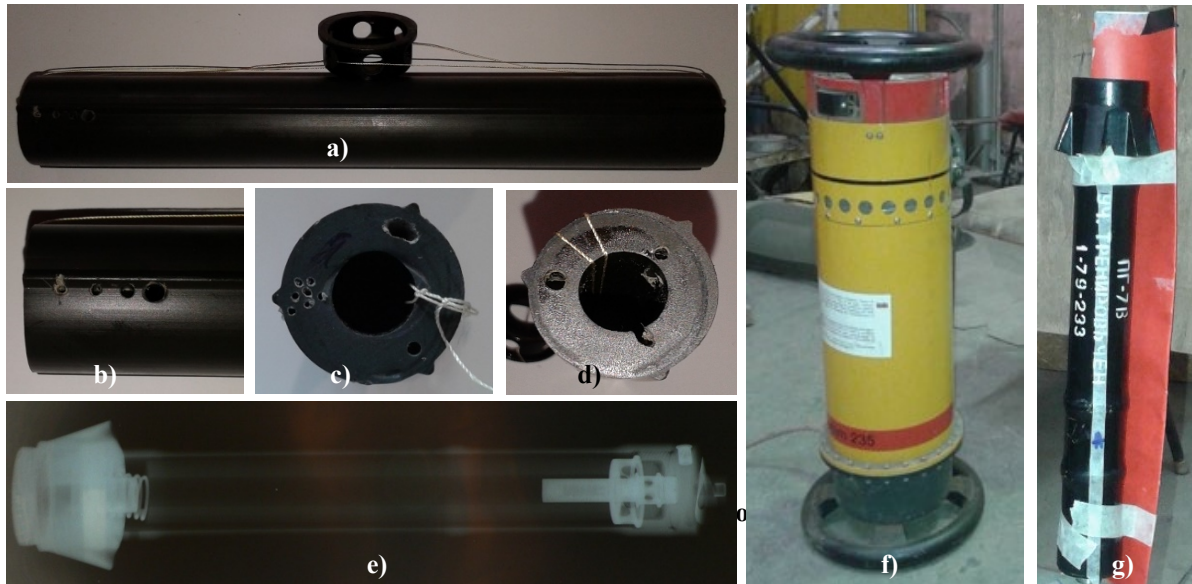


Fig. 5. X-Ray testing bet and result: a) solid propellant; b), c) and d) artificial flows; e) X-Ray film from rocket motor unit; f) X-ray system; g) sample with X-ray film.

*Copied from [8]*

### Summary

In this study we propose comprehensive approach for service life assessment of ammunitions based on the mix between traditional standardized (chemical stability, live-fire, etc.) and the non-destructive methods. Because of the lack of standardization of non-destructive methods in this neurological area, their usage is only as an additional tool, improving awareness.

The initial results are encouraging and implementation of these methods definitely improved accuracy of evaluation and practically could nullify existence of mixed results obtained from different parts of lots in performance tests. In the near future the comprehensive approach for every type munition will be developed.

### References

1. ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive evaluation and quality control (1997), 5<sup>th</sup> printing, ASM International.
2. Boichev J., (2014), Assesment of plasticity of aluminium based composite materials with microcristaline structure for different temperatures; Proceedings NDT Days'2014, ISSN: 1310-3946, pp. 214-216.

3. Burstein, P. and Youngberg, J. (2005), X-ray Mega Volt Digital Imaging Inspection System, US Army TACOM-ARDEC.
4. Chen, C. H. (editor) (2002), Ultrasound and advanced methods for nondestructive testing and material characterization, World Scientific Publishing Co.
5. Genov B.G. and Grozev V. Iv. (2015), Study of the ultrasound propagation velocities in nitrocellulose-based propellants (*in bulgarian*), International conference “NDT Days” 2015, Sozopol, 2015, ISSN 1310-3946
6. Genov, B. G. et al., (2018), Ageing of solid rocket propellants investigated by ultrasound technique, 20<sup>th</sup> ISRANDT conference, published in The Israeli National Society for Non-destructive testing, December 2018, and in NDT Days, Volume I, Issue 5 ISSN: 2603-4018 (print), 2603-4646 (online), pp.577-582
7. Genov, B. G. (2018), Criteria for NDT methods selection during ammunition service life, published in NDT Days, Volume I / Issue 4 (2018), ISSN: 2603-4018 (print), 2603-4646 (online), pp. 494-503 (in bulgarian)
8. Genov, B. G. (2018), Ammunition surveillance system optimization, *D.Sc. Thesis. (in bulgarian)*, pp. 17 from 223.
9. Genov, B. G. (2019), NDT Days, Volume II / Issue 4 (2019), ISSN: 2603-4018 (print), 2603-4646 (online), стр. 467-475, Comprehensive approach for service life assessment of solid-propellant rocket motors.
10. Jablonski, J. et al. (2010), Critical flaw estimate and flaw analysis of 81 mm M821A1 mortar projectile, Technical Report ARMET-TR-10001, Picatinny Arsenal, NJ 07806-5000.
11. Kececioglu, D. (2002), Reliability engineering handbook, vols.1&2, DESTech Publications.
12. Rao, K. V. et al. (2000), Characterisation of defects in Large Solid propellant Rocket Motors, Proceedings of 15<sup>th</sup> WCNDT.
13. Zamloot, G. (1988), Improved nondestructive testing of 60 mm M720 mortar projectile. Magnetic flux leakage inspection system of M720 mortar, U.S. Army Armament Research, development and Engineering Center.
14. Yanakiev, Y., Stoianov N., Kirkov D., & Velez G. (2020). Defence Strategy and New Disruptive Technologies Nexus: Implications for the Military Organisations. *Journal of Defence & Security Technologies*. 3(1), 7-41.



## Mathematical Model of the Mechanical Activation Process of the Initial Components of Metal Matrix Nanocomposites

Vadim KOVTUN<sup>1</sup>, Vladimir PASOVETS<sup>1,2</sup>, Yordan MIRCHEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Belarus,  
Phone: +375173454086, Fax: +375173403557, e-mail: [vadimkov@ya.ru](mailto:vadimkov@ya.ru)

<sup>2</sup> State Research and Production Powder Metallurgy Association National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus, Phone: +375172928271, Fax: +375172100574, e-mail: [pasovets\\_v@mail.ru](mailto:pasovets_v@mail.ru)

<sup>3</sup> Institute of Mechanics of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria;  
e-mail: [mirchev@imbm.bas.bg](mailto:mirchev@imbm.bas.bg), [ntddd@abv.bg](mailto:ntddd@abv.bg)

### Abstract

A mathematical model of the process of mechanical activation of the initial components of nanocomposites with a metal matrix has been developed. This model is based on the mathematical description of the processes of van der Waals interaction of carbon nanostructures, their separation and distribution at the mechanical activation. The mathematical model, taking into account the criteria for the effective separation of agglomerates of carbon nanostructures and distribution carbon nanostructures in the process of mixing nano- and micro-sized initial components of composite materials, makes it possible to determine the energy values of the van der Waals interaction of carbon nanostructures, the energy values supplied by the mixer-activator at given technological parameters of mechanical activation, and also to predict the optimal time of mechanical activation of a powder system of various masses, sufficient for the destruction of agglomerates of carbon nanostructures and their distribution in a powder metal matrix.

**Keywords:** powder, nanocomposite, mathematical model, carbon nanotube, agglomerate, mechanical activation, van der Waals interaction.

## 1. Introduction

Composite materials with a metal matrix filled of carbon nanostructures materials really promising for practical application in the mechanical engineering, automotive and aviation industries. Powders of both pure metals and their alloys are used as matrices of these materials. Carbon nanotubes (CNTs) are the most studied and used carbon nanostructured filler [1, 2].

The distribution of carbon nanostructures in a metal micro-sized matrix is a serious problem. Nanosized filler tends to form micro-sized agglomerates [3]. The process of distribution of a nano-sized filler in a metal matrix can be interpreted as the supply of mechanical energy to the initial components of the powder system for the separation of micro-sized agglomerates and fixing carbon nanostructures on the surface of micro-sized particles of a metal matrix. In this case, the counteracting factor that makes difficult of separation the nanosized components is the binding energy that keeps the nanoparticles in the agglomerate.

Thus, it is possible to establish criteria for the effective degradation of agglomerates and separation of CNTs in the process of mixing nano- and micro-sized initial components of composite materials. First, the applied energy must exceed the binding energy of CNT agglomerates. This will break up the micro-sized agglomerates of nanoparticles. Second, the amount of energy supplied should not exceed the energy required to destroy a single CNT. This will make it possible to preserve the structure and high physical and mechanical characteristics of individual CNTs. Therefore, the optimal method for separating agglomerates of a nanosized filler should provide a lower limit of the applied energy sufficient to break the bond of agglomerates and an upper limit of energy insufficient to destroy individual CNTs [4].

For the destruction of agglomerates of carbon nanostructures and distribution of carbon nanostructures in a metal matrix, it is reasonable to use mechanical activation methods. Supply additional energy to the powder system makes it possible to separate and distribute nanosized components in a metal micro-sized matrix. Replacing the mixing process with mechanical activation prevents the segregation of carbon nanostructures and their subsequent re-agglomeration. Thus, the purpose of the work was to develop a mathematical model of the process of mechanical activation of the initial components of nanocomposites with a metal matrix.

## 2. Mathematical model

The shape and geometric dimensions of CNTs differ. The forces of interaction between pairs of nanotubes can be estimated using theoretical models.

The van der Waals interaction of two CNTs was analysed using the Hamaker constant [5]. In this case, the interaction energy was determined by modeling each CNT as a mesoscale rod continuum [6]. It was experimentally shown in [7] that for the van der Waals attraction between the outer layer of a multilayer CNT and a metal surface in vacuum, the Hamaker constant is  $A_H = 60 \times 10^{-20}$  J.

It can be assumed that this constant between the side walls of the CNT will differ slightly from the given value. Knowing the Hamaker constant, one can determine the energy of the van der Waals interaction between a pair of parallel CNTs. The solution of this problem is similar to the solution that describes the van der Waals interaction energy between two parallel mesoscopic cylinders of length  $l$ , diameter  $d_{CNT}$ , separated by a gap  $H$  [8]:

$$E_{//} \approx \frac{A_H}{24} \cdot l \cdot d_{CNT}^2 \cdot H^{-\frac{3}{2}} \text{ in case } H \geq H_c \quad (1)$$

where  $A_H$  is Hamaker's constant,  $A_H = 60 \times 10^{-20}$  J;  $l$  is the CNT length, m;  $d_{CNT}$  is the CNT diameter, nm;  $H$  is the distance between interacting CNTs, m;  $H_c$  is the distance between the graphene layers of a multilayer CNT,  $H_c = 3.4 \times 10^{-20}$  m.

The interaction energy of two CNTs can be modeled by two perpendicularly crossed rods of diameter  $d_{CNT}$  located at a distance  $H$  [8]:

$$E_+ \approx \frac{A_H}{12} \cdot \frac{d_{CNT}}{H} \text{ in case } H < d_{CNT} \quad (2)$$

Energy of van der Waals interaction of carbon nanosized filler in the sample:  
- for parallel arrangement:

$$E_p = 0.5n_{CNT} \cdot E_{//} \quad (3)$$

where  $n_{CNT}$  is number of CNTs in the sample, pcs.

- for cross arrangement:

$$E_c = 0.5n_{CNT} \cdot E_+ \quad (4)$$

Total interaction energy:

$$E_o = E_p + E_c \quad (5)$$

The homogeneous distribution of CNTs in the metal matrix determines the properties of the composite and is a significant problem. Thus, the influence of the spatial arrangement of the carbon nanostructured filler on the value of the agglomeration energy has been shown.

Based on the analysis of the presented formulas, we can draw the following conclusions. The energy values of the van der Waals interaction in the case of a parallel arrangement of CNTs significantly exceed the energy values in the case of a crossed arrangement, which is explained by the significant length of the interaction. Increasing the distance between interacting CNTs significantly reduces the interaction energy [4].

However, deagglomerated CNTs tend to form new agglomerates. Therefore, they must be fixed on the surface of micro-sized particles of the copper matrix.

Let us calculate the energy required to fix CNTs on the surface of matrix particles. This energy will be the work that needs to be done to introduce CNTs into the copper matrix, subject to its local deformation.

The energy required for the introduction of CNTs into the copper surface:

$$E_{CNT-Cu} = n_{CNT} \cdot \sigma_{TCu} \cdot S_{CNT} \cdot \delta \quad (6)$$

where  $\sigma_{TCu}$  is the yield strength of the matrix metal, for copper  $\sigma_{TCu} = 68.5$  MPa;  $S_{CNT}$  is the CNT projection area,  $m^2$ ;  $\delta$  is the penetration depth of CNTs, m.

$$S_{CNT} = l \cdot d_{CNT} \quad (7)$$

Also, in the process of mechanical activation, energy is spent on the deformation of the particles of the metal matrix. The amount of energy for deformation of matrix particles can be calculated as follows:

$$E_{Cu} = n_{Cu} \cdot \sigma_{TCu} \cdot S_{Cu} \cdot \delta_{Cu} \quad (8)$$

where  $S_{Cu}$  is the projection area of a copper particle,  $m^2$ ;  $\delta_{Cu}$  is the value of deformation of copper particles,  $\mu m$ ;  $n_{Cu}$  is the number of matrix particles in the sample, pcs.

$$S_{Cu} = \frac{\pi \cdot d_{Cu}^2}{4} \quad (9)$$

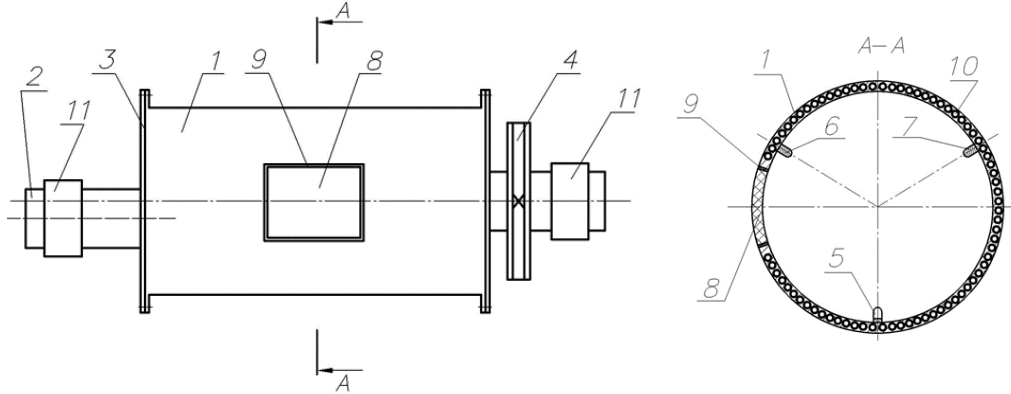
where  $d_{Cu}$  is the copper particle diameter, m.

The amount of energy supplied to the activated system per unit time [9]:

$$P = 0.5 \cdot K_a \cdot K_b^2 \cdot K_v \cdot m_b \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right)^3 \cdot R^2 \cdot N_b \quad (10)$$

where  $K_a$  is the coefficient depending on the elasticity of the impact;  $K_b$  is a constant that depends on the geometry of the working elements of the mixer-activator;  $K_v$  is a constant depending on the design features of the working chamber of the mixer-activator;  $m_b$  – mass of one active working body, kg;  $n$  – frequency of rotation of the working chamber,  $min^{-1}$ ;  $R$  is the radius of the circle of the working chamber of the mixer-activator, m;  $N_b$  – the number of active working bodies;  $t$  is the operating time of the mixer-activator, s.

The design of the mixer-activator is shown in Figure 1. This mixer-activator creates percussion effect, rolling, intensive mixing and activation of the surface of the initial components of the powder composite material under the action of vibration. As a result, a sufficiently uniform distribution of the nanosized filler in the metal micro-sized matrix is ensured [10].



1 – working chamber; 2 – axles; 3 – flanges; 4 – drive; 5–7 – ridges; 8 – cover;  
9 – sealant; 10 – heating elements; 11 – contact bushings

**Fig 1. Mixer-activator**

Thus, the energy calculation of the process of preliminary mechanical activation of copper-CNT powder systems showed that the amount of energy supplied depends on the rotation frequency and dimensions of the working chamber of the mixer-activator, the diameter and material of the active working bodies. Comparing the required amount of energy with the amount of energy supplied when using a mixer-activator, it is possible to calculate the time of mechanical activation:

$$t(n) = \frac{0.5n_{CNT} \cdot \left( \frac{A_H}{24} \cdot l \cdot d_{CNT}^{\frac{1}{2}} \cdot H^{-\frac{3}{2}} + \frac{A_H}{12} \cdot \frac{d_{CNT}}{H} \right) +}{0.5 \cdot K_a \cdot K_b^2 \cdot K_v \cdot m_b \cdot \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^3 \cdot R^2 \cdot N_b} + \frac{n_{CNT} \cdot \sigma_{TCu} \cdot S_{CNT} \cdot \delta + n_{Cu} \cdot \sigma_{TCu} \cdot S_{Cu} \cdot \delta_{Cu}}{0.5 \cdot K_a \cdot K_b^2 \cdot K_v \cdot m_b \cdot \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^3 \cdot R^2 \cdot N_b} \quad (11)$$

$$m_b = \frac{4\pi \cdot r_b \cdot \rho_b}{3} \quad (12)$$

where  $r_b$  is the radius of the working body, m;  $\rho_b$  is the density of the material of the working body of the mixer-activator, kg/m<sup>3</sup>.

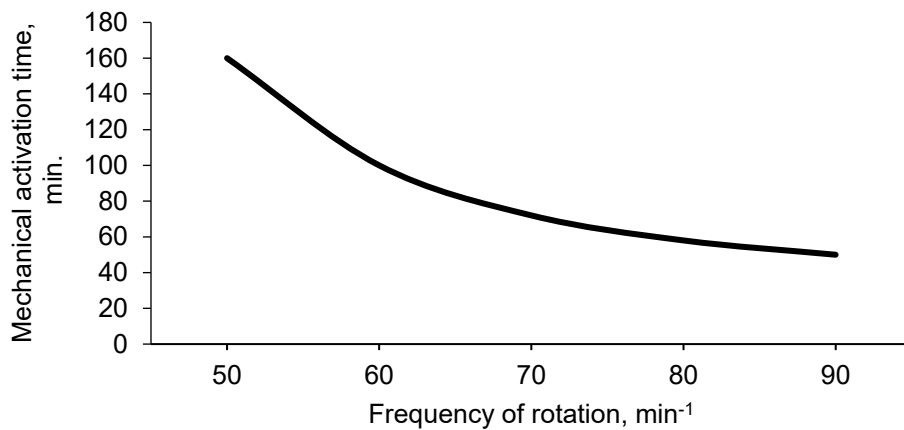
Border conditions:

$$\begin{aligned} H &\geq H_c \\ H &< d_{CNT} \\ \delta &\leq d_{CNT} \\ \delta_{Cu} &< d_{Cu} \\ n &\leq n_{cr} \end{aligned} \quad (13)$$

where  $n_{cr}$  – critical frequency of rotation of the working chamber, min<sup>-1</sup>.

Thus, a mathematical model of the distribution of carbon nanostructures in a powder metal matrix has been developed. The model is based on the ongoing physical processes at the technological stage of activation. This mathematical model takes into account the shape, size and properties of the initial dispersed components of various structural levels, the rotation frequency and design features of the working chamber of the mixer-activator. The developed model makes it possible to establish the optimal time of mechanical activation of a powder system of various masses, which is sufficient for the destruction of agglomerates of carbon nanostructures and their distribution in a powder metal matrix.

The analysis of the developed mathematical model made it possible to draw the following conclusions. For a composite system based on a copper matrix filled with 0.07 wt. % of CNTs, the amount of mechanical energy supplied over a period of 55 to 60 minutes at a frequency of rotation of the working chamber of the mixer-activator from 80 to 90  $\text{min}^{-1}$  is sufficient to destroy agglomerates and distribute CNTs in a metal matrix (Figure 2). In this case, the amount of energy supplied makes it possible to preserve the structure of the dendritic particles of the copper matrix.



**Fig 2. Dependence of mechanical activation time on the frequency of rotation of the working chamber of the mixer-activator**

Thus, when processing composite materials based on powder systems “copper – nanostructured filler” in the mixer-activator, simultaneous processes of destruction and reduction in the size of agglomerates of carbon nanostructures, distribution and fixation of filler nanoparticles in the surface layer and in the interdendritic space of powder particles of the metal matrix occur, which ultimately ensures an increase in the number of metal-to-metal contacts.

### **3. Conclusions**

A mathematical model of the process of mechanical activation of a powder mixture based on a metal matrix and carbon nanostructures has been developed. This model takes into account the processes of van der Waals interaction of carbon nanostructures, as well as the shape, dimensions, and physical and mechanical properties of the initial dispersed components of various structural levels, technological parameters of mechanical activation, and design features of the working chamber of the mixer-activator. The mathematical model, taking into account the criteria for the effective separation of agglomerates of carbon nanostructures and their distribution in the process of mixing nano- and micro-sized initial components of composite materials, makes it possible to determine the energy values of the van der Waals interaction of

carbon nanostructures, the energy values supplied by the mixer-activator at given technological parameters of mechanical activation, and also to predict the optimal time of mechanical activation of a powder system of various masses, sufficient for the destruction of agglomerates of carbon nanostructures and their distribution in a powder metal matrix.

Using the developed mathematical model, it was found that for a composite system based on a copper matrix filled with 0.07 wt. % of CNTs, the amount of mechanical energy supplied over a period of 55 to 60 min at a rotational speed of the working chamber of the mixer-activator from 80 to 90 min<sup>-1</sup> is sufficient to destroy agglomerates and distribute CNTs in a metal matrix.

## References

1. Chung D.D.L. Composite materials. Berlin, Springer, 2010, 368 p.
2. Hutchings I., Shipway Ph. Tribology: friction and wear of engineering materials. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2017, 412 p.
3. Pasovets V. N., Kovtun V. A., Pleskachevskiy Yu. M. Production, properties and safety of composites based on powder metals and carbon nanostructures. Gomel, BelGUT, 2011, 200 p.
4. Kovtun V., Pasovets V., Mirchev Y., Mihovski M. Research of the interaction energy of carbon nanotubes in the agglomeration process. International journal "NDT Days", 2022, vol. 3, iss. 2, pp. 72–79.
5. Hamaker H. C. The London van der Waals attraction between spherical particles. Physica, 1937, vol. 4, iss. 10, pp. 1058–1072.
6. Israelachvili J.N. Intermolecular and surface forces. London, Academic Press, 1992, 704 p.
7. Bhushan B., Fuchs H., Tomitori M. Applied scanning probe methods viii: scanning probe microscopy techniques. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 519 p.
8. Huang Y.Y., Terentjev E.M. Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties. Polymers, 2012, vol. 4, no 1, pp. 275–295.
9. Kovtun V., Pasovets V. Carbon nanostructures introduction into powder micro-sized copper matrix. 1st International Architectural Sciences and Application Symposium, Ankara, 27 – 29 October 2021; ed.: A. Gul, O. Demirel, S. Seydosoglu. Isparta, ISPEC Publishing House, 2021, pp. 588 – 596.
10. Kovtun V., Pasovets V. Mixer-activator. Patent BY 8201. Publ. 30.04.2012.



## Curing Monitoring in Metal-Polymer Structures by Laser-Induced Ultrasound

Vitaliy K. MERINOV<sup>1</sup>, Victor V. KOZHUSHKO<sup>1</sup>, Vladimir P. SERGIENKO<sup>1</sup>,  
Alexander R. ALEXIEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus  
e-mail: [vkozhushko@mail.ru](mailto:vkozhushko@mail.ru)

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

### Abstract

The possibilities of short ultrasonic pulses for measuring the transmission of layered metal-polymer structures and for monitoring the curing process in a polymer layer were demonstrated. Probing ultrasonic pulses were excited by means of optoacoustic conversion also known as laser ultrasound. The nanosecond laser operating in the Q-switched mode at a wavelength of 532 nm was employed. The absorption of optical radiation in a thin near-surface layer creates thermoelastic stresses, as a result of which a longitudinal pulse was excited with a pronounced compression phase and a broadband spectrum covering the frequencies range from 0.5 MHz to 50 MHz. Ultrasonic pulses passed through the layered structure and were detected by a broadband piezoelectric transducer from the opposite side of sandwich structure. The sensitive element of the transducer was made of a polarized film of polyvinylidene fluoride (PVDF) with a thickness of 25 μm and a diameter of 3 mm.

**Keywords:** Laser-induced ultrasound, time of flight, epoxy resin, aerospace, layered sandwich structure

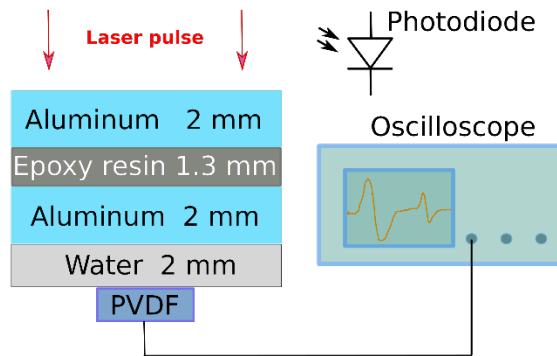
## 1. Introduction

Metal-polymer layered structures allow reduce weight and vibration of construction that is crucial for aerospace applications. The curing time is an important parameter of sandwich technology. During the hardening, the physical and mechanical properties of the polymer component are changing, in particular, the rigidity, which affects the speed of ultrasound and therefore the time of propagation of elastic pulses through the layer of adhesive. Measurement of the characteristics of ultrasound transmission by such a structure can be used to solve the tasks of quality control of adhesive joints and monitoring the process of resin polymerization. This paper suggests the solution by means of laser-induced ultrasonic pulses. The excitation of short-time probe ultrasound is carried out by ten nanosecond laser pulses illuminating the metal surface of the sandwich structure. The detection of the transmitted ultrasound has been done by a piezoelectric PVDF film transducer. This approach allowed non-contact excitation of broadband ultrasonic pulses and analysis with high temporal resolution, while the pressure pulses can be measured by cost effective traditional contact or immersion methods in comparison with all-optical technique [1-3].

## 2. Experiment

The metal-polymer structure comprised of two D16 (Russian notation) aluminum plates and a adhesive layer of two-component epoxy glue Scotch (3M, Taiwan). The thickness of the aluminum layers is 2 mm, the epoxy layer has been placed between aluminum plates separated by a steel washer with an internal diameter of 8 mm and a thickness of 1.3 mm that fixed the distance between the plates. The curing of epoxy occurred at room temperature of 22 °C during

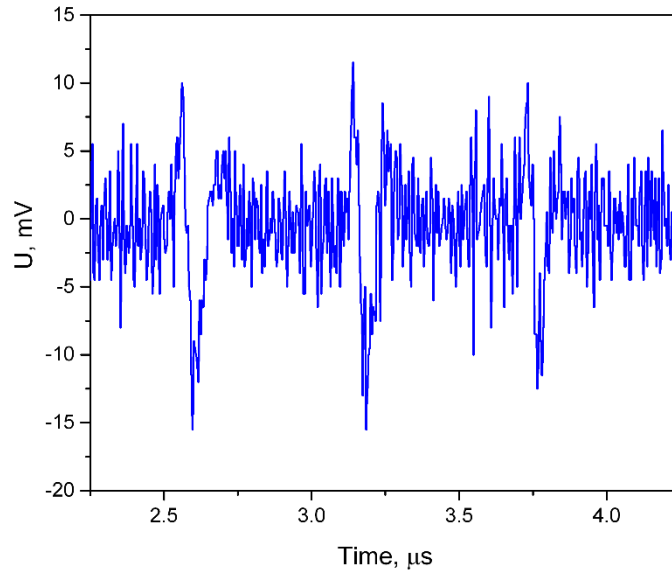
the experiment. The measurement of laser-induced ultrasonic pulses is carried out by the immersion method according to the shadow scheme shown in Fig. 1.



**Fig. 1. Scheme of experimental arrangement**

The radiation of an LS-2131M-10 laser (Lotis TII, Belarus) operating in the Q-switched mode illuminated the upper aluminum plate. The energy of a single laser pulse was 20 mJ, and the duration was  $< 12$  ns. The power density of laser radiation did not exceed  $10 \text{ MW/cm}^2$ , which corresponded to the thermoelastic regime of ultrasound excitation [2]. Absorption of the laser radiation with a wavelength of 532 nm in the metal occurred over the area of the light spot at a depth of no more than a few tens of nanometers that led to local heating of the near-surface volume. During the laser pulse heat penetrated into the bulk of aluminum to a depth of approximately  $1 \mu\text{m}$ , the estimated temperature raise is above  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fast heating induced expansion and thermoelastic stresses, the relaxation of which caused ultrasonic pulse. Without radiation focusing in the thermoelastic mode of optoacoustic conversion, longitudinal waves are excited most efficiently compared to shear, surface and guide waves. In the experiments, the diameter of the laser spot was 5 mm, the diameter of the sensitive element of the piezoelectric transducer was 3 mm that allowed to neglect the influence of diffraction during the propagation through the sandwich structure. The excited ultrasonic pulse possesses pronounced compression phase of about several tens of nanoseconds duration that provides high temporal resolution for velocity measurement tasks. An excited probing pressure pulse propagated to the rear side of the layered structure. A layer of 2 mm thick distilled water between the structure and the piezoelectric transducer provided acoustic contact. The transducer operates only as receiver of ultrasound. The transducer is based on  $25 \mu\text{m}$  thick polarized polyvinylidene fluoride (PVDF) film (Piezotech, USA). The construction of transducer allowed broadband detection of ultrasonic pulse. The preamplifier was built into the transducer housing operated in short-circuit mode that ensured registration of the frequencies with an upper limit reaching 90 MHz [4].

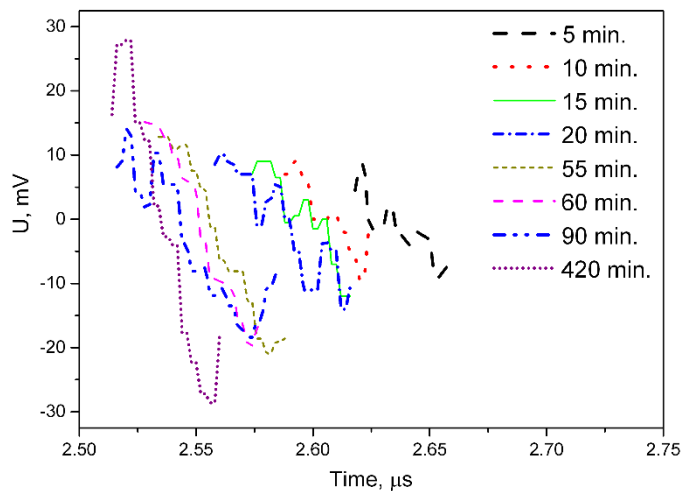
The pulses were recorded using a DS1104Z digital storage oscilloscope (Rigol, China), with its two channels involved, the digitization frequency was 500 MHz. The oscilloscope was triggered by the rising edge of the electrical signal of PIN photodiode S5971 (Hamamatsu, Japan), which determined the moment of irradiation of the metal surface and provided the beginning of time interval of ultrasound propagation through the sandwich structure and water layer to the PVDF receiver. An example of the signal measured 30 min. after start of experiment is presented in Fig. 2.



**Fig. 2. Ultrasonic signal measured 30 min. after curing start**

In the course of the experiment, for a sequence of measured optoacoustic signals, the energy of laser pulses was fixed at a level of 20 mJ, which provided conditions for stable excitation of ultrasound in aluminum. The curing of the epoxy causes an increase of its elastic moduli and acoustic impedance of the material. The determination of the degree of change in the mechanical characteristics of the resin during polymerization was carried out by the propagation time of ultrasonic pulses through the sandwich structure. The measurements of the transmitted ultrasonic signals were carried out with a variable time interval.

As it is shown in Fig. 2 the profile of detected pressure pulse yielded a bipolar form, starting with a positive and ending with a negative peak with a characteristic descending edge between them. The travel time of ultrasound through the layered structure was determined from the midpoint of the descending front of the pressure pulse. The dependencies obtained for the aluminum / epoxy resin / aluminum structure are collected in Fig. 3, where for the clarity only parts of the signals overlapping the first falling fronts are shown.



**Fig. 3. The sequence of the first falling frons of ultrasonic pulses during epoxy resin curing**

The time of arrival of the first registered pulse in a series of measurements was used. The onset of measurements was 5 minutes after the production of the sandwich structure, the next

time is on the right in Fig. 3. The falling front of the first measurement is located before 2.65  $\mu$ s, the peak-to-peak amplitude of the pulse is a bit less than 20 mV. The arrival time shifts to the left and the peak-to-peak amplitude exceeds 20 mV after 30 min. An hour later, there is the further increase of the peak-to-peak amplitude up to 35 mV. The signal recorded after 7 hours has the peak-to-peak amplitude of approximately 60 mV. So the falling fronts of pressure pulses gradually shift to the left side of time axis with an increase of peak-to-peak amplitude, that is explained by a changes of the mechanical properties of the epoxy resin.

The reference value of the cured epoxy ultrasound speed is 2.5 km/s. Based on the results of the measured sequence, a decrease in the arrival time of the falling front of the first pulse by 100 ns was established. As the thickness of epoxy layer is known the estimated ultrasound velocity in the liquid uncured resin is approximately equal to 2.0 km/s. Polymerization increases the speed due to the hardening of resin and growing stiffness. The velocity also affects the acoustic impedance, which is a product of density and speed of ultrasound in the material. Reference value of aluminum acoustic impedance is approximately  $17 \times 10^6$  Pa s/m, impedance of cured epoxy resin and water are  $2.95 \times 10^6$  Pa s/m and  $1.49 \times 10^6$  Pa s/m, respectively [5]. The increasing of the resin impedance reduced the transition loss across the aluminum / epoxy resin / aluminum interfaces.

### 3. Conclusions

Thus, it is shown that the measurement of the amplitude dependence of laser-induced ultrasonic pulses makes it possible to monitor the curing process of the inner epoxy resin layer of sandwich structures via the decrease of arriving time which is defined by elastic properties of polymer. The suggested experimental arrangement can be applied to optimize the technology of metal-polymer sandwich structures and to developed nondestructive method to assess the mechanical properties of the adhesive layers and the quality of adhesive joints.

### Acknowledgments

This research was supported by program “BRFFR-MIDRU-2022”, grant T22UZB-069.

### References

1. Zhang Y. et al. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic. *Measurement*, Vol. 158, 107737, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107737
2. Meng J. et al. Laser ultrasonic inspection for mechanical properties of materials at high temperature. *J. Appl. Phys.*, Vol. 134, 053101, 2023, doi: 10.1063/5.0147615
3. Haderer W. et al. Spatial imaging of stratified heterogeneous microstructures: determination of the hardness penetration depth in thermally treated steel parts by laser ultrasound. *NDT & E Inter.*, Vol. 138, 2023, doi: 10.1016/j.ndteint.2023.102868
4. Kozhushko V.V., Paltauf G., Krenn H. Hysteresis-like attenuation of ultrasound in severely plastically deformed nickel. *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 278, No. 1, 2011. pp. 012012-1-4. doi: 10.1088/1742-6596/278/1/012012
5. Fu Y., Kabir I. I., Yeoh G. H., Peng Z. A review on polymer-based materials for underwater sound absorption. *Polymer Testing*, Vol. 96, 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107115



## Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components

Iuliia LYSENKO<sup>1</sup>, Yordan MIRCHEV<sup>2</sup>, Oleksandr LEVCHENKO<sup>1</sup>,  
Yurii KUTS<sup>1</sup>, Valentyn UCHANIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine,  
[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: [nntdd@abv.bg](mailto:nntdd@abv.bg)

<sup>3</sup> Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine,  
e-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

### Abstract

This article examines the potential of Eddy Current Array (ECA) as a non-destructive testing (NDT) technique for aviation components. Experimental investigations were conducted using a specially prepared sample with various defects. The scanning results demonstrated ECA's enhanced detection sensitivity, high inspection speed, and ability to characterize defects. The study emphasizes the need to optimize the inspection process and utilize automated subsystems for signal filtration and result evaluation. The findings support the adoption of ECA as an effective NDT technique in the aviation industry, contributing to improved safety and reliability. This research provides valuable insights for the development of guidelines and standards, enhancing the overall efficiency of aviation inspections.

**Keywords:** Eddy Current Array, non-destructive testing, aviation components, defect detection, inspection process optimization, reliability

## 1. Introduction

The aviation industry demands high levels of safety and reliability, making effective inspection and evaluation of components a critical aspect of maintenance and quality control processes. Detecting defects in aviation components is of paramount importance to prevent catastrophic failures and ensure the optimal performance of aircraft systems. Traditional inspection methods, such as visual examination and manual testing, have limitations in terms of accuracy, efficiency, and the ability to detect hidden defects. As a result, there is a growing need for advanced non-destructive testing (NDT) techniques that can provide more accurate and reliable defect detection capabilities [1, 2].

One such advanced NDT technique that has gained significant attention and recognition in recent years is the Eddy Current Array (ECA) inspection method [1, 3]. ECA offers numerous advantages over conventional techniques, making it an attractive solution for the detection and evaluation of defects in aviation components. This article aims to explore the advantages and potential of ECA in enhancing the safety and reliability of aviation systems.

Advantages of Using Eddy Current Array:

- Enhanced Detection Sensitivity: ECA combines multiple closely spaced coils in an array, allowing for improved coverage and increased sensitivity to small defects. This enables the detection of defects that may go unnoticed by traditional inspection methods, enhancing the overall effectiveness of inspections [4].
- High Inspection Speed: ECA's ability to simultaneously scan multiple channels and collect data in a single pass significantly reduces inspection time. It offers faster

inspection rates, making it suitable for large-scale inspection campaigns and reducing aircraft downtime during maintenance [5].

- Defect Characterization: ECA provides information about the size, shape, and orientation of detected defects. By analyzing the amplitude and phase information from the collected signals, it is possible to accurately characterize the nature of the detected defects, aiding in their evaluation and subsequent decision-making processes [6].
- Quantitative Data Analysis: ECA produces digital data that can be processed and analyzed using advanced algorithms. This allows for quantitative assessment and precise evaluation of defect characteristics, enabling engineers and inspectors to make informed decisions regarding the acceptability and repair strategies for aviation components [7].
- Surface and Subsurface Defect Detection: ECA is capable of detecting defects both on the surface and within the subsurface of aviation components. This makes it effective for identifying cracks, corrosion, delaminations, and other hidden defects that may compromise the structural integrity of the components [6, 8].

To validate and further explore the advantages of Eddy Current Array for the detection and evaluation of defects in aviation components, experimental investigations have been conducted. These experiments involve the use of specially prepared sample with known defects, representing typical flaws that may occur in aviation components.

## 2. Experimental Preparation

### 2.1 ECA system

Eddy current array technology is known for its ability to drive multiple eddy current sensors positioned side by side in the same probe assembly [9]. This enables ECA to inspect large surface areas in a single pass, maintaining high resolution and improving both inspection speed and the probability of detection [10]. The results can be displayed using color-coded mapping (C-scan), which enhances inspection performance and analysis. An ECA system consists of three fundamental components: an instrument, software, and a probe.

In this study, the Olympus Omniscan MX eddy current flaw detector with an ECA probe (Fig. 1) was used. The employed ECA probe is of the flexible type, made of a PCB-based film, and consists of 32 coils, each with a diameter of 3 mm. The probe used in the probe is of the absolute type.



Fig. 1. ECA probe

The used flaw detector allowed for the control of the matrix sensors using a multiplexing pattern to avoid mutual inductance. It was also equipped with specialized software for creating C-scans and displaying the signals as a hodograph.

## 2.2 Testing object

Before the experiment, a sample made of the aluminum alloy 31T5 (AD31T5), commonly used in the aviation industry, was prepared. The sample has artificially created defects of various configurations and sizes. Fig. 2 showcases the prepared sample with the following dimensions: a length of 360mm, a width of 120mm, and a thickness of 5mm. This sample contains two types of defects: longitudinal crack-type defects (1-4 on Fig. 2) and circular defects with varying cluster densities (5-12 on Fig.2, Fig. 3a and 3b).

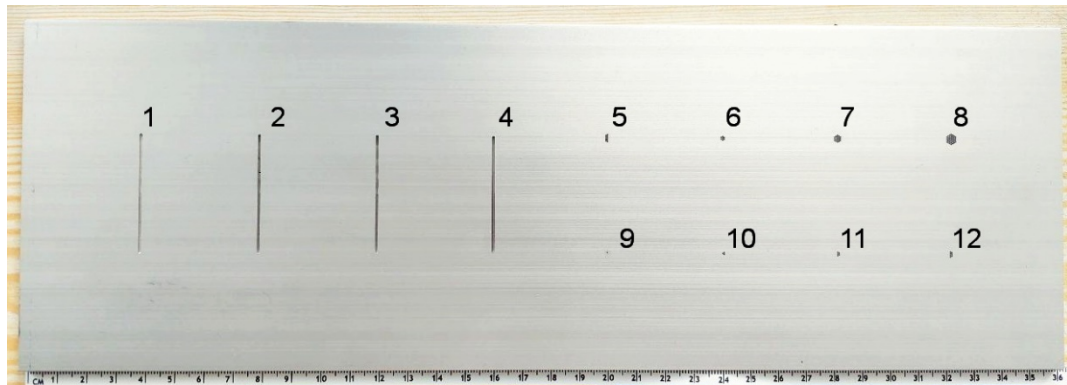


Fig. 2. Sample made of AD31T5 alloy (1 – 12: defects of various types and sizes)

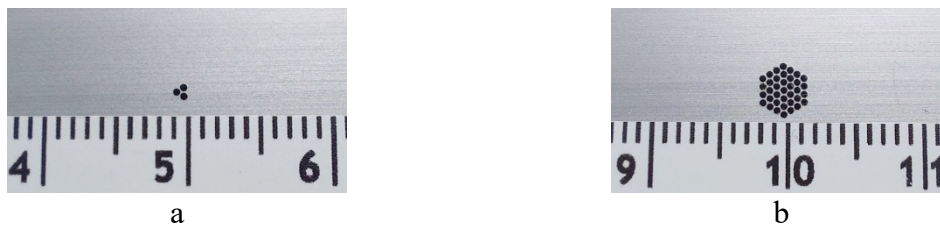
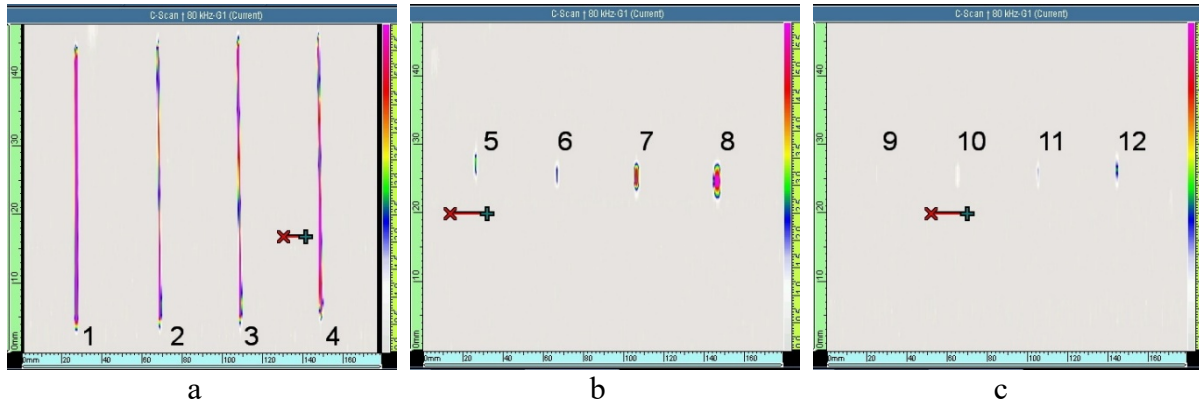


Fig. 3. Circular defects of varying cluster densities in sample (a – defect №10, b – defect №8)

The longitudinal defects have a width ( $B$ ) of 1mm and penetrate the material with depths ( $h$ ) ranging from 1mm to 4mm. The circular defects have a depth ( $h_d$ ) of 4mm and a diameter ( $d$ ) of 0.5mm. These circular defects are positioned in different cluster densities adjacent to each other. However, it is worth noting that some sizes may be too small for testing using the available eddy current array equipment.

## 3. Result and discussions

The scanning results in the form of C-scans for parts of the sample are presented in Fig. 4 (for convenience, the scanning results are divided into three zones and the defect numbering from Fig. 2 is used). The following settings were used during the scanning process: scanning frequency of 80 kHz, excitation coils signal amplitude of 1 V and gain of 78 dB.



**Fig. 4. Scanning results in the form of C-scans for sample sections**

As seen from Fig. 4, the color representation of defects 9 and 10 (Fig. 4c) is least noticeable with the given scanning settings. Detecting defect 9, which is represented by a single hole with a diameter of 0.5 mm, is challenging without prior adjustment and calibration of the matrix transducer, indicating the necessity of selecting an optimal scanning mode for defects of such size. Additionally, the settings for displaying the results are also important, as adjusting the sensitivity level using the color scale can enhance the visualization of such defects, but there is a risk of noise and interference affecting the results.

#### **4. Conclusion**

The experimental data obtained from these studies provide valuable insights into the performance, reliability, and limitations of ECA, supporting its adoption as an effective non-destructive testing (NDT) technique in the aviation industry. Through the analysis of experimental results and the examination of various parameters' influence on inspection outcomes, the necessity of optimizing the inspection process and enhancing the capabilities of ECA for aviation component inspections is demonstrated. The findings from these experiments contribute to the development of guidelines, best practices, and standards for the application of ECA in the aviation sector.

In conclusion, the advantages offered by Eddy Current Array make it a promising technology for the detection and evaluation of defects in aviation components. Through experimental investigations and research, the capabilities of ECA can be further utilized, leading to improved safety, reliability, and efficiency in the aviation industry. The results of these studies prompt the exploration of signal-filtering possibilities at different stages of working with measurement outcomes. Additionally, considering the implementation of automated subsystems for selecting filter modes based on the evaluation of filtered results is worthwhile.

#### **Acknowledgements**

This work has been accomplished with financial support by the Grant № BG05M20P001-1.002-0011 “Establishment and development of a Center for Competence in Mechatronics and Clean Technologies MIRACle (mecha-tronics, innovation, robotics, automation, clean technologies)”, financed by the Science and Education for Smart Growth Operational Program (2014-2020) and co-financed by the European Union through the European Structural and Investment Funds.

## References

1. Goldfine N., Eddy Current Arrays for Structural Health Monitoring. Comprehensive Structural Integrity (Second Edition), Elsevier, 2023, pp. 265-278.
2. Lysenko, I., Uchanin, V., Petryk, V., Kuts, Y., Protasov, A. and Alexiev, A. (2022). Intelligent Automated Eddy Current System for Monitoring the Aircraft Structure Condition. 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, pp. 1-5.
3. Lysenko I., Kuts Y., Uchanin V., Protasov A., Petryk V. and Alexiev A. “Using the Pulsed Eddy Current Techniques for Monitoring the Aircraft Structure Condition”, Transactions on Aerospace Research, vol.2023, no.1, 2023, pp.22-31.
4. Allard A.-M., Grenier M., Sirois M., Wassink C. Understanding Eddy Current Array for High-Performance Inspections. Materials Evaluation, no. 79, 2021, pp. 940-947.
5. Gilles-Pascaud, C.; Lorecki B.; Pierantoni, M. Eddy current array probe development for non-destructive testing. 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada Aug 30 – Sep 3, 2004.
6. Thibault, S., & Maldague, X. (2013). Advanced eddy current array technology for surface crack detection. In Proceedings of the 8th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing (ICBNMT) (pp. 1-8).
7. Hocking, J. G. (2012). Eddy current inspection of complex components: The problem of signal interference. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 54(4), 203-206.
8. Uchanin, V. M. and Ivashchenko, K. A. (2021). Detection of defects of structures from ferromagnetic steel through the layer of anticorrosion cover without removal [in Ukrainian]. Methods and devices of quality control, 1(46), 5-14.
9. Lamarre A. Eddy Current Array Technology Serves a Variety of Industries [Electronic resource] / Andre Lamarre // Quality magazine. – 2015. – Mode of access: <https://www.qualitymag.com/articles/92427-eddy-current-array-technology-serves-a-variety-of-industries>.
10. Lysenko I., Kuts Y., Mirchev Y., Levchenko O. Reviewing challenges in the application of eddy current arrays and their impact on NDT efficiency. Integrated Intelligent Robotic Technology Complexes (IIRTC-2023), 16th International Scientific-Practical Conference, May 23-24, 2023, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: NAU, 2023. – pp. 91-92.



## Technological Processes for Wire Arc Additive Manufacturing

Vladimir PETKOV, Manahil TONGOV, Marina MANILOVA,  
Radostina ZAEKOVA, Valentin ANGUELOV

Institute of Metal Science, Equipment And Technology With Hydroaerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”  
at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,

e-mails: [vladimir2pe@yahoo.com](mailto:vladimir2pe@yahoo.com), [tongov.tu@gmail.com](mailto:tongov.tu@gmail.com), [mamanil@abv.bg](mailto:mamanil@abv.bg), [rzaekova@mail.bg](mailto:rzaekova@mail.bg),  
[valentin.anguelov@ims.bas.bg](mailto:valentin.anguelov@ims.bas.bg)

### Abstract

One of the most used technologies that has been rapidly developing in recent years is related to the application of 3D printing. Layer by layer building of details through selective remelting or sintering processes is based on different welding (or similar) processes. Metals, polymers and ceramics in the form of powder or wire are used as materials for additive manufacturing. Of the high concentrated heat sources the most commonly used are the laser beam, the electron beam and the plasma arc.

**Keywords:** additive manufacturing, processes, selective melting, electron beam, laser, plasma arc.

## Технологични процеси за послойно изграждане на детайли

Владимир ПЕТКОВ, Манахил ТОНГОВ, Марина МАНИЛОВА,  
Радостина ЗАЕКОВА, Валентин АНГЕЛОВ

### 1. Увод

Технологичните процеси, които се използват за послойно изграждане на детайли не могат да останат встрани от проблемите, рефлектиращи върху енергийната ефективност, които следва да бъдат решавани независимо от напредъка в технологичното и обществено развитие. Заваръчните технологични процеси, в частност ориентираните към нанасяне на слоеве, които са в основата на посочените технологични варианти, не правят изключение в това отношение. При нанасянето на слоеве чрез претопяване на добавъчния материал количеството използвана енергия за единица обем (или маса) наварен метал както и количеството енергия влагана в изделието е силно зависима от използвания метод. Друга важна характеристика на процеса е неговата производителност – количеството нанесен метал за единица време. По отношение на топлинното въздействие върху получаваният или обработван детайл най-добри резултати дават лъчевите и плазмените методи. Лъчевите методи имат предимство, че лесно може да се регулира фокусирането и не оказват газодинамично въздействие върху обработвания материал, което ги прави подходящи при прахообразен добавъчен материал. Плазмената дъга създава възможност за постигането на по-висока производителност от гледна точка на количеството стопен метал за единица време. В същото време въпросът с управляването на нейното фокусиране не е решен. Успоредно с това процесите в дъгата водят до съществено газодинамично налягане върху обработвания материал. Това затруднява използването на прахообразни добавъчни материали. При използването на добавъчни материали под формата на тел предимствата на плазмените технологии са съществени поради по-големият размер на петното на

нагриване и очевидната възможност за изключване на получаваният детайл (или обработваната повърхнина) от електрическата верига (използва се непряка дъга) в резултат, на което съществено намалява дълбочината на провара. От друга страна по-точното познаване на енергийните характеристики на топлинния източник и тяхната зависимост от параметрите на процеса дава възможност за по-ефикасно използване на технологичната адаптация (промяна на технологичните параметри на процеса на заваряване, в зависимост от моментното състояние и пространственото положение на обработваната повърхнина по време на реализиране на процеса), която навлиза широко в практиката чрез роботизираните системи. Трябва да се отбележи, че въпреки огромните усилия на изследователите, работещи в областта на заваръчните и сродни на заваряването процеси, все още механизмът на разпределение на енергията на топлинния източник не е напълно изяснен. Използването на експериментални и изчислителни (на основата на математическо и симулационно моделиране) методи дава възможност, както за по-задълбочено познаване на процесите и протичащите физични явления при селективно плазмено претопяване, така и за получаването на резултати, приложими в етапа на проектиране на технологичния процес и при самото му реализиране.

## 2. Състояние на изследванията по проблема

Днес се наблюдава огромен интерес към процесите на адиятивното производство (технологии за триизмерно отпечатване). Очаква се тези процеси коренно да променят начина и организацията на промишленото производство. В основата на тези очаквания са компютърното проектиране; възможността за изработване на детайли, които е трудно или невъзможно да бъдат изработени по друг начин; изработването на детайли непосредствено при потребителя; универсалност по отношение на формата на детайлите; преразпределяне на производството от големи към малки предприятия; понижаване на енергийните разходи и по такъв начин намаляване на въздействието върху околната среда. Всички тези методи [1]÷[5] имат една обща черта – послойно изграждане на детайла и отпадане на необходимостта от използването на различно технологично оборудване и планирането на множество последователни технологични операции. Засега изработването на детайли на конкурентни цени е насочено главно към тези, за които са приложими полимерни материали (обикновено термопласти) [6]. Детайлите от метали и сплави все още трудно достигат характеристиките на получаваните чрез конвенционални технологии. Това означава, че са необходими задълбочени научни изследвания в тази област. Класификация на основните използвани методи за изграждане на детайли от метали и сплави е показана на фиг. 1.

Едни от първите технологични процеси, изследвани по отношение на приложимостта им за изграждане на триизмерни детайли от метали и сплави, са селективното лазерно (Selective Laser Melting – SLM) и електроннолъчево (Electron-Beam Melting – EBM) претопяване (СЛП и СЕЛП, респективно) [4]÷[7]. Впоследствие приложение намират електродъговите ([7]÷[17]) и плазмените ([18]÷[22]) методи. Процесите на СЛП вече се използват за производството на метални изделия [23]. Тези процеси дават възможност за получаване на продукти чрез стопяване на прахообразна смес от различни метали и сплави с последваща кристализация на стопилката. Предимствата са висока степен на детайлизиране на получаваният продукт, висока плътност (до 99%), както и точност от порядъка на  $\pm 5$  микрона. В същото време СЛП има редица ограничения: необходимостта от използване на скъпо оборудване; високи експлоатационни разходи; високи енергийни разходи; ниска производителност (обикновено не повече от  $10 \text{ [cm}^3/\text{h]}$ ); използване на скъпи добавъчни материали с високи изисквания по отношение на гранометричния и химичния състав, динамичния

вискозитет и други характеристики; недостатъчно високи якостни характеристики на получаваните изделия (в сравнение с конвенционалните технологии).



Фиг. 1. Класификация на методите за изграждане на детайли от метали и сплави.

В редица изследователски центрове (главно в САЩ – например изследователския център на НАСА в Ленгли (Хюстън) и космическия център Джонсън (Хамптън) [23]) се разработват процеси с използване на електронен лъч: изработване на изделия с произволна форма (Electron beam freeform fabrication – EBF3) и електроннолъчево претопяване (Electron-Beam Melting – EBM). При технологията за изработване на детайли с произволна форма електронният лъч се използва като източник на енергия за топене на добавъчен материал под формата на тел. Демонстрирани са резултати при алуминиеви и титанови сплави, представляващи интерес за космическа индустрия [23]. Има възможност за използването на сплави на основата на никел и желязо. Използването на технологията в други индустрии се ограничава от относително скъпата апаратура, високата цена на продукта, ограниченията за размерите на обработваните детайли и др.

В [23] е дадена следната хронология на опитите за използване на заваръчни технологии за получаване на триизмерни метални конструкции със сложни форми по метода на послойно изграждане на детайла или част от него:

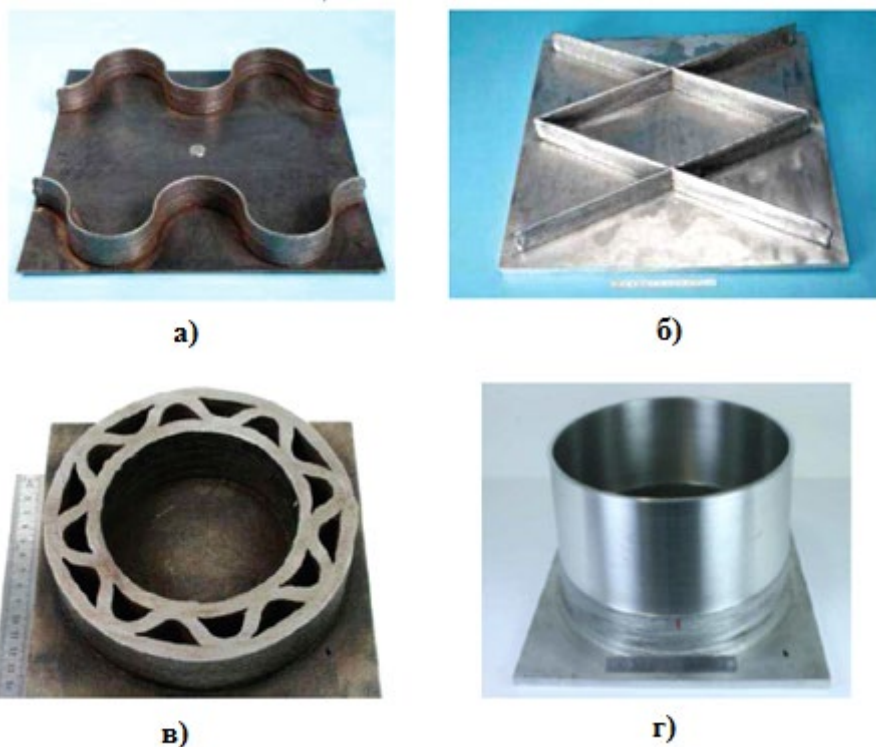
- 1926 г. – патентовано е „използването на електрическа дъга като източник на топлина за получаване на обемни предмети чрез пръскане на разтопен метал в нанасяните слоеве“;
- 1971 г.– произведен е съд за високо налягане с използването на електродъгово заваряване (Mitsubishi, Япония), електрошлакова и ВИГ технология за получаване на продукт с функционално градиентни стени;
- 1983 г. – в САЩ се използва фасонно заваряване (комбиниран процес на заваряване и пластично деформиране) (Shape Welding) за производството на

големи по размер изделия от високолегирана стомана ( $20MnMoNi5$ ) с тегло 79 тона;

- 1993 г. – в САЩ е патентована комбинирана технология за наваряване и фрезозане на машина с ЦПУ (Shape Deposition Manufacturing – SDM);
- 1994–99 г. – разработена е технология за фасонно наваряване (Shaped Metal Deposition – SMD) за производство на корпуси на двигатели за корпорацията Rolls Royce (Великобритания).

В Германия през 60-те години са провеждани изследвания за създаване на триизмерни метални конструкции с помощта на фасонно заваряване. Въз основа на този процес компании като Krupp и Thyssen са организирали производството на големи части с проста геометрия, например съдове под налягане с тегло до 500 тона [23]. Компанията Babcock & Wilcox (САЩ) прилага процеса на „топене с пресоване“ (Shape Melting) за производство на големи метални конструкции и изделия от аустенитни стомани [7]. Понастоящем Rolls-Royce Corporation (Великобритания) работи върху използването на електродъгово заваряване, за да увеличи производителността на формоването и да намали нивото на отпадъци при производството на продукти от скъпи сплави [23]. Тази технология е успешно внедрена за производството на различни части за самолети от сплави на основата на никел и титан.

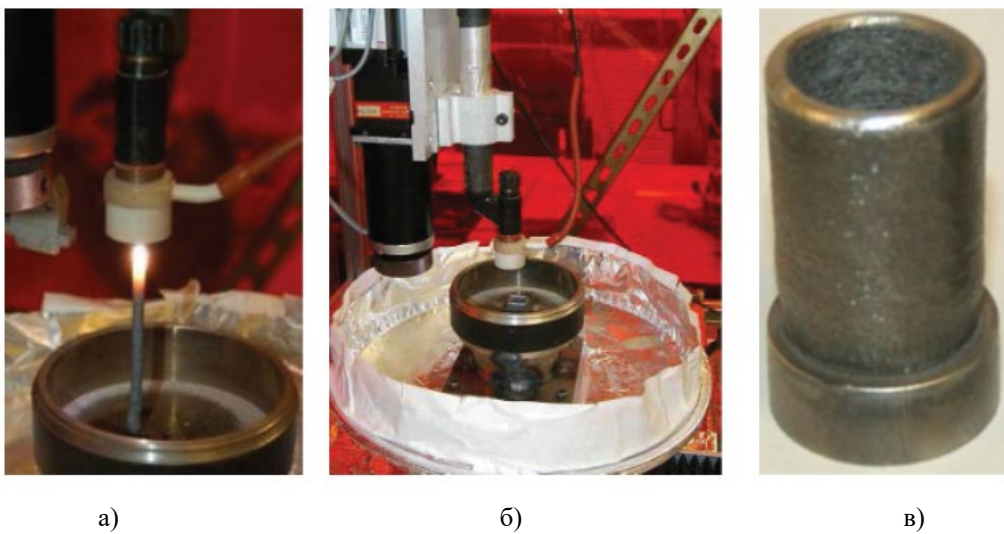
Чрез електродъгово наваряване с тел (Welding Arc Additive Manufacturing – WAAM) се изработват детайли от различни материали – конструкционни нисковъглеродни стомани [10], алуминиеви сплави [4] и др. (фиг. 2 и фиг. 3). За реализирането на процеса може да бъде изработено специализирано заваръчно оборудване [11].



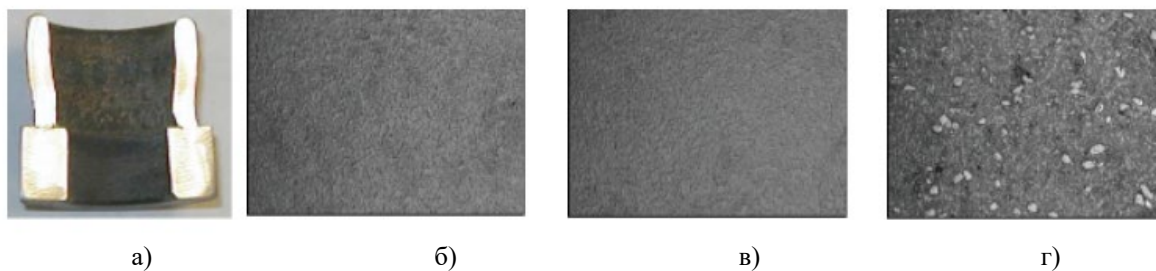
**Фиг.2.** Детайли, получени чрез електродъгови технологии. Изграждане на ребра на панели от въглеродна стомана (а, б и в) и алуминиева сплав (г).



**Фиг. 3. Триизмерни детайли, получени чрез електродъгова технология с 3D-принтера Value Arc MA5000-S1 (Япония) [23]: детайли от въглеродна стомана (а), алуминий (б) и титан (в) без механично обработване; детайл от титан след механично обработване (г).**



**Фиг. 4. Микроплазмено изграждане на триизмерни детайли с използването на добавъчен материал под формата на прах [23]. Реализиране на процеса (а) с лабораторната апаратура (б); получен кух цилиндър от инструментална стомана (в).**



**Фиг. 5. Микроплазмено изграждане на триизмерни детайли с използването на добавъчен материал под формата на прах [23]. Напречно сечение на полученият цилиндър (а) и структура на метала в горната (б), средната (в) и долната (г) част на цилиндъра.**

През последните години се проучват възможностите за използване на плазмени технологии за изграждане на триизмерни обекти. Като пример може да се посочат резултатите от изследвания в Тексас, САЩ (Southern Methodist University) на процеса на послойно изграждане на детайли с използването на прахообразен добавъчен материал и микроплазмен процес на претопяване [23] (фиг. 4). Показана е възможност за получаване на градиентни композитни структури по този метод (фиг. 5). Плазмен процес за получаване на детайли с градиент на свойствата е изследван и в Аахен (Германия) [18]. Добавъчният материал е под формата на тел и се използват телове с различен химичен състав.

### 3. Заключение

Анализираните литературни източници за изграждане на триизмерни детайли чрез електродъгови процеси (главно МИГ/МАГ и ВИГ) изучават предимно възможностите за тяхната реализация. Основните предимства на тези процеси: относително ниска цена; достъпност на технологията; осигуряване на добри условия за физико-металургичните процеси; ефективна локална защита на заваръчната вана; висока производителност на претопяване на добавъчния материал. Недостатъците на разглежданите процеси включват: значителния размер на зоната на термично влияние; големият размер на изграждащия слой; формиране на временни и остатъчни напрежения; понижена гъвкавост по отношение на химичния състав при използване на плътни електродни телове. Технологиите за плазмено претопяване с пряка дъга (РТА) имат по-широки технологични възможности [11]. Използването на тези технологии за производство на триизмерни метални предмети вместо МИГ/МАГ и ВИГ процеси може да намали или премахне някои от посочените недостатъци. Това означава, че с напредването на изследванията в областта на плазмените технологии тяхната приложимост за изграждане на триизмерни обекти ще нараства.

#### Благодарности

Тази разработка е направена с финансовата подкрепа на проект КП-06-Н57/10 към ФНИ.

#### Литература

1. Melecio, J.I., Mohammed, A., Schofield, N., Djurovic, S., 3D-Printed rapid prototype rigs for surface mounted PM rotor controlled segment magnetisation and, assembly, (2019) 2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019, 2019-January, art. no. 8785121, pp. 1830-1836. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785121

2. Withers, J.C., Pickard, S.M., Additive manufacturing to produce standard and custom alloy titanium, (2017) Minerals, Metals and Materials Series, Part F6, pp. 81-89.
3. Korzhyk, V., Khaskin, V., Voitenko, O., Sydorets, V., Dolianovskaia, O., Welding technology in additive manufacturing processes of 3D objects, (2017) Materials Science Forum, 906, pp. 121-130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121
4. Gu, J. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 651. – P. 18–26. doi: 10.1016/j.msea.2015.10.101
5. Hascoet, J.Y., Karunakaran, K.P., Marya, S., Additive manufacturing viewed from material science: State of the art & fundamentals, (2014) Materials Science Forum, 783-786, pp. 2284-2289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.783-786.2284
6. Bruce, M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing // M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. – Chicago, Illinois, USA, 2012. – P. 963–969.
7. Martina, F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing / F. Martina. – School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. – 178 p.
8. Williams, S. W. Wire + Arc Additive Manufacturing / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32, Issue 7. – P. 641–647. doi: 10.1179/1743284715y.0000000073
9. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology / P. Colegrove, S. Williams. – Cranfield University, 2013. – 42 p. – Available at: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
10. Wang, F. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V / F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, A. A. Antonysamy // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2012. – Vol. 44, Issue 2. – P. 968–977. doi: 10.1007/s11661-012-1444-6
11. Ding, J. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture / J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, M. R. Palt // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 226. – P. 99–105. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005
12. Donoghue, J. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V / J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, P. B. Prangnell // Materials Characterization. – 2016. – Vol. 114. – P. 103–114. doi: 10.1016/j.matchar.2016.02.001
13. Martina, F. Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components / F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, J. Meyer // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, Issue 12. – P. 6103–6118. doi: 10.1007/s11661-015-3172-1
14. Colegrove, P. A. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components / P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams et. al. // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 996. – P. 694–700. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.694
15. Zahid, M., Hai, K., Khan, M., Shekha, A., Pervaiz, S., Ali, S.M., Abdul-Latif, O., Salman, M., Wire arc additive manufacturing (WAAM): Reviewing technology, mechanical properties, applications, and challenges, (2020) ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2A-2020, art. no. V02AT02A042, DOI: 10.1115/IMECE2020-23961
16. Li, J.L.Z., Alkahari, M.R., Rosli, N.A.B., Hasan, R., Sudin, M.N., Ramli, F.R., Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing, (2019) International Journal of Automation Technology, 13 (3), pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
17. Haselhuhn, A.S., Wijnen, B., Anzalone, G.C., Sanders, P.G., Pearce, J.M., In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing, (2015) Journal of Materials Processing Technology, 226, pp. 50-59. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.038

18. Reisgen, U., Sharma, R., Oster, L., Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing, (2019) *Metals*, 9 (7), art. no. 745, DOI: 10.3390/met9070745
19. Alhuzaim, A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture / A. F. Alhuzaim. – Montana Tech of the University of Motana, 2014. – 246 p.
20. Korzhik, V. N. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review) / V. N. Korzhik, V. Y. Khaskin, A. A. Grinyuk, V. I. Tkachuk et. al. // *The Paton Welding Journal*. – 2016. – Vol. 2016, Issue 6. –P. 117–123. doi: 10.15407/tpwj2016.06.20
21. Korzhyk, V. Features of joint formation in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys [Text] / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grinyuk, O. Babych // *American Scientific Journal*. – 2016. – Issue 6. – P. 36–43.
22. Rosli, N.A., Alkahari, M.R., Ramli, F.R., Sudin, M.N., Maidin, S., Single layer formation of plasma based wire arc additive manufacturing, (2020) *International Journal on Engineering Applications*, 8 (3), pp. 89-95. DOI: 10.15866/irea.v8i3.17953
23. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O., Khaskin, V., Tkachuk, V., Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review), (2017) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1-87), pp. 42-52.



## **Analysis of the Causes of Low Impact Toughness in the Heat Affected Zone of AH36 Shipbuilding Steel Welded Joint after Submerged Arc Welding**

Lyudmil CHOLAKOV, Plamen PETROV

Technical University of Varna; Varna, Bulgaria,  
e-mails: [lcholakov0782@gmail.com](mailto:lcholakov0782@gmail.com), [petpl@abv.bg](mailto:petpl@abv.bg)

### **Abstract**

In this paper are analysed the causes of low impact toughness in the heat affected zone of welding ship steel under a flux layer. After verification tests for tensile, impact toughness and static bending mechanical characteristics, was found not to meet impact toughness requirements and the cause was determined.

**Keywords:** submerged arc welding,

## **Анализ на причините на малка ударна жилавост на в зоната на термично влияние на заварено съединение от корабостроителна стомана АН36 след подфлюсово заваряване**

Людмил ЧОЛАКОВ, Пламен ПЕТРОВ

### **1. Увод**

Световната корабостроителна индустрия в момента е доминирана от производството в далечния изток, като растежът на китайското и южнокорейското корабостроене сега изпреварва Запада. Корабостроителната индустрия в България включва малък брой корабостроителници, които изграждат специализирани кораби, включително влекачи, фериботи и плавателни съдове за бреговата охрана, както и кораби за риболов и проучвания/изследвания. Въпреки че има множество материали, използвани в корабостроенето, стоманата остава най-широко използваната. И има основателна причина: стоманата е достатъчно здрава, за да издържи на умората по време на целия експлоатационен период на кораба в открито море. В корабостроителната индустрия стоманата се категоризира по четири степени на якост: класове А, В, D, E.

### **2. Експериментална процедура**

В статията са анализирани резултати от контрола на образец заварен подфлюсово от корабостроителна стомана АН36 DNV GL RULES FOR CLASSIFICATION:SHIPS Pt.2 Ch.2, като поставената цел е да се установят причините за получените негативни резултати по някои от изискваните механични характеристики.

Използваната стомана попада в групата на конструкционни стомани с по-висока якост с минимална граница на провлачване от 360N/mm<sup>2</sup>.

На таблиците са представени химичният състав и механичните характеристики (таблица 1;2;3;4).

**Таблица 1 Изисквания химичен състав на стоманата спрямо DNV GL RULES**

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Nb	V	Ti	N
NV A27S, NV D27S, NV E27S	0.18	0.50	0.70 to 1.60	0.035	0.035	0.20	0.08	0.40	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	-
NV A32, NV D32, NV E32, NV A36, NV D36, NV E36 <sup>7)</sup> , NV A40, NV D40, NV E40 <sup>7)</sup>	0.18	0.50	0.90 to 1,60 2)	0.035	0.035	0.20	0.08	0.40	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	-
NV F27S, NV F32, NV F36, NV F40	0.16	0.50	0.90 to 1.60	0.025	0.025	0.20	0.08	0.80	0.35	3)	0,05 3)	0,10 3)	0,02 3)4)	0,009 5)

1) Given value is maximum content (by weight) unless shown as a range or as a minimum.  
 2) Minimum 0.70% for thicknesses up to and including 12.5 mm.  
 3) The steel shall contain grain refining elements Al, Nb, V or Ti, either singly or in any combination, see [2.6.6]. The total content of Nb+V+Ti shall not exceed 0.12%.  
 4) Maximum 0.05% Ti for TM steels subjected to agreement.  
 5) 0.012% if Al is present.  
 6) For NV E36 BCA and NV E40 BCA as per [7] the following limits are prevailing: %Mn = 0.90-2.00%, %P<sub>max</sub> = 0.020%, %S<sub>max</sub> = 0.020%, %Cu<sub>max</sub> = 0.50%, %Cr<sub>max</sub> = 0.25%, %Ni<sub>max</sub> = 2.0%

**Таблица 2 Химичен състав на стоманата**

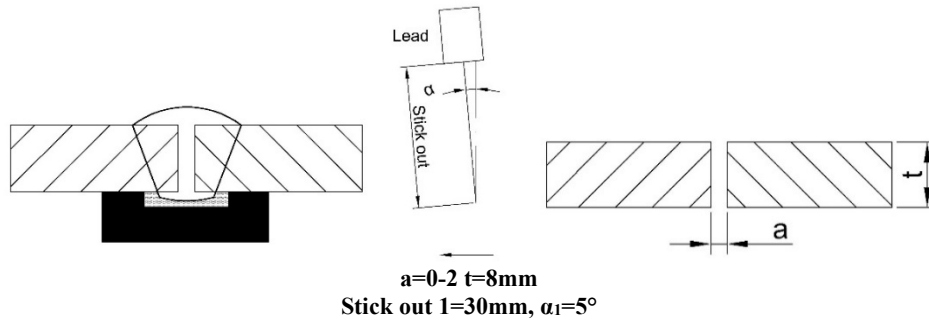
CHEMICAL COMPOSITION																					
C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Cu	Ni	Ti	V	Nb	Mo	B	Ca	Pb	As	Sn	Sb	Bi	CEV
10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-2</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-4</sup> %	10 <sup>-4</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-3</sup> %	10 <sup>-2</sup> %
C71 17	C72 23	C73 105	C74 13	C75 10	C76 40	C77 7	C78 12	C79 33	C80 10	C81 1	C82 1	C83 1	C84 17	C85	C86	C87	C88	C89	C90	C91	C93 40

**Таблица 3 Изисквани механични показатели на стоманата спрямо DNV GL RULES**

Grade	Yield strength R <sub>eH</sub> minimum [MPa]	Tensile strength R <sub>m</sub> [MPa]	Elongation A5 minimum [%]	Impact energy, minimum average [J] <sup>1)</sup>						
				Test temperature [°C]	t ≤ 50 [mm]		50 < t ≤ 70 [mm]		70 < t ≤ 150 [mm]	
					L	T	L	T	L	T
NV A27S NV D27S NV E27S NV F27S	265	400 to 530	22 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	27	20	34	24	41	27
NV A32 NV D32 NV E32 NV F32	315	440 to 570	22 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	31	22	38	26	46	31
NV A36 NV D36 NV E36 NV F36	355	490 to 630	21 <sup>2)</sup>	0 -20 -40 -60	34	24	41	27	50	34

Таблица 4 Механични показатели на стоманата

TENSILE TEST					IMPACT TEST							
Leath <sup>2)</sup>	Direction <sup>1)</sup>	Reh <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	Rm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>	A %	Direction <sup>1)</sup>	Type <sup>4)</sup>	Individual values <sup>1)</sup>			Mean value <sup>1)</sup> J	At •C	Width of tests piece <sup>1)</sup>
							1	2	3			
C01	C02	C11	C12	C13	C02	C40	C42	C42	C42	C43	C03	C41
1	T	404	522	28.9	L	ISO-V	101	98	105	101	0	10X7.5



Фиг.1. Подготовка на краищата за заваряване

Процесът на едностранно заваряване под слой от флюс върху флюсова медна подложка (флюсова възглавница), използвана за заваряване на големи стоманени панели в корабостроенето допринесе много за рационализирането на процеса на сглобяване на панели. Това е високоефективен метод за заваряване, който се прилага при много корабостроителници повече от 20 години.

Заваряването на образеца се извърши на станция за едностранно подфлюсово заваряване с флюсова медна подложка (флюсова възглавница). Подготовката се е направена съгласно фиг.1., а параметрите на заваряване са описани в таблица 5.

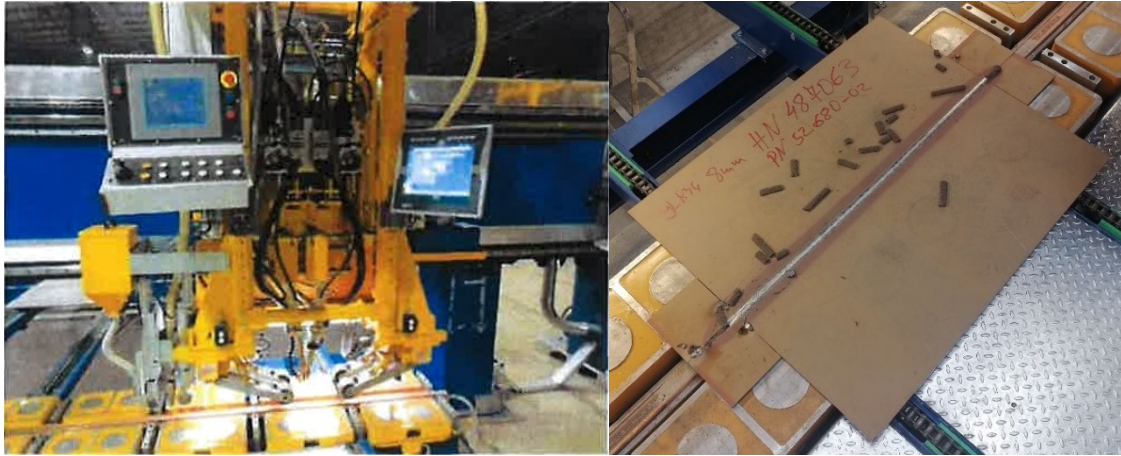
Таблица 5

Run	Process	Torch angle	Size of filler [mm]	Current [A]	Volt [V]	Type of Current/ Polarity	Wire feed Speed [m / min]	Freq. [Hz]	Balan. %DC+	Offset %	Phase angle	Travel Speed [cm /min]	Heat input [kJ / mm]
1	121	Pull 5	Ø 4	880±30	34±2	CC Square wave	2.0±0.5	40	75	0	-	55±50	3.2±0.3

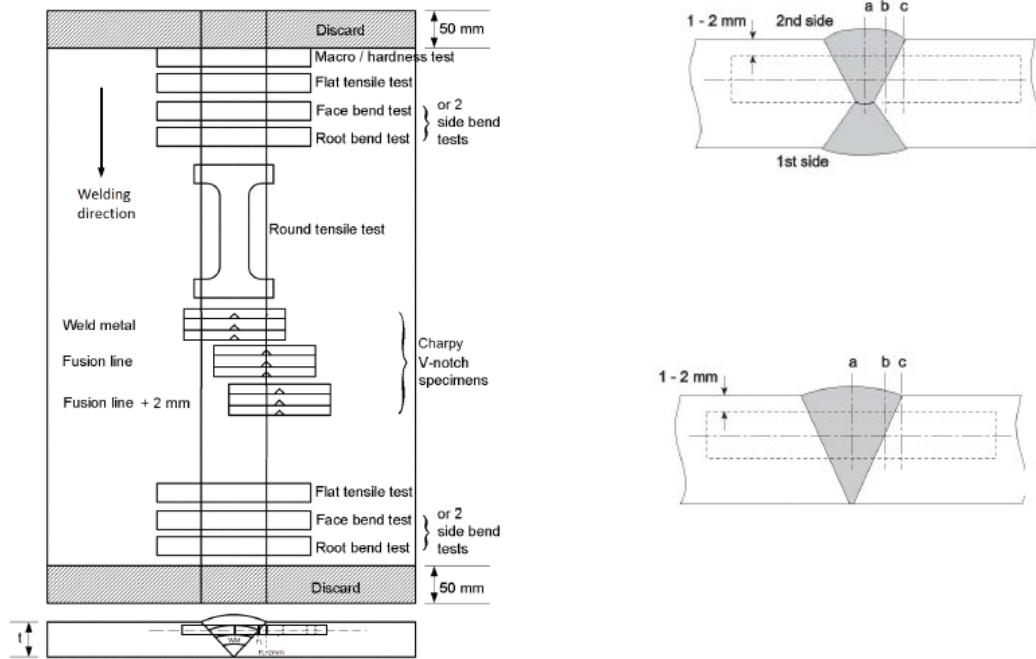
Съоръжението за заваряване и полученото заварено съединение са показани на фиг. 2.

От заварения образец бяха изработени образци съгласно схемата на фиг.3.

Изпитването на ударна жилавост, съгласно изискванията за стоманата е при T=0°C (фиг. 4).



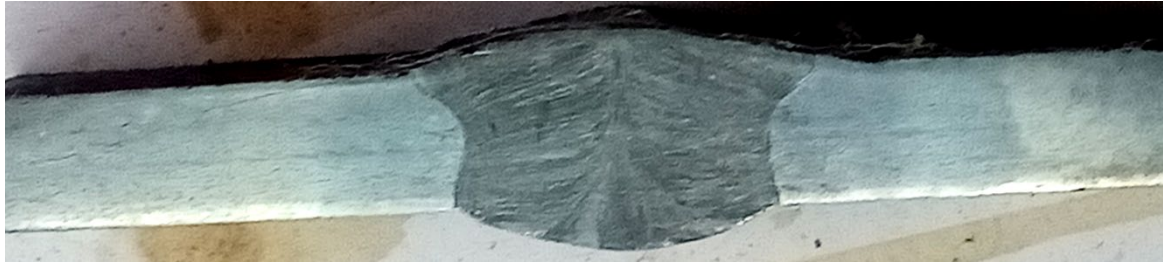
Фиг.2. Апаратура за заваряване и завареното съединение



Фиг.3 Позиции за изрязване на заготовките за пробни тела и линии за поставяне на надрези



Фиг.4 Пробни тела след изпитване на ударна жилавост



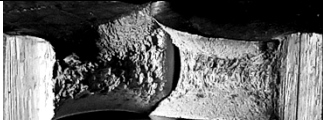
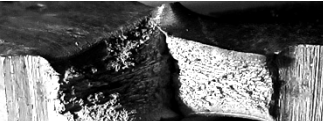
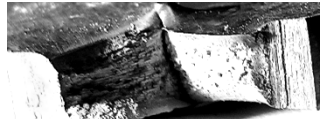
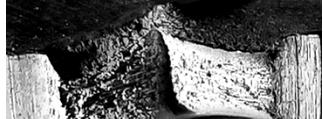


Фиг. 5. Макрошлиф на завареното съединение

### 3. Резултати

В таблица 6 по-долу са дадени резултатите от извършените проби на ударна жилавост, на фиг.6 е показана получената макроструктура, а на фиг.5 пробните тела след изпитване на ударна жилавост.

Табл.6 Резултати от изпитване на ударно огъване

№	подрез/notch	T	a	b	s	K	KCV	Лом/Fractures
-	-	°C	cm	cm	cm <sup>2</sup>	J	J/cm <sup>2</sup>	-
1	в заваръчния шев	0	0,75	0,81	0,61	46,1	75,6	
2	в заваръчния шев	0	0,75	0,79	0,59	21,6	36,6	
3	в заваръчния шев	0	0,76	0,81	0,62	34,3	55,3	
<b>Средно / Average value</b>						<b>34,0</b>	<b>55,8</b>	
4	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,76	0,82	0,62	23,5	37,9	
5	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,75	0,79	0,59	21,6	36,6	
6	по линията на сплавяване +2 мм	0	0,74	0,81	0,6	18,6	31,0	

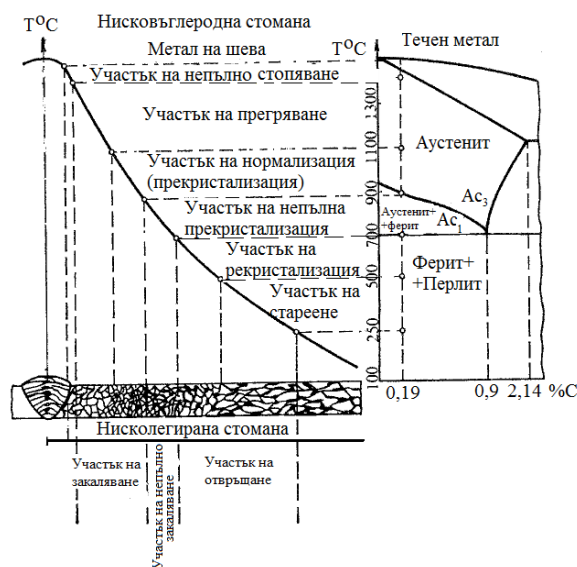
Средно / Average value				21,2	94,0	
за AH36 съгласно DNV rules for classification Ships – минимална енергия на удара, за стандартен образец (KV, J) при 0°C / for AH36 according to DNV rules for classification Ships – minimum impact energy for a standard sample (KV, J) at 0°C respectively				34*		

\*-за пробни тела с дебелина 7,5 mm  $KV = ((5 \cdot 34) / 6) = 30 J$

#### 4. Анализ на получените резултати

За работоспособността на заваръчното съединение до голяма степен се съди по структурните превръщания в зоната на термично влияние намираща се около метала на шева и отделена от него от преходната зона – зоната на частично стопяване. Последната се вижда много добре на макро шлиф, вследствие на различната устойчивост на металите на шева и на основния метал спрямо разяждането с реактив. На макрошлифовете в повечето случаи липсва ясно очертана граница между метала на шева и основния метал. Структурата на околешевната зона зависи от изходната структура на основния метал, от характера на физическото въздействие върху него и от степента на завършеност на фазовите и структурните превръщания в процеса на заваряването. Най-съществено е количеството на структурните изменения след заваряване при металите и сплавите, претърпяващи полиморфни превръщания.

В зависимост от температурата на нагриване при електродъгово заваряване на нисковъглеродна стомана, в строежа на заваръчното съединение се различават следните характерни зони:



Фиг. 6 Схема на строежа на ЗТВ, на заваръчно съединение изпълнено електродъгово

#### Област на непълно стопяване (преходна зона).

Тази област се намира между ликвидуст и солидуст линиите от Fe-C диаграма. Състои се от частично стопен основен и напълно стопен допълнителен метали. В тази зона се извършва свързването на основния с допълнителния метал. Тя има едрозърнеста структура и определя до голяма степен качеството на завареното съединение.

### **Област на прегряване.**

Тази област обхваща метала, лежащ в температурния интервал в близост до солидус линията (1100 до 1400°C). В нея се получава едрозърнеста, а в някои случаи и прегрята структура. В резултат на това се намалява пластичността на метала без да намалява съществено якостта му (якостта на удар пада с около 25÷30%). Степента на уедряване на зърната зависи основно от продължителността на загряването и от условията на заваряване.

### **Област на нормализация.**

Обхваща метала, загрят между температури 1000÷1100°C и точката A3 (около 900°C). Поради пълното прекристализиране при загряването и следващото охлаждане в тази област се получава дребнозърнеста структура. Тя има по-добри механични характеристики от изходната структура на основния метал.

### **Област на непълна прекристализация.**

Областта лежи между точките A3 и A1 (900÷725°C). При заваряването на метала в този температурен интервал една част от ферита остава непроменен (перлитът се превръща в аустенит). При следващото охлаждане от аустенита най-напред ще се отдели дребнозърнест ферит, а след това ще се получи перлит. Тази нова структура ще се образува около непроменените, сравнително по-едри феритни зърна. Поради разликата в едрината на зърната, може да се получи понижаване на механичните свойства в областта на непълна прекристализация в сравнение с основния (непроменен) метал.

### **Област на рекристализация.**

Намира се под точката A1 (725÷500°C). Структурата в този температурен интервал се изменя само тогава, когато металът, поради заваряването, е бил деформиран пластично в студено състояние. В резултат на рекристализацията  $[TR=(0,3\div 0,4)TT]$  се получава равноосна ферито-перлитна структура.

В областите, загрети до температура под 500°C (500÷200°C), металът намалява пластичността си (синя трошливост), без да се извършват забележими структурни изменения.

## **5. Изводи**

Типичната линейна енергия при подфлюсово заваряване е 20kJ/cm. При използваните параметри стойността е с 62% по-голяма, което е довело до прегряване на зоната на термично влияние и намаляване на пластичността на метала. Пробни тела 4, 5, 6 са под допустимите стойности на ударна жилавост.

Потвърждава се получаването на едрозърнеста, а в някои случаи и прегрята структура. В резултат на това се намалява пластичността на метала, без да намалява съществено якостта му (якостта на удар пада с около 75÷80%). Степента на уедряване на зърната, зависи основно от продължителността на загряването и от условията на заваряване.

Изискванията за елементите, обозначени като финозърнести елементи (Al, Nb, V и Ti), са дадени в таблица 1 и 7, като стойностите в таблица 1 са максимални, а тези в таблица 7 са минимални. От двете таблици излиза че Al+Ti+Nb не трябва да превишава 0,12% както и Al+Nb не по-малко от 0,015%+0,010%. Използваната стомана, която е произведена и сертифицирана, не отговаря на изискванията на DNV GL RULES.

Таблица 7

Approved single element or combination of elements	Fine grain elements, minimum content [%]			
	Al <sup>1)</sup>	Nb	V	Ti
Al	0.020 <sup>2)</sup> 0.02 <sup>3)</sup> 0.018 <sup>4)</sup>	-	-	-
Nb	-	0.02	-	-
V	-	-	0.05	-
Ti	-	-	-	0.007
Al+Nb	0.015	0.010	-	-

Approved single element or combination of elements	Fine grain elements, minimum content [%]			
	Al <sup>1)</sup>	Nb	V	Ti
Al+V	0.015	-	0.030	-
Al+Nb+V	0.015	0.010	0.030	-
Al+Nb+Ti	0.015	0.010	-	0.007
Other combinations <sup>5)</sup>	0.015	0.010	0.030	0.007

1) Total content. If acid soluble content is determined the given value is reduced by 0.005%.

2) For normal and high strength steels.

3) For extra high strength steels except delivery condition QT.

4) For extra high strength steels with delivery condition QT.

5) The specified minimum content applies for the elements given in the qualified combination only, as listed on the manufacturer approval certificate.

## Литература

1. Люцканов, Г.К., Изследване заваряемостта на нисковъглеродни, нисколегирани стомани с повишена якост, автореферат, <http://old-www.naval-acad.bg/Bg/konkursi-proceduri/arhiv-014-d/GLuckanov/avtoreferat.pdf>
2. DNV Rules for classification edition july 2022, <https://www.dnv.com/news/dnv-rules-for-ships-july-2022-edition-227477>
3. <https://beamcut.com/types-of-steel-used-in-shipbuilding/>
4. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-shipbuilding>
5. Metallurgy Variables in Fusion Welding, <https://dl.asminternational.org/technical-books/monograph/124/chapter-abstract/2321438/Metallurgy-Variables-in-Fusion-Welding?redirectedFrom=fulltext>



## Hybrid Non-equilibrium Composites Produced via Friction Stir Processing

Christo KONDOFF<sup>1</sup>, Marina MANILOVA<sup>1</sup>, Tatiana SIMEONOVA<sup>1,2</sup>, Rumen KRASTEV<sup>2</sup>,  
Plamen TASHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of metal science, equipment and technology with hydroaerodynamics centre “Acad. A. Balevski”  
at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [hriko61@gmail.com](mailto:hriko61@gmail.com), [mamanil@abv.bg](mailto:mamanil@abv.bg), [tsimeonova@imbm.bas.bg](mailto:tsimeonova@imbm.bas.bg), [ptashev@ims.bas.bg](mailto:ptashev@ims.bas.bg),

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

### Abstract

Friction stir processing (FSP) is increasingly used to improve the surface properties of ductile metals and alloys. It is possible to add reinforcing particles in the FSP zone to obtain hybrid non-equilibrium composites with desired properties. In the present work, hybrid non-equilibrium composites of aluminium alloy A 6061 with added reinforcing particles of Zn or Ti obtained by FSP are presented. Processing is carried out with a 4X5MFS steel tool with a special geometry, which performs rotary and progressive movement. The study was carried out under fixed parameters of the processing mode. Results were obtained on the influence of the concentration of reinforcing particles on the hardness and mechanical characteristics of the hybrid non-equilibrium composites.

**Keywords:** Friction stir processing (FSP), hybrid non-equilibrium composites, Zn, Ti reinforcing particles, aluminium alloy.

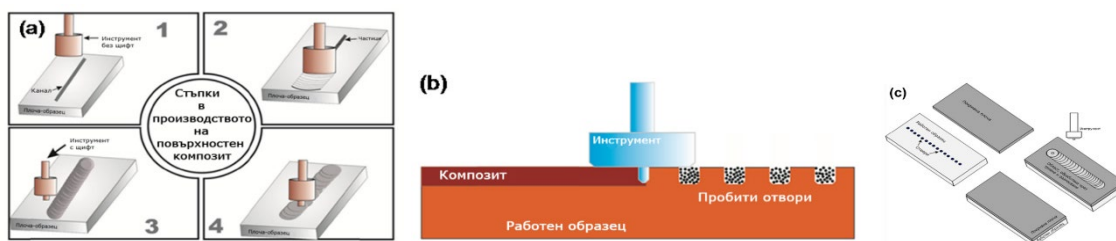
## Хибридни неравновесни композити получени чрез обработка с триене и размесване

Христо КОНДОВ, Марина МАНИЛОВА, Татяна СИМЕОНОВА, Румен КРЪСТЕВ,  
Пламен ТАШЕВ

### Увод

Обработката с триене и размесване (ОТР) дава възможност да се въздейства върху пластични сплави в отделни специфично натоварени зони с цел да се постигнат необходимите качества на материала или изделието в частност. Чрез ОТР на алуминиева сплав А 6061 Т6 и повърхностно добавяне на  $Al_2O_3$  са получени повърхностни композити с различна концентрация на уякчаващите частици и вариране параметрите на режима на получаване [1]. Установено е наличието на по-дребнозърнеста структура и повишена твърдост в зоната на размесване. Най-добри резултати по отношение на твърдостта 132 HV и бездефектна структура са получени при използването на инструмент за обработка с коничен щифт резбови канали и вдлъбнато рамо при скорост на въртене 1120 rpm, скорост на обработка 16 mm/min и концентрация 2 vol%. Влиянието на уякчаващи частици от SiC и  $Al_2O_3$  на А 6061 Т6 върху износването и якостните свойства е установено за хибриден композит получен чрез ОТР [2]. Повърхностни композити могат да бъдат получени чрез ОТР по различни начини. Един от тези начини е чрез нанасяне на слой от суспензия от керамични частици в летлива среда и последваща обработка [3]. Понастоящем керамичните частици се въвеждат чрез машинно обработен канал в плоча-образец [4]. Основните подходи при производството на повърхностни композити чрез

ОТР са представени схематично на Фиг. 1 (а, b, c). Различните стъпки на метода с използване на канал са обяснени на Фиг. 1a.



**Фиг. 1. Общоприети методи за въвеждане на уякчаващи частици при производството на повърхностни композити: (а) чрез канал; (b) чрез отвори; (c) чрез покривна плоча [5].**

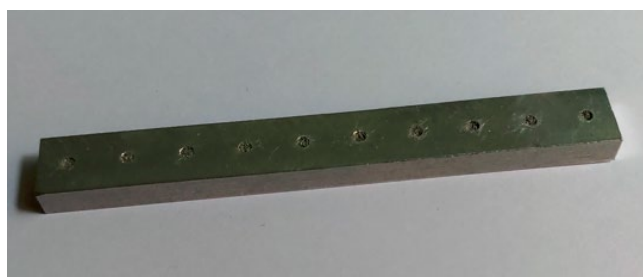
Инструмент с кухня изпълнена с уякчаващи частици, които се подават в процеса на обработка е в основата на друга технология за получаване на композити [6]

## Методика на експеримента

В експеримента са използвани уякчаващи частици от Zn, който е с по-ниска температура на топене от Al сплав и Ti частици с по-висока температура на топене. Извършено е проследяване на взаимодействието и се прави сравнение на въздействието им върху свойствата на получените хибридни неравновесни композити (ХНК). Избрано е да се варира концентрацията на добавения прах, при постоянни параметри на режима и да се следи промяната на твърдостта и якостта.

За създаване на ХНК се използва планка с дебелина 12mm от сплав А 6061 Т651. Като добавъчен материал се въвежда Zn или Ti на прах като уякчаващи частици в гореспоменатата сплав.

За да се осъществи точно дозиране на въвеждания титанов или цинков прах за получаване на композитен слой посредством ОТР се използва тегловен метод. В подготвен за целта образец (Фиг. 2) от алуминиева сплав с размери 6x12x100mm са пробити 10 отвора със свредло  $\varnothing 2\text{mm}$  на дълбочина 2mm.



**Фиг. 2. Образец**

Извършени са измервания на теглото на количеството Zn и Ti прах, което се вмества в 10-те отвора при пресоване с една и съща сила 5kg със специално изработен за целта инструмент. Планките за обработка са пробити със същото свредло (с което са пробити отворите в детайла от Фиг.2) без междинно заточване при използване на обработващ център HURKO с висока точност. Извършено е претегляне на образца първоначално и след запълването на всички отвори с цинков прах. Използвана е аналитична везна “Sartorius” с клас на точност M1 и разделителна способност  $d=0,00001$ .

Определено е средното тегло на Ti прах, което се помества в един отвор от 10 измервания и средното тегло на Zn прах, което се помества в един отвор от 10 измервания. Концентрация от 2, 4 и 6 тегловни процента е постигната след изчисляване на теглото на метала в размесената зона и разстоянието между запълнените с прах отвори – Фиг. 3.



Фиг. 3. Получаване на ХНК

Изработени са планки, които са обработени съгласно Таблица 1 и изрязани на рутер с охлаждане серия образци за измерване на твърдост и изпитване на опън.

Таблица 1: Идентификация на образците

Означение на образеца	Уякчаващ прах	Концентрация, wt %	Скорост на обработка, mm/min	Скорост на въртене, rpm
1	Ti	2%	60 (0)	900 (0)
2	Ti	4%	60 (0)	900 (0)
3	Ti	6%	60 (0)	900 (0)
7	Zn	2%	60 (0)	900 (0)
8	Zn	4%	60 (0)	900 (0)
9	Zn	6%	60 (0)	900 (0)

## Измерване на микротвърдост

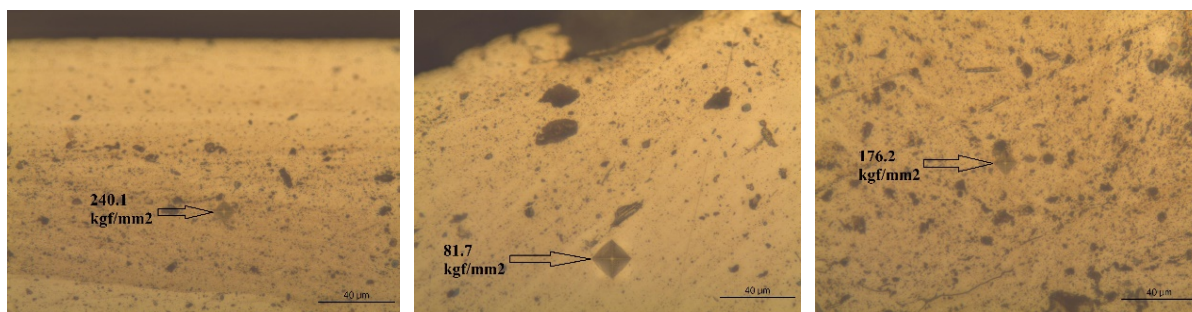
За измерване на микротвърдост са дадени 7 бр. образци с номера 1, 2, 3, 7, 8 и 9, в зоната на обработка на които се формира ХНК (Таблица 1). Образците са подготвени, като са опаковани в акрилна смола, шлайфани са на шкурки до №1200 и механично полирани с диамантена паста. Проявени са с разтвор на Keller.

Микротвърдостта е измерена с микротвърдомер MicroDuromat (Reichert-Jung) при зададено натоварване 20 gf, време за достигане на натоварването 10s и време на задържане под товар 10s. За всеки образец в зоната на обработка са направени 9 измервания (в двата края на зоната и по средата ѝ) – 1 под повърхността на образеца, 2 – в средната част на зоната и 3 – в „долната“ част (най-близо до сърцевината на образеца). Резултатите от измерването на микротвърдост за всички образци са дадени в таблица 2. Средната стойност на микротвърдостта на основния метал е 73 kgf/mm<sup>2</sup>.

Таблица 2. Резултати от измерването на микротвърдост

Номер на образец	Местоположение	1	2	3	Средно
1	Под повърхността	62,1	68,5	65,2	65,27
	По средата	53,7	57,4	53,6	54,9
	В основата	56,5	56,9	58,7	57,37
2	Под повърхността	64	72,7	73,6	69,9
	По средата	53,3	58,1	62,4	57,9
	В основата	61,1	59,4	68,4	63,0
3	Под повърхността	89,6	240,1	81,7	137,1
	По средата	103,5	176,2	82,5	120,7
	В основата	62,3	72,4	73,9	69,5
7	Под повърхността	49,9	68	78,6	65,5
	По средата	59,6	65,6	70,7	65,3
	В основата	57,7	62,6	67,9	62,7
8	Под повърхността	80,1	120,1	97,7	99,3
	По средата	127	121	121,1	123,0
	В основата	108,7	85,9	96	96,9
9	Под повърхността	92,2	139,3	106,4	112,6
	По средата	112	109,7	67,4	96,4
	В основата	65,7	82,9	74,8	74,5

На Фиг. 3 са показани 3 от отпечатъците при измерване на микротвърдост на образец 3.



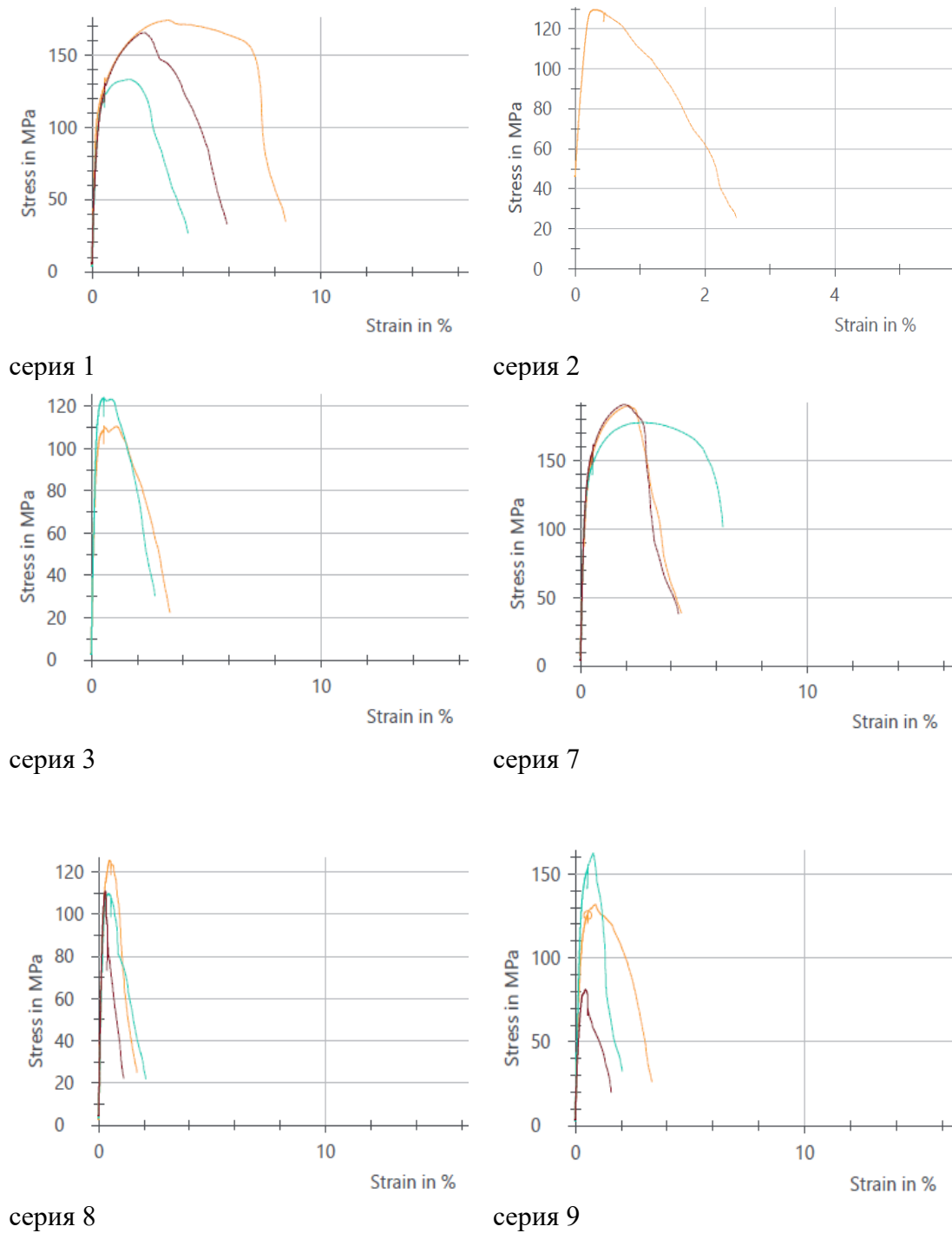
Фиг. 3. Отпечатъци от измерване на микротвърдост

## Механични изпитвания

Образците от ХНК, предназначени за изпитване на опън, са подготвени съгласно стандарт ASTM E8, с номера – серии 1, 2, 3, 7, 8, 9 по три образца от всеки вид, с изкл. на № 3 – два броя и № 2 – един брой.

За изпитването е използвана серво-хидравлична машина Zwick-Roell HA-250 съоръжена силомерна клетка до 250kN и с хидравлични захвати за изпитване до 100kN. Деформацията е измерена с екстензометър Sandner EXA 25-2.5o с 25mm базова дължина. Измерванията са проведени с изключително висока прецизност, благодарение на най-съвременния хардуер и софтуер на апаратурата и система за регистрация на данните.

Определянето на якостта на опън за всяка серия са по стандарт ISO 6892 – част 1 и са показани на фиг. 4.

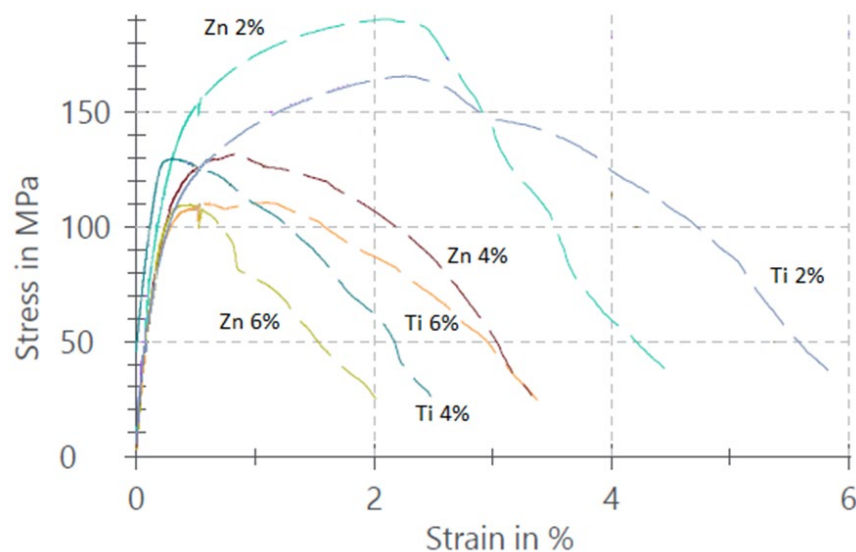


Фиг. 4. Определянето на якостта на опън

Числовите стойности на механичните характеристики са представени в Таблица 3.

Таблица 3. Числовите стойности на механичните характеристики

Означение на образца от ХНК	Образец №	E GPa	Rp0.2 MPa	Rp0.5 MPa	ReH MPa	Rm MPa
1.1	18	65,6	120	135	-	174
1.2	19	67,9	112	125	-	133
1.3	20	69,7	110	132	-	166
2.4	21	56,5	-	124	129	128
3.1	1	59,4	106	109	-	111
3.2	2	64,3	121	123	-	124
7.1	3	67,2	144	165	-	190
7.2	4	72,4	139	155	-	178
7.3	5	73,1	148	167	-	191
8.1	6	60,8	119	129	-	132
8.2	7	67,3	147	161	-	163
8.3	8	55,9	79	66	-	81
9.1	9	57,0	122	119	-	125
9.2	10	56,0	109	103	-	110
9.3	11	68,4	-	68	111	87



Фиг. 5. Осреднена якостна диаграма за съпоставка на образци от всички серии от ХНК с въведени Zn или Ti уякчаващи частици

### Изводи

Най-високи стойности на микротвърдостта в зоната на обработване в сравнение с микротвърдостта на основния метал са измерени при образци от ХНК с номера: 3 (6%Ti), 8 (4%Zn,) и 9 (6%Zn,).

Най-добри якостни показатели показват образци серия 7 със средна якост  $R_m = 186,3$  MPa и серия 1 със средна якост  $R_m = 157,6$  MPa. От гледна точка на влиянието на въведените уякчаващи частици върху механичните характеристики на изпитаните

образци се наблюдава намаляване на якостта на опън и на пластичността на изпитваните материали с нарастване на количеството на уякчаващата фаза, като най-добри резултати са получени при добавяне на 2%Zn (серия 7) и 2%Ti (серия 1).

Понижени резултати показват серии 3, 8 и 9.

В ломовете на изпитаните серии има видими дефекти, които са причина за получените графики и понижени якостни показатели.

## Благодарности

Настоящата работа е реализирана с подкрепата на Българския фонд за научни изследвания по договор за сътрудничество с Индия КР-06-India-10/02.09.2019 и на Европейския фонд за регионално развитие оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020“, проект „Национален център по мехатроника и чисти технологии“ BG 05M2OP001-1.001-0008.

## Литература

1. Naresh P., A. Kumar “Effect of Nano Reinforcement On Fabrication Of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface Composite By Friction Stir Processing”, Materials Science forum, Vols. 830-831, pp 467-471
2. Devaraju A., A. Kumar at all Influence of reinforcements (SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and rotational speed on wear and mechanical properties of aluminum alloy 6061-T6 based surface hybrid composites produced via friction stir processing, Materials and Design 51 (2013) 331–341
3. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., Charit, I., 2003. Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. Mater. Sci. Eng. A 341, 307–310
4. Arora, H.S., Singh, H., Dhindaw, B.K., 2011. Composite fabrication using friction stir processing-A review. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 61, 1043–1055, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3758-8>
5. Sharma V., U. Prakash, B.V. Manoj Kumar., Surface composites by friction stir processing: A review. Journal of Materials Processing Technology, 2015, [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00199-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00199-5).
6. Miranda, R.M., Santos, T.G., Gandra, J., Lopes, N., Silva, R.J.C., 2013. Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys. J. Mater. Process. Tech. 213, 1609–1615, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.022>

## Genesis of Destruction Steel Flange of Auto Concrete Pump

Tatyana MECHKAROVA, Nikolay VALCHEV

Technical University of Varna; Varna, Bulgaria,  
e-mails: [tatqna13@abv.bg](mailto:tatqna13@abv.bg), [armicronn@gmail.com](mailto:armicronn@gmail.com)

### Abstract

Macro and microstructural analysis of a dynamically destroyed structural part type flange “fifth wheel” of a autoconcrete pump.

**Keywords:** macro and microstructural analysis, fifth wheel

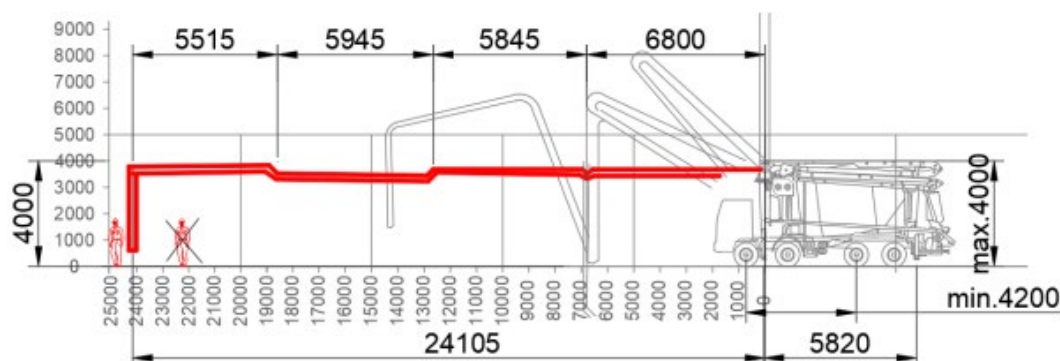
## Генезис на разрушаване на стоманен фланец на авто бетон помпа

Татяна МЕЧКАРОВА, Николай ВЪЛЧЕВ

### 1. Увод

Автобетон помпите са тежкотоварни камиони със допълнително монтирани специализирани на него агрегати (оборудване за превоз на бетон и система с помпа за разтоварване на бетона на отдалечено разстояние от него), както и стабилизатори за позициониране на специализирания автомобил при работа. Те са предвидени да функционират при тежки условия на работа придружени със опериране с голям товар и динамични (вибрационно ударни) натоварвания на открито.

Предназначението и начинът на действие на специализирания автомобил е следното: чрез миксера да превозва бетон от мястото на производството му до съответния обект, а чрез стрелата и изпомпващия механизъм да има възможност да разтовари превозвания бетон на отдалечено от него място, което според спецификациите на анализирания автомобил показан на фиг.1 може да бъде отдалечено най-много на 24,1м от машината в хоризонталната равнина на действие.



Фигура 1. Максимално разгънато положение на стрелата

Поради спецификата на работа на автобетон помпите се случва често да дефектират въртящите се части и разглобяемите съединения, които са най-натоварени по време на

експлоатация. Предвиждането и предотвратяване на тежки внезапни разрушения, често придружени с човешки жертви е от особено значение и важност. Това налага анализ на комплекс от геометрични, структурни и механични параметри, пряко влияещи на експлоатационната издръжливост на съоръженията.

## **2. Методика за анализ на механична якост и структура на динамично натоварени детайли тип „пето колело“ на автобетон помпа**

### **2.1. Обект на изследване.**

Обектът на изследване е стоманен възел (фиг.2), който извършва въртливо движение наречен „пето колело“ на автобетон помпа.



**Фигура 2. Местоположение на „петото колело“ на автобетон помпата**

Вследствие на продължителна работа около 10 години експлоатация и неупражнен регулярен технически преглед на стрелата на автобетон помпата (няма нормативни изисквания за това) се е формирала пукнатина, която причинява излизане от строя на техническото съоръжение. Това налага изследване и анализ на причините, довели до формирането и развитието на пукнатината.

### **2.2. Методика на изследването**

За извършване на анализа от горната част на вертикалната колона под фланеца, към който е закрепено подвижното пето колело на автобетон помпата, е изрязано пробно тяло в зоната на разрушаване (Фиг. 3). От свидетеля (Фиг. 4) са изрязани проби за провеждане на съответните изследвания, даващи конкретна картина за химичен състав, структура и механична якост (Фиг.5).

За извършване на химичния анализ пробата е предадена за анализ на лаборатория „BULCIM AD SLIVEN“. Проведен е троен контрол за определяне на химичния състав, от който се установи, че използваната стомана е S700MC (1.8974) EN 10149-2-1996.

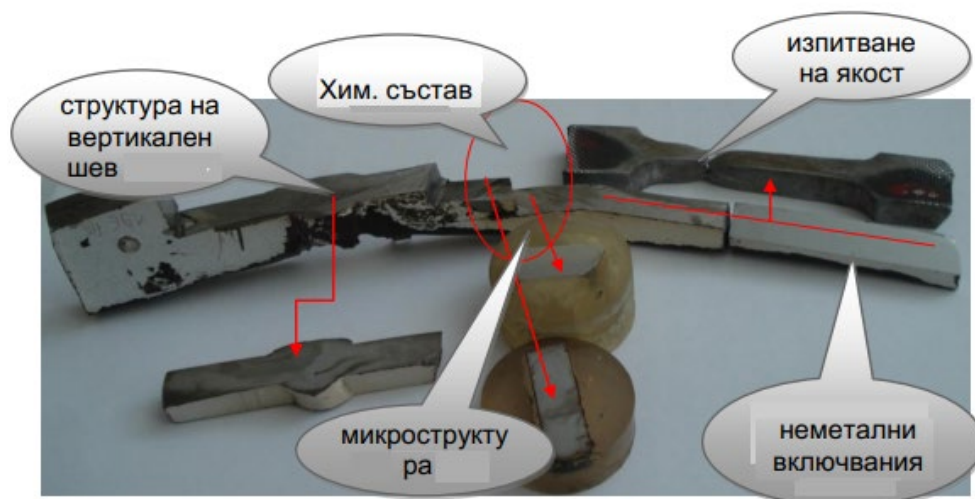
За да се опишат механичните характеристики на даден вид листов прокат е необходимо да се разглежда нечистотата на стоманата (оксиди, сулфиди и др. металургични несъвършенства в стоманата).



Фигура 3. Зона на изрязване на пробното тяло свидетел



Фигура 4. Пробното тяло свидетел



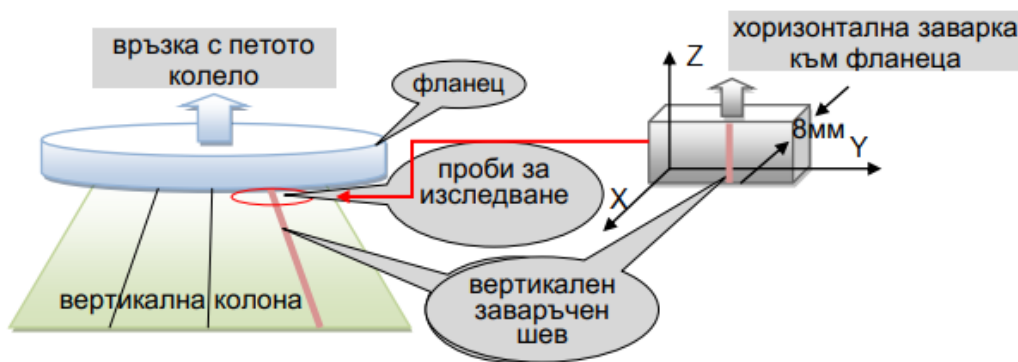
Фигура 5. Изрязани пробни тела

Проведен е микроструктурен анализ на обект от фигура 4 на металографски микроскоп “NEOFOT-2”. От микроструктурата на фигура 6 се виждат неметални включения, които имат както линейна така и точкова форма. На двете фигури микроструктурното заснемане е направено в отделни зони на обекта, посочен на фигура 4. Обекта на изследване се намира в непосредствена близост до уморния лом (зоната на разрушаване). Металургичните дефекти са непосредствени концентратори на зареждане и развитие на фокуса на уморна пукнатина.



Фигура 6. Микроструктура на неразядена проба – увеличение X 100

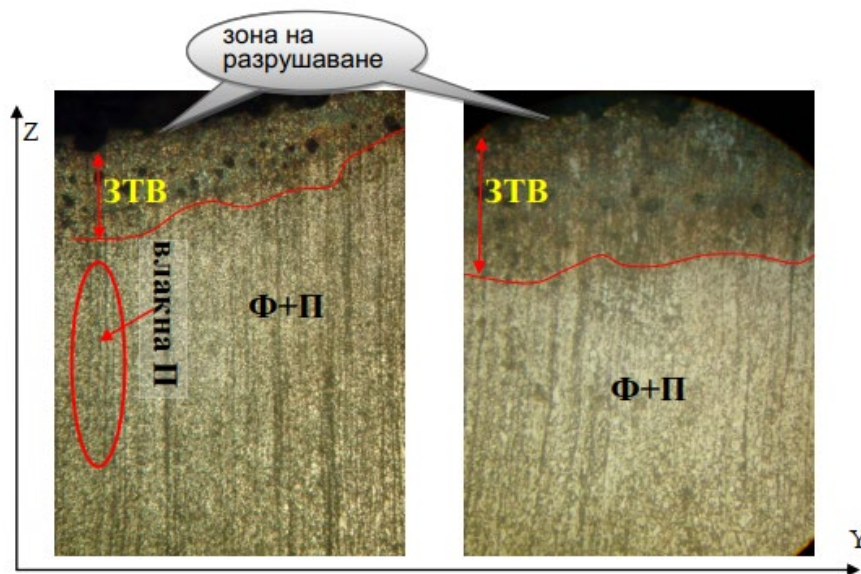
За уточняване на метода на получения прокат и структурни характеристики (фазов състав, вид на структурата, едрина, форма на зърната, текстура) е необходимо провеждане на микроструктурен анализ по методиката, показана на схемата на фиг.7.



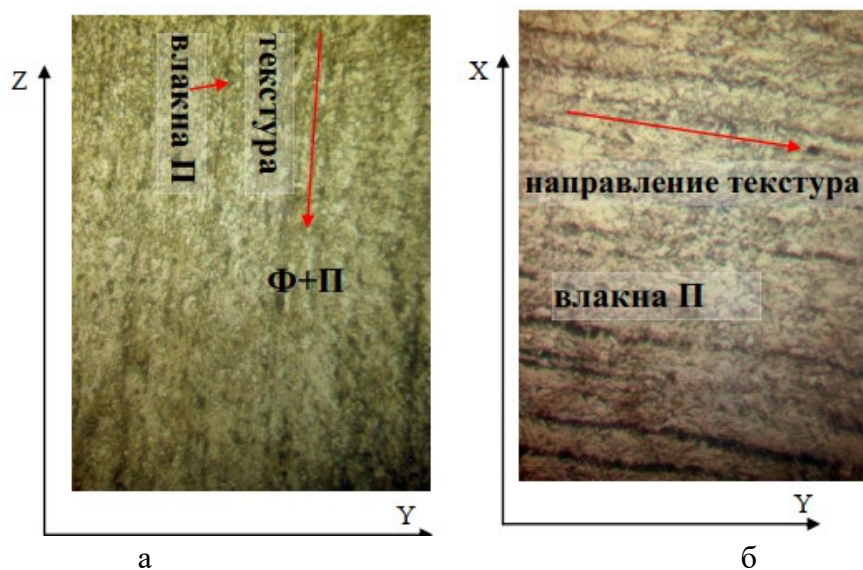
Фигура 7. Схема на разглеждания обект със зададени направления на проката

Направено е микроструктурно наблюдение в областта на зоната на разрушаване в направление към фланеца, заварен към вертикалната колона. От фигура 8 може да се отчете, че разрушаването е протекло в долния край на зоната на термично влияние. Това е извън зоната на уедряване на зърната, вследствие прегряване на структурата. Структурата е ферито-перлитна, с ясно изразена текстура в направление Z (фиг. 8/а,б), по схема на фиг.7. На фигурата могат да се отчетат влакна от перлитни колонии. Подобна структура може да се отчете и в долното направление на проката по оста Z, където се приема, че не може да има влияние от зоната на заваряване (фиг.9/а). В напречно направление на проката, по оста Y, също се наблюдава текстура на перлитните колонии. Феритът е с несиметрична форма, което е характерно за тази равнина на валцования листов прокат.

От разглежданите структури можем да приемем, че листовата стомана е студено валцована.



Фигура 8. Микроструктура на проката в зоната на разрушаване (направление относно фиг.6.), а) увеличение X63, б) увеличение X100

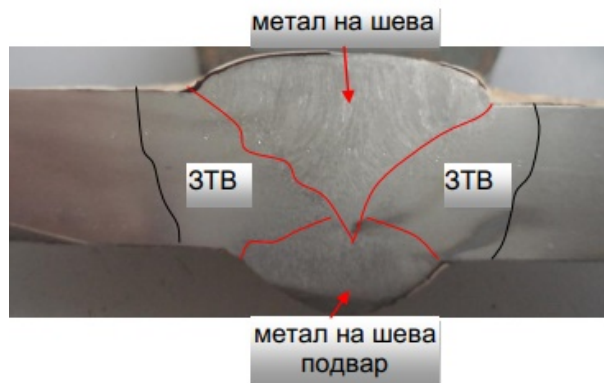


Фигура 9. Микроструктура на проката (основен материал) в близост до зоната на разрушаване в различни направления (фиг.7): а) увеличение X250, б) увеличение X500

При визуалния оглед на разрушения детайл се вижда, че получената уморна пукнатина е в близост до вертикалния шев без да го засегне (фиг. 3). Заварката е челна, като дебелината на листовия прокат е 8mm.

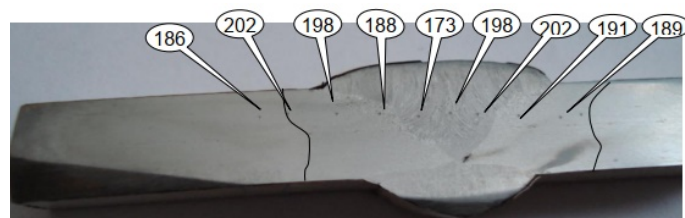
Заваръчният шев е направен на един слой (фиг. 10), съобразно дебелината на материала, вероятно е проведено подфлюсово заваряване. Проведен е подвар към корена на заварката. Зоната на термично влияние е сравнително тясна, дължащо се на сравнително мощен заваръчен източник и висока скорост на заваряване.

От справочните данни е установено, че използваната марка стомана се характеризира с добра заваряемост.



Фигура 10. Макроструктура на заваръчния шев във вертикалното направление от фиг.7

Това е видно и от проведеното измерване на твърдостта в отделните зони на заваръчния шев (фиг.11). Не са отчетени пикови стойности, а са близки до измерената твърдост на основния материал 196HV. Това е основание да приемем че металът на шева и зоните на термично влияние (ЗТВ) отговарят на номиналните стойности.



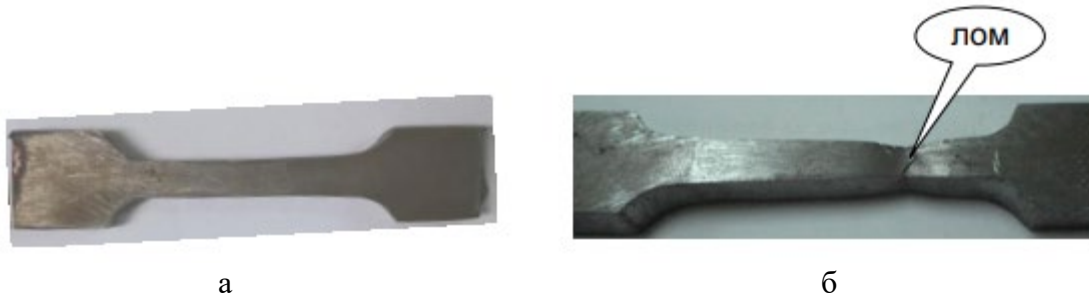
Фигура 11. Определяне на макротвърдост (HV5) по направление на шева

За целите на анализа са извършени и механични изпитания. Механичните свойства които са изследвани са: изпитване на якост, пластичност и сравнение със стойности от стандарта за конкретната стомана.

Данни уморната якост за конкретната стомана от литературни източници са представени на фиг. 12.

Mechanical properties of steel S700MC (1.8974)	
Rm - Tensile strength (MPa)	750-950
ReH - Minimum yield strength (MPa)	700
Nominal thickness (mm):	to 3
A - Min. elongation Lo = 80 mm (%)	10
Nominal thickness (mm):	from 3
A - Min. elongation Lo = 5,65 √ So (%)	12

Фигура 12. Таблични стойности за механичните характеристики на изследваната стомана S700MC



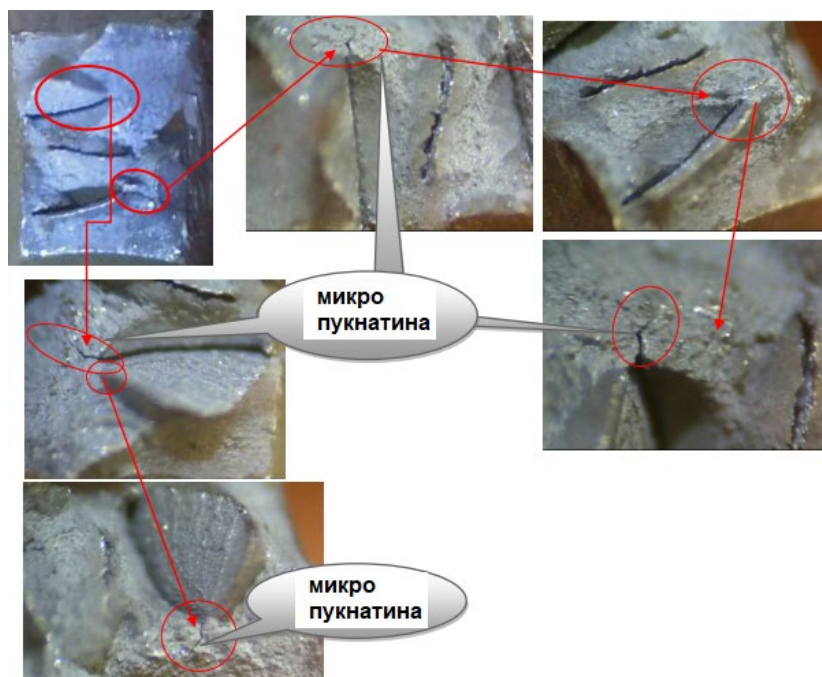
**Фигура 13. Пробно тяло за изпитване на опън:**  
 а) преди провеждане на изпитанието, б) след провеждане на изпитанието

**Таблица 1. Изследвани механични параметри**

Lo	Lu	a0	b0	S	S1	a1	b1	F0.2	R0.2	Fm	Rm	ΔL	Z	A
mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm	mm	N	MPa	N	MPa	mm	%	%
30	37	8	6	48	22	5,1	4,4	34896	727	38250	797	7,2	54	24

От проведеното изпитание на пробата, сравнявайки резултатите за установената стомана по химичен състав, можем да приемем, че всички основни стойности са над номиналните, по отношение на якостните характеристики ( $R_m$ ,  $M_p$  и  $A\%$ ). По отношение на горния пик на границата на провлачване  $R_{eH}$ ,  $R_m$   $R_{0.2}$  стойността на провлачване е по-висока, това се отнася и за якостта на материала  $R_m$ , поради факта, че структурата е с изразена текстура (студено валцована стомана). Този факт се отразява и на границата на провлачване (получена е условна граница  $R_{0.2}$ ). Пластичността е значително над заложената в изискванията ( $A=24\%$ ).

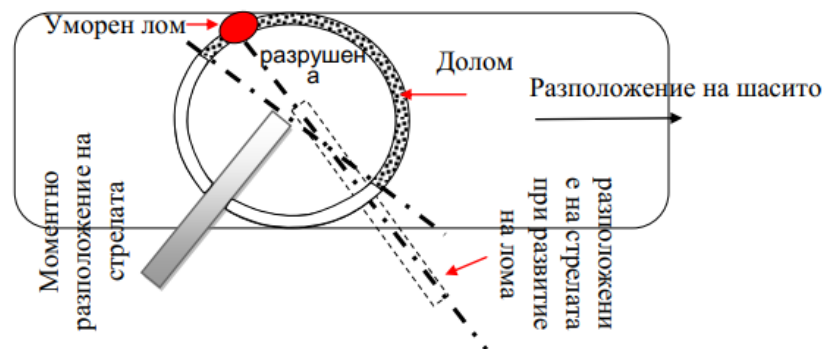
Интересен е фактът, свързан с проведенния фрактографски макроанализ на лома на пробата в зоната на разрушване, след проведеното изпитване на опън (фиг.14).



**Фигура 14. Фракто изследване на лом след изпитване на опън**

При макро наблюдение на фрактозоната на лома след разрушаване при изпитване на опън се забелязва формиране на пукнатини в разрушената област. Пукнатините в конкретния случай са признак за разслояване на материала. Това са огнища за зараждане фокуса при уморни ломове. Тези зони е възможно да се дължат на области на замърсяване на стоманата или области с текстурирани перлитни колонии.

От проведения оглед на място се установи, че в зоната на разрушаване под фланеца се наблюдава характерна фрактографска област от лом и долом. Ломът е следствие протекла циклична умора. По технически данни в режим на работа системата по транспортиране на бетона е подложена на циклично натоварване.



**Фигура 15** Разположение на уморната пукнатина относно стрелата

От схемата на фигура 15 е видно, че уморната пукнатина се е зародила при работа на стрелата, разположена противоположно през оста на въртене на петото колело. В конкретния случай от предварително развитата пукнатина с формиран концентратор по посока максимални напрежения (в случая е достатъчно и статични напрежения да предизвикат моментно разкъсване от края на формираната пукнатина, явяваща се концентратор). Пукнатината се е развила и е настъпило моментно разрушаване с образуване на долом.

На фигура 16 е представен изрязан свидетел в зоната на разрушаване. Наблюдаваната повърхнина е с фрактографско значение (повърхнината на разрушаване). От фигурата е видно, че основната площ на уморния лом е разположена в областта на огъване. Безспорна е вероятността цикличните напрежения в тази област да са най-големи. Максималното циклично натоварване се определя и от посоката на стрелата, относно шасито на камиона.

От фигура 16 става ясно, че уморната пукнатина се заражда и развива от върха на огъване на вертикалната колона. Това се явява слаба зона във връзката между колоната и фланеца под петото колело.

В близост до заварка на вертикалната колона, както и в областта на заварката се наблюдава моментно разрушаване, следствие достигане на пределни напрежения в края на уморната пукнатина. Получения долом около заваръчния шев и самия шев доказва, че зоната около заварката не е предизвикала разрушаването на стрелата (фиг. 16). От проведения оглед на място в областта на разрушаване се наблюдават допълнителни зони на уморен лом.



Фигура 16 Посока и площ на развитие на уморния лом

### 3. Изводи

По отношение химичния състав на стоманата от свидетеля, се установи точния химичен състав и определена марката на използваната стомана S700MC (1.8974) EN 10149-2-1996. Стоманата е приложима в тежко натоварени конструкции и е с добра заваряемост.

Относно втората част от изследването – относно свойствата на стоманата, са проведени изследвания на изрязания свидетел. Определено е наличието на неметални включвания. Определена е текстурата на метала, което е признак за студено валцована стомана. Текстурата оказва влияние върху механичните характеристики, затова изпитване на опън не се получи граница на провлачване ( $R_{eH}$ ), а условна граница ( $R_{0.2}$ ). Това предизвика повишаване на якостните свойства, но може да повлияе неблагоприятно върху уморната якост, особено в зоната на огъване. Наблюдението на микропукнатини в лома при изпитване на якост (опън) е признак за неплътност на метала, дължаща се на редица фактори (неметални включвания, особено линейни, линейно групирани на перлитни колонии, допълнителен наклеп в зоната на огъване).

### Литература

1. Миховски М., Методи за безразрушителен контрол, изд. Техника – 1988