



**RIGA NORDIC
UNIVERSITY**

Riga Nordic University

**INNOVATIVE TECHNICAL SOLUTIONS
FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT
OF UKRAINE AND EU COUNTRIES**

Scientific monograph

Volume 1



**IZDEVNIECĪBA
BALTIJA
PUBLISHING**

2026

*Recommended for printing and distribution via Internet
by the Academic Council of Baltic Research Institute
of Transformation Economic Area Problems according
to the Minutes № 3 dated 25.03.2026*

REVIEWERS:

Romans Djakons - Doctor of Engineering, Professor, Academician, Chairman of the Board of Riga Nordic University;

Deniss Djakons - Doctor of Economics, Professor, Rector of Riga Nordic University;

Antonina Djakona - Doctor of Economics, Professor, Riga Nordic University.

Innovative Technical Solutions for the Sustainable Development of Ukraine and EU Countries: Scientific monograph.
Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2026. Vol. 1. 308 p.

ISBN 978-9934-26-653-9

© Riga Nordic University, 2026

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Chapter 1

| | |
|--|----------|
| Ensuring cyber resilience transformation of personnel management processes in a multi-project environment (Dotsenko N. V., Chumachenko I. V., Nekrasov I. B.) | 2 |
| 1. Analysis of existing methods for solving the problem of transforming human resource management processes and formulating the task | 3 |
| 2. Main research material | 5 |

Chapter 2

| | |
|---|-----------|
| Software methods for environmental threat assessment based on real-time data analysis (Oleshchenko L. M.) | 14 |
| 1. Software methods for environmental threat assessment | 18 |
| 2. Real-time radiation monitoring integrated with data processing and analysis of solar activity and solar flares | 24 |

MATERIALS SCIENCE

Chapter 3

| | |
|--|-----------|
| The effect of modification with rare earth metals on the crystallization of iron-carbon alloys (Bosyi M. V., Kuzyk O. V.) | 41 |
| 1. Modifying effect of REM on iron-carbon alloys | 42 |
| 2. Study of the influence of REM on the crystallization of iron-carbon alloys | 46 |

Chapter 4

| | |
|--|-----------|
| Damage of concrete and reinforced concrete structures (Dorofeyev V. S., Pushkar N. V., Zinchenko H. V.) | 56 |
| 1. Formation of the structure of building composites | 57 |
| 2. The nature of the distribution of internal interface surfaces and technological cracks in concrete | 60 |

Chapter 5

High-temperature technologies for creating multifunctional composite materials and coatings using glass and aluminosilicate microspheres (Kazymyrenko Yu. O.) 74

1. Analysis of technological issues and formulation of the research problem 74
2. Technological link of production and operational orientation of composite materials and coatings. 78
3. Physicochemical processes of structure formation of composite materials and coatings. 81

Chapter 6

Creation and testing of auxiliary technological equipment for solving current problems of laser welding of thin-walled products made of stainless steels (Yurchenko Yu. V.) 88

1. Analysis of the disadvantages of common methods for welding thin-walled products. 90
2. Analysis of the growth and spread of laser tech for welding thin-walled products. 91
3. Analysis of the main problems of laser welding of thin-walled products. 93
4. Development and testing of auxiliary technological equipment for laser welding 112

INDUSTRIAL ENGINEERING

Chapter 7

Substantiation and research of the design of the slatted coulter of a row-type seeder with reduced draft resistance (Artemenko D. Yu.) 134

1. Statement of the problem 135
2. Analysis of the design features of the openers of row-type seed drills. . 136
3. Problem solving 147

HEAT POWER ENGINEERING

Chapter 8

Gas hydrate technology for natural gas transportation by sea transport (Bosyi M. V.) 164

1. Analysis of known technologies for transporting natural gas in the gas hydrate state 168

| | |
|--|-----|
| 2. Technological cycle and technological scheme of using gas hydrate technology for the production and preparation for transportation of natural gas | 172 |
|--|-----|

ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

Chapter 9

| | |
|--|------------|
| Analysis of Time Delay Formation in FANET with Spatially Distributed Aerial Nodes (Saiko V. H., Komarov V. O., Medved Yu. H.) | 183 |
| 1. FANET as a Class of Spatially Distributed Ad Hoc Networks | 185 |
| 2. Decomposition of Time Delay in FANET | 187 |
| 3. Impact of Spatial Distribution and Mobility of Aerial Nodes on Time Delays | 189 |
| 4. Role of Medium Access Mechanisms and Time Synchronization in Delay Formation | 191 |
| 5. Methodological Analysis of Antenna and Physical-Layer Methods for Delay Reduction in FANET | 193 |

TRANSPORT

Chapter 10

| | |
|---|------------|
| Sustainable development in logistics as a key strategic orientation (Bilonoh O. Ye.) | 211 |
| 1. The relationship between sustainable development and logistics. | 212 |
| 2. The role of logistics in achieving sustainable development goals. | 218 |
| 3. Approaches to tracking progress in achieving sustainable development goals | 224 |

Chapter 11

| | |
|---|------------|
| Management of Partnership Relationships in the Supply Chain as a Tool for ESG Integration and Enhancing the Sustainability of a Logistics Service Provider (Halak I. I.) | 240 |
| 1. Key Elements of Sustainable Management and the ESG Strategy of a Logistics Service Provider | 243 |
| 2. Analysis of Existing Methods for Addressing the Problem and Formulation of the Objective for Optimal Development of the Approach | 249 |
| 3. Research Methodology for Managing Partnership Relationships in the Context of ESG Integration | 257 |

Chapter 12

**Reducing the life cycle cost of railway traction rolling stock
through the introduction of additive technologies
in locomotive repair production (Karashchuk V. O.) 271**

1. Use of additive technologies by global companies
for the railway industry. 272

2. Types and classification of methods and materials for 3-D printing . . . 281

3. Reducing the life cycle cost of railway traction rolling stock
through the introduction of 3-D printing technologies for spare parts. . . . 289

01

SECTION



INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

**ENSURING CYBER RESILIENCE TRANSFORMATION
OF PERSONNEL MANAGEMENT PROCESSES
IN A MULTI-PROJECT ENVIRONMENT**

Dotsenko N. V., Chumachenko I. V., Nekrasov I. B.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-1>

INTRODUCTION

In the era of digitalization, HR management requires a review of classic approaches to management to ensure the effective functioning of the company. The increasing speed of transformation and the lack of consideration of the specifics and needs of the organization make this process chaotic and sometimes lead to the opposite effect:

- loss of stability of functioning;
- information leaks;
- disruption of established business processes¹.

The analysis of the impact of digital technologies on the transformation of strategic management, described in the work of Donchak L., Pogryshchuk O., Sysoeva I., showed the need to implement innovative cyber defense systems, which in turn requires improving the digital infrastructure, increasing its accessibility, and revising the organization's corporate culture².

The implementation of projects in a multi-project environment of the company makes the issue of developing a policy for ensuring cyber resilience of processes relevant and requiring an urgent solution. Personnel management of portfolio projects involves the exchange of a large amount of data between elements of a multi-project environment, which leads to the need to take cybersecurity requirements into account.

Developing and implementing a comprehensive approach to increasing cyber resilience will ensure the resilience of the organization through preparedness

¹ Дворник О. Стратегії, виклики та успішні практики в епоху цифрової трансформації бізнесу. *Development Service Industry Management*. 2023. No 4. С. 107-111. URL: <https://dsim.khmnu.edu.ua/index.php/dsim/article/view/68>

² Дончак Л., Погрішук О., Сисоєва І. Стратегічний менеджмент у цифрову епоху: виклики та можливості. *Економіка та суспільство*. 2024. No 70. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5237>

for cyber threats, cyber risk management, and the development of recovery mechanisms after cyber attacks.

1. Analysis of existing methods for solving the problem of transforming human resource management processes and formulating the task

Transformation of HR processes in a multi-project environment occurs under constraints of time and cost of implementation. The speed of implementation of transformation processes leads to the fact that the audit process of the existing state of organizational and digital systems does not always take place. At the same time, transformation and implementation of new processes at critical infrastructure facilities are carried out in real time, ensuring configuration management of resources³.

Among the regulatory framework that regulates data security issues, this should be noted:

- standard ISO / IEC 27001 "Information security management systems";
- standard ISO / IEC 27701 "Privacy Information Management System";
- standard ISO / IEC 27005 "Information security risk management";
- standard ISO / IEC 27017 "Cloud security controls";
- standard ISO / IEC 22301 "Business Continuity management";
- General Data Protection Regulation (GDPR);
- the Network and Information Security Directive NIS2;
- Law of Ukraine "On Protection of Personal Data";
- Law of Ukraine "On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity in Ukraine";
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of General Requirements for Cybersecurity of Critical Infrastructure Facilities" ⁴.

When working with transnational companies, the issue of ensuring the protection of personal data in accordance with the GDPR standard arises, which is not always considered during the accelerated transformation of human resources management processes⁵.

³ Dotsenko , N., Chumachenko , I., Galkin , A., Kuchuk , H., Chumachenko , D. Modeling the Transformation of Configuration Management Processes in a Multi -Project Environment. *Sustainability* 2023. No. 15 (19), 14308. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914308> .

⁴ Постанова КМУ «Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>

⁵ Загальний регламент про захист даних (GDPR) URL: kmu.gov.ua/storage/app/media/uploaded-files/es-2016679.pdf <https://gdpr-text.com/uk/>

Implementing existing project management systems in a multi-project environment, in particular SAP, involves distributing access rights and working with many projects, but does not eliminate the risks associated with the influence of the human factor on the emergence of cyber risks⁶.

The conducted analysis of cyber threats identified typical risks that arise when transforming human resource management processes into a multi-project environment:

- risks of personal data confidentiality;
- risks of access management in a multi-project environment;
- the complexity of the security audit;
- risks of integrating digital platforms;
- risks of cyber incidents related to remote work;
- risks of using AI.

The issue of integrating human resource management processes with cyber management was considered in the works of N. Tyukhtenko, M. Navrotska⁷, T. Dluhopolska, and Huk. Yu.⁸, Mat N.H.N. & al⁹, Kiselak M.¹⁰.

By cyber resilience of human resource management processes in a multi-project environment, we mean the ability of project HR processes to anticipate, withstand, adapt, and recover from cyber incidents, while maintaining the continuity of personnel management and the reliability of resource provision for the needs of a multi-project environment.

Key HR processes from the perspective of ensuring cyber resilience are presented in Table 1.

The purpose of the study is to develop a model of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment.

The objectives of the study are:

- to analyse the approaches to ensuring cyber resilience of the organization and processes;

⁶ Створить бізнес із більшою відповідністю, стійкістю та потужнішим сталим розвитком URL: https://www.sap.com/ukraine/products/sustainability.html?url_id=banner-ua-homepage-row3-suite-pos8-sustainability-250520

⁷ Актуальні питання інноваційного управління людськими ресурсами в умовах адаптації бізнес-середовища до трансформаційних змін. (2025). *Серія: Економіка*, 29, 85-97. <https://doi.org/10.34079/2518-1394-2025-15-29-85-97>

⁸ Длугопольська Т.І., Гук Ю.В. Цифрова трансформація у сфері HR: напрями, проблеми та можливості. *Причорноморські економічні студії*. Вип. 62. 2021. С. 13-18. URL: <https://doi.org/10.32843/bses.62-2>

⁹ Mat , N.H.N, Jaafar , SM, Kamalbatcha , Z., & Derani , NES (2025). HRM Implementation , gig work , and the love framework : A systematic review of evolving dynamics in the modern digital workplace . *Multidisciplinary Reviews* , 9 (3), 2026113. <https://doi.org/10.31893/multirev.2026113>

¹⁰ Kiselak , M., Žižek , S.Š. (2026). The Impact of Digitalization on Human Resources Management . In : Mulej , M., Hrast , A., Štrukelj , T., Likar , B., Sarotar Žižek , S. (eds) Bases for an Innovative Sustainable Socially Responsible Society Volume II. Palgrave Studies in Governance , Leadership and Responsibility . Palgrave Macmillan , Cham . https://doi.org/10.1007/978-3-031-96891-4_6

- to analyse the impact of cyber risks on project management resource provision processes in a multi-project environment;
- to develop a model for the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment;
- to develop the recommendations for the implementation of the model.

Table 1

Key HR processes

| HR – process | Criticality |
|--|-------------|
| Access management | Critical |
| Allocation of resources between projects | Critical |
| Personnel planning | High |
| Evaluation and KPIs | High |
| Competency management | High |
| Recruitment and selection | Medium/high |
| Training and development | Medium |
| Engagement management | Medium |

2. Main research material

For recovery programs and critical infrastructure projects it is advisable to use the Zero principle Trust Architecture¹¹, contributing to increase cybersecurity in information structures. This becomes extremely important in conditions of war and post-war restoration of critical infrastructure facilities because it contributes to increasing the level of security of the facility.

According to NIST Cybersecurity Framework with the main elements of Improving Critical Infrastructure Cybersecurity is a Function and Category¹²:

- Identify (Asset Management ID.AM; Business Environment ID.BE; Governance ID.GV; Risk Assessment ID.RA; Risk Management Strategy ID.RM; Supply Chain Risk Management ID.SC);
- Protect (Identity Management and Access Control PR.AC; Awareness and Training PR.AT; Data Security PR.DS; Information Protection Processes and Procedures PR.IP; Maintenance PR.MA; Protective Technology PR.PT);
- Detect (Anomalies and Events DE.AE; Security Continuous Monitoring DE.CM; Detection Processes DE.DP);

¹¹ Zero Trust Architecture URL: <https://www.nccoe.nist.gov/projects/building-blocks/zero-trust-architecture>

¹² NIST Cybersecurity Framework v.1.1, Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.04162018.pdf>

- Respond (Response Planning RS.RP; Communications RS.CO; Analysis RS.AN; Mitigation RS.MI; Improvements RS.IM);
- Recover (Recovery Planning RC.RP; Improvements RC.IM; Communications RC.CO).

Resource management according to the PMI PMBoK standard involves the following processes:

- Resources Management Planning (RMP);
- Operations Resources Estimation (ORE);
- Resources Acquisition (RA);
- Project Team Development (PTD);
- Team Management (TM);
- Resources Control (RC).

NIST Cybersecurity Element Projection The framework for resource management processes in projects is given in Table 2.

Functional identification ensures strategic alignment of human resource management processes with cyber risks implementation of projects in a multi-project environment. As a result of the analysis of the categories Governance, Risk Assessment, Business Environment in the context of Resource Management Planning, Operations Resources Estimation forms a matrix of critical project roles, Cyber-HR Risk Register, a team cyber resilience competency map. Human risk assessment will identify competency gaps, key role overload, and single point of failure in the team, outsourcing risks (in the process of acquiring resources) and risks associated with the functioning of geographically distributed teams.

The next stage is to form a team capable of functioning resiliently, adaptively, ensuring a certain level of cyber resilience. Based on the implementation of Identity Management and Access Control; Awareness and Training; Information Protection Processes and Procedures; Maintenance within processes Resources Acquisition and Project Team Development is forming a model for distributing access by roles, a plan for developing competencies and Cyber-aware onboarding / offboarding.

Understanding that a team functions as an organizational system makes it possible to provide both technical and organizational support for management processes.

Incident management allows for rapid response to anomalies and ensures reliable operation of the human resources management system. Incident response protection should be built into HR processes and safe default scenarios and automatic response scenarios should be defined.

A contextual model of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of personnel management processes in a multi-project environment is presented on Fig 1.

Table 2

NIST Cybersecurity Element Projection Framework for resource management processes in projects

| NIST CF | RMP | ORE | RA | PTD | TM | RC |
|---------|-----|-----|----|-----|----|----|
| ID.AM | + | + | + | + | + | + |
| ID.BE | + | + | + | + | | + |
| ID.GV | + | + | + | + | + | + |
| ID.RA | + | + | | + | | + |
| ID.RM | + | | | + | + | |
| ID.SC | | | | | + | + |
| PR.AC | + | + | + | + | + | + |
| PR.AT | | | | + | + | + |
| PR.DS | + | | | + | + | + |
| PR.IP | + | + | + | + | + | + |
| PR.MA | + | | | + | + | + |
| PR.PT | + | + | | + | + | |
| DE.AE | + | + | + | + | + | + |
| DE.CM | + | | | | + | + |
| DE.DP | | | | | + | + |
| RS.RP | + | | | | + | + |
| RS.CO | + | | | | + | + |
| RS.AN | + | + | | + | + | + |
| RS.MI | + | | | + | + | + |
| RS.IM | + | + | + | + | + | + |
| RC.RP | + | | | + | + | + |
| RC.IM | + | | | + | + | + |
| RC.CO | | | | | + | + |

The inputs to the context model are:

- project information;
- process cybersecurity requirements;
- cyber resilience requirements;
- resource provision.

The outputs of the contextual model are:

- cyber risk management plan;
- incident recovery plan;
- recommendations for developing a cyber-resilient team.

When decomposing the model, tunneled outputs were added:

- cyberrisk register;
- incident response.

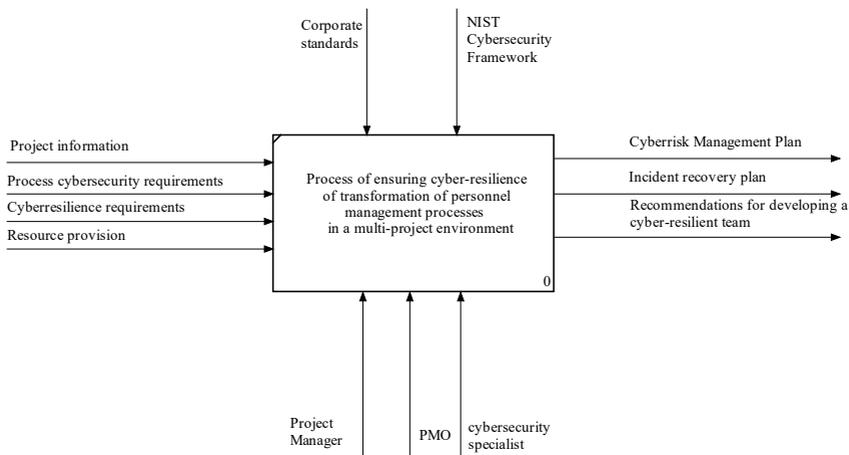


Fig. 1. Context model of the process of ensuring cyber resilience of transformation of personnel management processes in a multi-project environment

Project Manager, PMO, cybersecurity are involved in the process specialist, who act on the basis of regulatory documentation, corporate standards, NIST Cybersecurity Framework.

As a result of the decomposition of the contextual model, taking into account the requirements for cyber resilience, a decomposition model of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of personnel management processes in a multi-project environment was built (Figure 2).

The Identify (ID) process involves identifying/understanding the resources, risks, and context associated with managing project human resources in a multi-project environment.

Protect (PR) process is designed to create safeguards to maintain the security of human resource management processes.

Detect (DE) process is designed to identify anomalies and events that may indicate incidents related to the implementation of human resource management processes.

The Respond (RS) process implements a response to identified incidents in accordance with the cyber risk management plan. The Recover (RC) process ensures recovery from events and improves human resource management processes from the perspective of ensuring cyber resilience of processes.

To analyze the effectiveness of the model, the proposed system of metrics is given in Table 3.

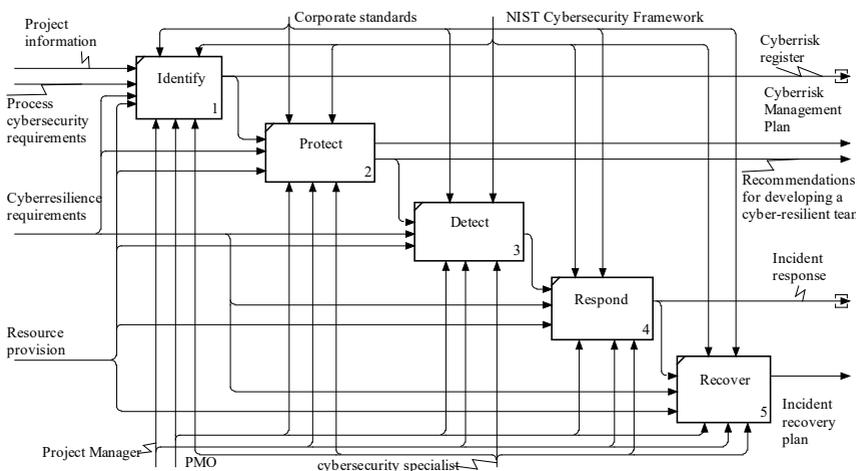


Fig. 2. Decomposition model of the process of ensuring cyber resilience of transformation of personnel management processes in a multi-project environment

Table 3

Metrics for ensuring cyber resilience of HR management processes

| Metrics | Description |
|---|--|
| Detection Effectiveness | |
| MTTD-HR Mean time to detect HR incident | Average time from appearances incident before it detection |
| Incident detection rate | HR incidents detected before escalation |
| Proactive detection ratio | Fraction incidents detected preventively |
| Analysis Quality | |
| Root cause coverage | % of incidents from formalized RCA |
| Role-level analysis | Role-Level Analysis Index |
| Systemic cause ratio | % of causes that are systemic rather than individual |
| Response Effectiveness | |
| Decision latency | Time from analysis to management decision |
| Corrective action rate | % of incidents from implemented corrective actions |
| Role frequency adjustment | Frequency of role correction after incidents. Indicator adaptability |
| Learning Effectiveness | |
| Lessons learned utilization rate | % lessons learned , actually used in new projects |

Continuation of table 3

| | |
|-------------------------------|--|
| Training alignment index | Fraction exercises related to real incidents |
| Competency update rate | Update frequency competency models |
| Organizational Memory Metrics | |
| Incident reuse index | How many times incident reused |
| Knowledge formalization rate | % of incidents converted to knowledge |
| Cross-project transfer ratio | Using knowledge between projects |
| Impact Metrics | |
| Incident recurrence rate | Frequency similar incidents |
| Human risk exposure index | Integral indicator human risks |
| Project disruption reduction | Reduction influence incidents per project |

The cyber resilience contours of human resource management processes are presented in Table 4.

Table 4

Contours of cyber resilience

| Contour | Elements |
|------------|---|
| Protection | Zero Trust; RBAC/ABAC; data encryption, segmentation and prioritization of projects |
| Continuity | HR-BCP/HR-DRP; backup HR scenarios; alternative HR management channels |
| Adaptation | AI audit, process audit, human in the loop, role and access updates |

When implementing the model, project documents are formed, which reflect measures to ensure cyber resilience of human resources management processes:

- cyber risk management plan;
- incident recovery plan;
- recommendations for developing a cyber-resilient team;
- cyberrisk register;
- incident response.

CONCLUSIONS

The issue of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment is considered. It is determined that despite the advantages, the digital transformation of management processes has significant challenges related to cybersecurity issues and ensuring cyber resilience of management processes.

For human resource management processes in a multi-project environment, ensuring cyber resilience and responding to cyber threats is most relevant, since the level of cyber threats increases in a multi-project environment, which can lead to the loss or leakage of confidential information. Based on the analysis

of cyber threats, the most critical processes from the point of view of ensuring cyber resilience were identified.

The concept of cyber resilience of human resource management processes in a multi-project environment has been introduced. A projection of NIST Cybersecurity elements has been developed Framework for resource management processes in projects, which became the basis for developing a model of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment.

Models of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment (context model and process decomposition model) have been developed. The contours of cyber resilience of processes have been identified: protection contour, continuity contour, adaptation contour. The proposed models can be applied to formalize transformation processes in terms of ensuring cyber resilience.

The study is being conducted within the framework of the research project 2025.07/0038 of the National Fund of Ukraine on the topic “Scientific Foundations for the Formation and Management of Human Capital in a Multi-Project Environment to Support the Sustainable Development of Ukraine’s Recovery Programs”.

SUMMARY

Digital transformation of management processes promotes the development of companies, but requires the development of approaches to ensure the cyber resilience of human resource management processes.

The purpose of the study is to develop a model of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment.

The concept of cyber resilience of human resource management processes in a multi-project environment is considered. An analysis of approaches to ensuring cyber resilience of the organization and processes is carried out, the regulatory framework governing data security issues is considered. An analysis of the impact of cyber risks on the processes of resource provision of project management in a multi-project environment was carried out, which allowed to identify processes with a high level of criticality of cyber resilience. A projection of NIST Cybersecurity elements is constructed Framework for resource management processes in projects. Models of the process of ensuring cyber resilience of the transformation of human resource management processes in a multi-project environment (contextual model and process decomposition model) have been developed. Recommendations for the implementation of the developed models are provided.

Bibliography

1. Дворник О. Стратегії, виклики та успішні практики в епоху цифрової трансформації бізнесу. *Development Service Industry Management*. 2023. No 4. С. 107–111. URL: <https://dsim.khmnu.edu.ua/index.php/dsim/article/view/68>
2. Дончак Л., Погрішук О., Сисоєва І. Стратегічний менеджмент у цифрову епоху: виклики та можливості. *Економіка та суспільство*. 2024. No70. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5237>
3. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Galkin, A., Kuchuk, H., Chumachenko, D. (2023) "Modeling the Transformation of Configuration Management Processes in a Multi-Project Environment". *Sustainability*, №15(19), 14308. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151914308>.
4. Постанова КМУ «Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>
5. Загальний регламент про захист даних (GDPR) URL: <https://gdpr-text.com/uk/>
6. Створіть бізнес із більшою відповідністю, стійкістю та потужнішим сталим розвитком URL: https://www.sap.com/ukraine/products/sustainability.html?url_id=banner-ua-homepage-row3-suite-pos8-sustainability-250520
7. Актуальні питання інноваційного управління людськими ресурсами в умовах адаптації бізнес-середовища до трансформаційних змін. *Серія: Економіка*, 2025. №29, 85-97. <https://doi.org/10.34079/2518-1394-2025-15-29-85-97>
8. Длугопольська Т.І., Гук Ю.В. Цифрова трансформація у сфері hr: напрями, проблеми та можливості. *Причорноморські економічні студії Вип. 62. 2021*. С. 13-18. URL: <https://doi.org/10.32843/bses.62-2>
9. Mat, N. H. N., Jaafar, S. M., Kamalbatcha, Z., & Derani, N. E. S. (2025). HRM Implementation, gig work, and the amo framework: A systematic review of evolving dynamics in the modern digital workplace. *Multidisciplinary Reviews*, 9(3), 2026113. <https://doi.org/10.31893/multirev.2026113>
10. Kiselak, M., Žižek, S.Š. (2026). The Impact of Digitalization on Human Resources Management. In: Mulej, M., Hrast, A., Štrukelj, T., Likar, B., Šarotar Žižek, S. (eds) *Bases for an Innovative Sustainable Socially Responsible Society Volume II*. Palgrave Studies in Governance, Leadership and Responsibility. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96891-4_6
11. Zero Trust Architecture URL: <https://www.nccoe.nist.gov/projects/building-blocks/zero-trust-architecture>

12. NIST Cybersecurity Framework v.1.1, Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.04162018.pdf>

Information about the authors:

Dotsenko Nataliia Volodymyrivna,

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Professor at the Project Management in Urban Management and

Construction Department,

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

17, Chornoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Chumachenko Igor Volodymyrovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Project Management in Urban Management and Construction

Department,

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,

17, Chornoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Nekrasov Ivan Borysovyich,

Candidate of Technical Sciences, Research Fellow,

Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the

Armed Forces of Ukraine,

28-B, Povitroflotskyi ave., Kyiv, 03049, Ukraine

**SOFTWARE METHODS
FOR ENVIRONMENTAL THREAT ASSESSMENT
BASED ON REAL-TIME DATA ANALYSIS**

Oleshchenko L. M.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-2>

INTRODUCTION

The rapid intensification of anthropogenic activities, urbanization, and climate change has led to a significant increase in the frequency and severity of environmental threats, including air and water pollution, extreme weather events, and ecosystem degradation. These challenges pose serious risks to public health, economic stability, and sustainable development at both regional and global levels. As a result, timely detection, assessment, and mitigation of environmental threats have become critical priorities for modern societies.

In recent years, the widespread deployment of environmental sensors, IoT devices, satellite platforms, and citizen sensing systems has enabled the continuous collection of large volumes of heterogeneous environmental data.

Unlike traditional environmental monitoring, which relies on periodic measurements and offline analysis, contemporary monitoring infrastructures generate high-velocity data streams that reflect rapidly changing environmental conditions in near real time. This shift has fundamentally transformed environmental data from static datasets into dynamic streaming data, requiring new computational paradigms for effective analysis and decision support. The availability of streaming environmental data alone does not guarantee timely or reliable threat assessment. Conventional software systems and analytical methods are often designed for batch processing and are not capable of handling the velocity, volume, and variability inherent in continuous data streams.

Environmental threats are frequently characterized by complex spatiotemporal patterns, nonlinear dynamics, and uncertainty, which further complicate real-time interpretation and forecasting. These limitations highlight the need for advanced software methods that can operate under real-time constraints while ensuring scalability, robustness, and analytical accuracy.

Software methods for environmental threat assessment based on streaming data analysis provide a promising solution to these challenges. By integrating stream processing architectures, intelligent data analytics, and adaptive modeling techniques, such methods enable continuous monitoring, early detection of anomalous environmental events, and predictive assessment of potential risks. The use of machine learning and data-driven models within streaming environments allows systems to learn evolving patterns, adapt to changing conditions, and support proactive rather than reactive decision-making.

The relevance of this research is further reinforced by its practical importance for critical domains such as public health protection, disaster risk reduction, smart city management, and environmental policy development.

Real-time environmental threat assessment systems can support rapid response to pollution incidents, inform early warning mechanisms, and enhance the resilience of urban and natural ecosystems. In this context, the development of scientifically grounded and software-oriented methods for streaming data analysis represents not only a technological challenge but also a societal necessity.

The research of software methods for environmental threat assessment based on streaming data analysis addresses fundamental gaps in existing environmental monitoring systems and contributes to the advancement of intelligent, real-time decision-support technologies capable of responding to the growing complexity and urgency of environmental challenges in the modern world.

The development of software-based environmental monitoring systems is closely linked to advances in sensor networks and data transmission technologies. One of the foundational contributions in this area was provided by Akyildiz I.F., Melodia T. and Chowdhury K.R., who presented a comprehensive survey of wireless multimedia sensor networks. Their work analyzed architectures, communication protocols, and data processing challenges associated with high-volume and heterogeneous sensor data, forming the technological basis for continuous environmental data acquisition and streaming analysis¹.

The transition from data collection to predictive analytics based on streaming data was further demonstrated by Ramakrishnan N., Butler P., Muthiah S., Self N., Khandpur R.P., Saraf P., et al., who introduced the EMBERS system for forecasting civil unrest using open-source indicators. Although focused on social phenomena, this study established important methodological principles for real-time threat assessment, event detection, and large-scale

¹ Akyildiz I.F., Melodia T., Chowdhury K.R. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 2007, vol. 51, no. 4, pp. 921–960. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.10.002>.

stream processing that are directly applicable to environmental threat analysis².

The integration of sensing technologies into urban-scale systems was examined by Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L. and Zorzi M., who explored the role of the IoT in smart cities. Their research highlighted the importance of distributed sensing, data fusion, and real-time processing for monitoring urban environments, including air quality, noise pollution, and energy efficiency. This work emphasized the need for scalable software architectures capable of handling continuous data streams³.

The societal relevance of environmental monitoring systems is reinforced by studies linking environmental indicators to economic and health outcomes. Mujtaba G. and Shahzad S.J.H. analyzed long-term air pollution data across OECD countries and demonstrated significant relationships between pollutant levels, economic growth, and public health. Their findings underline the necessity of reliable data-driven assessment tools to support sustainable development and policy decision-making⁴. Complementing macro-level analyses, Keswani A., Akselrod H. and Anenberg S. investigated the clinical and public health impacts of air pollution in the context of climate change. Their work provided evidence that real-time environmental monitoring is critical for early detection of health risks and for informing adaptive mitigation strategies, thereby strengthening the case for continuous, software-based environmental threat assessment systems⁵.

A broader conceptual framework for integrating environmental monitoring into urban development was provided by Bibri S.E. and Krogstie J., who conducted an extensive interdisciplinary review of smart sustainable cities. Their study emphasized the role of advanced analytics, real-time data streams, and intelligent decision-support systems in addressing environmental challenges within complex urban ecosystems⁶. Recent advances in machine learning and

² Ramakrishnan N., Butler P., Muthiah S., Self N., Khandpur R.P., Saraf P., et al. Beating the News with EMBERS: Forecasting civil unrest using open source indicators. Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2014, pp. 1799–1808. DOI: 10.1145/2623330.2623373.

³ Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 22–32. DOI: 10.1109/JIOT.2014.2306328.

⁴ Mujtaba G., Shahzad S.J.H. Air pollutants, economic growth and public health: implications for sustainable development in OECD countries. Environmental Science and Pollution Research, 2021, vol. 28, pp. 12686–12698. DOI: 10.1007/s11356-020-11212-1.

⁵ Keswani A., Akselrod H., Anenberg S. Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. NEJM Evidence, 2022, vol. 1, no. 7, article EVIDra2200068. DOI: 10.1056/EVIDra2200068.

⁶ Bibri S.E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. Sustainable Cities and Society, 2023, vol. 31, pp. 183–212. DOI: 10.1016/j.scs.2017.02.016.

data stream analysis have further expanded the capabilities of threat detection systems. Yang Y., Wu Q., He B., Peng H., Yang R., Hao Z. and Liao Y. proposed a contrastive learning framework for social bot detection based on structural entropy and multi-view data representations. Although applied to social data, the methodological innovations presented in this work demonstrate the potential of advanced representation learning for analyzing complex, evolving data streams⁷.

Sun T., Liu C., Chen L., Qian Z., Li P. and Zhu Q. introduced a unified framework for multi-modal detection that leverages dynamic interactions and evolving stances. The proposed approach illustrates how heterogeneous streaming data sources can be integrated and analyzed in real time, offering transferable concepts for multi-source environmental threat assessment⁸.

The most recent developments focus explicitly on environmental applications of machine learning (ML). Rajesh M., Babu R.G., Moorthy U. and Easwaramoorthy S.V. presented a ML-driven framework for real-time air quality assessment and predictive environmental health risk mapping. Their work integrates streaming sensor data with predictive models to generate continuous risk assessments, representing a mature example of software-based environmental threat analysis grounded in real-time data processing⁹.

Many advanced learning models suffer from limited interpretability, which complicates the explanation and justification of system decisions to stakeholders, policymakers, and domain experts. This issue is particularly critical in environmental applications, where transparency and trust are essential.

The validation of software-based environmental threat assessment systems remains challenging, especially in the context of rare and extreme events. Such events are often underrepresented in historical data, making it difficult to evaluate model robustness and generalization capabilities.

Addressing these limitations requires further research into explainable artificial intelligence, adaptive real-time processing techniques, and resilient software architectures capable of maintaining reliable operation under uncertain and evolving conditions.

⁷ Yang Y., Wu Q., He B., Peng H., Yang R., Hao Z., Liao Y. SeBot: Structural entropy guided multi-view contrastive learning for social bot detection. Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2024, pp. 3841–3852. DOI: 10.1145/3637528.3671871.

⁸ Sun T., Liu C., Chen L., Qian Z., Li P., Zhu Q. A unified framework for multi-modal rumour detection via multi-level dynamic interaction with evolving stances. Information Processing & Management, 2025, vol. 62, no. 3, article 104066. DOI: 10.1016/j.ipm.2025.104066.

⁹ Rajesh M., Babu R.G., Moorthy U., Easwaramoorthy S.V. Machine learning-driven framework for realtime air quality assessment and predictive environmental health risk mapping. Sci Rep. 2025, 15(1):28801. DOI: 10.1038/s41598-025-14214-6.

1. Software methods for environmental threat assessment

Environmental threat assessment is a multidisciplinary process aimed at identifying, evaluating, and forecasting risks posed by natural and anthropogenic factors to ecosystems, human health, and critical infrastructure.

From a software engineering perspective, environmental threats are represented as complex events emerging from continuous streams of heterogeneous data, including sensor measurements, satellite observations, meteorological inputs, and socio-environmental indicators.

Traditional assessment approaches relied on retrospective analysis of static datasets, which limited their ability to support timely decision-making. In contrast, modern environmental monitoring systems increasingly operate in real time, requiring software methods capable of continuous data ingestion, on-the-fly analysis, and adaptive response. This shift necessitates the development of scalable, fault-tolerant, and intelligent software solutions that can process high-velocity data streams while maintaining analytical accuracy and robustness.

Software methods for environmental threat assessment can be classified according to several key dimensions: data processing paradigm, analytical approach, temporal characteristics, and level of automation (Tables 1-2).

Table 1

Classification by data processing paradigm

| Data processing paradigm | Description | Typical use cases |
|---------------------------------|---|--|
| <i>Batch processing</i> | Analysis of accumulated historical data | Long-term trend analysis, policy evaluation |
| <i>Micro-batch processing</i> | Near-real-time processing with short delays | Periodic air quality updates |
| <i>Stream processing</i> | Continuous, event-driven data processing | Real-time pollution detection, early warning systems |

Stream processing paradigms are particularly relevant for environmental threat assessment, as they enable immediate reaction to rapidly evolving environmental conditions.

Machine learning-based approaches dominate contemporary systems due to their adaptability and ability to handle non-stationary data streams.

Environmental threat assessment systems are commonly implemented using layered or pipeline-based architectures designed to support continuous data flow.

Typical architectural layers are next.

1. *Data acquisition layer* – sensors, IoT devices, remote sensing platforms.
2. *Stream ingestion layer* – message brokers (e.g., event queues, data streams).

3. *Stream processing layer* – real-time analytics engines.
4. *Analytics and intelligence layer* – ML models, anomaly detection, forecasting.
5. *Visualization and decision support layer* – dashboards, alerts, APIs.

Table 2

Classification by data analytical methods

| Method category | Key characteristics | Examples of applications |
|--------------------------|--|---|
| Statistical methods | Linear/nonlinear modeling, descriptive analytics | Threshold-based pollution alerts |
| Rule-based systems | Expert-defined rules and heuristics | Regulatory compliance monitoring |
| Machine learning methods | Data-driven pattern recognition | Air quality prediction, anomaly detection |
| Deep learning methods | Hierarchical feature learning | Spatiotemporal pollution forecasting |
| Hybrid methods | Combination of statistical and ML techniques | Robust real-time threat assessment |

Such architectures enable modularity and scalability while supporting real-time analytics under high data velocity conditions.

Real-time environmental analytics requires methods that operate under strict latency constraints and can adapt to evolving data distributions (Table 3).

Table 3

Real-time analytical tasks

| Task | Objective | Software methods |
|-------------------|--|--|
| Event detection | Identify abnormal environmental conditions | Change-point detection, stream clustering |
| Anomaly detection | Detect deviations from normal behavior | Autoencoders, isolation-based methods |
| Prediction | Forecast future threat levels | Online regression, recurrent neural networks |
| Risk assessment | Estimate potential impact | Probabilistic modeling, fuzzy inference |

Software-based approaches to environmental threat assessment offer several significant advantages that make them well suited for modern monitoring scenarios. One of the primary benefits is the capability for continuous monitoring and early detection of environmental threats.

By processing streaming data in real-time, software systems can identify emerging anomalies and hazardous conditions at early stages, enabling timely

responses and mitigation actions. This continuous operation contrasts with traditional batch-oriented methods, which often fail to capture rapidly evolving environmental phenomena. Another important advantage lies in the scalability of software-based methods. Contemporary stream processing architectures are designed to handle large volumes of heterogeneous data originating from diverse sources, such as sensor networks, remote sensing platforms, and meteorological services. This scalability allows environmental monitoring systems to expand in both spatial and temporal dimensions without fundamental redesign.

Current research in software-based environmental threat assessment is oriented toward enhancing system intelligence, adaptability, and robustness. One prominent trend is the integration of explainable ML techniques into real-time analytics frameworks, aiming to improve model transparency and user trust without sacrificing predictive performance. Another active research direction involves the development of self-adaptive and self-healing environmental monitoring systems that can automatically adjust their behavior in response to changes in data patterns, system performance, or environmental conditions.

In parallel, there is growing interest in the fusion of physical models with data-driven approaches. By combining domain-specific knowledge with machine learning, hybrid models can improve prediction accuracy and ensure consistency with known environmental processes. The emergence of distributed and edge-based analytics platforms is reshaping the architectural landscape of environmental monitoring systems. These platforms enable data processing closer to data sources, reducing latency and enhancing scalability in large-scale deployments.

SaveEcoBot platform represents a significant milestone in the development of environmental information systems in Ukraine.

As the first comprehensive environmental monitoring system of its kind in the country, *SaveEcoBot* integrates data from multiple sources to provide near real-time information on key environmental indicators.

By aggregating, processing, and visualizing diverse environmental data, the platform supports both public awareness and scientific analysis, thereby addressing a critical gap in national environmental information infrastructure¹⁰.

The importance of *SaveEcoBot* is grounded in its ability to transform raw environmental data into actionable knowledge. In many regions, particularly those with limited access to centralized monitoring systems, fragmented or delayed environmental data have historically hindered timely decision-making.

SaveEcoBot addresses this challenge by offering an accessible, web-based

¹⁰ *SaveEcoBot*. The first environmental system in Ukraine. URL: <https://www.saveecobot.com/en>.

interface through which users, researchers, and policymakers can observe current environmental conditions, track trends, and identify emerging threats.

The map in Fig. 1 indicates a spatial cluster of elevated air quality index (AQI) values concentrated around the industrial zone, suggesting a localized pollution hotspot likely associated with industrial activity and limited dispersion conditions.

Fig. 1 reveals a potential environmental hazard manifested as a localized concentration of elevated air pollution indicators in the vicinity of the industrial area, where multiple monitoring stations report consistently higher values compared to surrounding regions. This spatial pattern suggests an increased risk of adverse air quality impacts, likely linked to industrial emissions and insufficient pollutant dispersion, which may pose a threat to public health and requires continuous monitoring and further investigation.



Fig. 1. Spatial distribution of air quality monitoring stations and AQI levels in the industrial area (SaveEcoBot platform, 28.12.2025)

The platform's emphasis on transparency and broad accessibility enhances environmental literacy and fosters engagement with environmental issues across society. From a technological perspective, SaveEcoBot exemplifies the potential of software platforms to support streaming data analysis and real-time environmental assessment. Although not originally designed as a research tool, the system demonstrates how harmonized data flows from sensor networks, governmental databases, and citizen reporting can be synthesized into a coherent analytical environment. This approach aligns with contemporary paradigms of environmental threat assessment, in which data velocity and heterogeneity

demand flexible and scalable software solutions. By enabling continuous data ingestion and visualization, SaveEcoBot foreshadows more advanced analytical frameworks that incorporate real-time anomaly detection, predictive modeling, and automated alerts.

The platform's architecture highlights the potential for future enhancements through the integration of ML and real-time processing techniques. For example, predictive modules could be developed to forecast critical environmental events, while anomaly detection algorithms could provide early warnings of pollution spikes or hazardous exposures. Such capabilities would extend SaveEcoBot's utility from a primarily informational system to an intelligent decision-support infrastructure capable of proactive environmental threat assessment. In this regard, SaveEcoBot offers an invaluable case study for the application of advanced software methods in real-world environmental monitoring.

SaveEcoBot is not only a pioneering environmental system within the Ukrainian context but also a practical demonstration of how software platforms can support continuous environmental assessment. Its role in aggregating heterogeneous data, promoting transparency, and enabling broad access to environmental information underscores the importance of integrated digital solutions in addressing complex socio-environmental challenges.

As environmental monitoring evolves toward more intelligent, adaptive models, platforms such as SaveEcoBot provide both inspiration and foundational infrastructure for next-generation analytical systems.

The presented in Fig. 2 fragment of SaveEcoBot data illustrates a snapshot of multi-parameter environmental monitoring collected from a single device at a specific time point. The measurements indicate moderate particulate matter concentrations, with $PM_{10} = 52.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $PM_{2.5} = 28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which may exceed recommended health guidelines and suggest potential short-term air quality concerns. In contrast, gaseous pollutants such as formaldehyde and total volatile organic compounds (TVOC) are reported at negligible levels, while basic meteorological parameters (temperature and pressure) remain within normal ranges.

This data analysis fragment demonstrates the platform's capability to integrate heterogeneous sensor readings for comprehensive, time-synchronized environmental assessment and highlights the importance of particulate matter as a key indicator of localized pollution risk.

SaveEcoBot platform provides capabilities for real-time environmental data analysis by continuously collecting, synchronizing, and visualizing heterogeneous sensor streams, including air quality indicators and meteorological

parameters. Its analytical functionality enables users to observe short-term dynamics, detect abnormal patterns, and assess correlations between pollutants and environmental conditions as they evolve over time.

| device_id | phenomenon | value | logged_at |
|-----------|------------|-------------|--------------------------------|
| 0 | 24764 | pm1 | 2.618 2025-07-31 10:17:00 |
| 1 | 24764 | pm25 | 3.805 2025-07-31 10:17:00 |
| 2 | 24764 | pm10 | 6.515 2025-07-31 10:17:00 |
| 3 | 24764 | temperature | 17.831 2025-07-31 10:17:00 |
| 4 | 24764 | humidity | 82.502 2025-07-31 10:17:00 |
| 5 | 24764 | pressure_pa | 984315.110 2025-07-31 10:17:00 |
| 6 | 24764 | pm1 | 1.998 2025-07-31 10:18:00 |
| 7 | 24764 | pm25 | 3.078 2025-07-31 10:18:00 |
| 8 | 24764 | pm10 | 5.510 2025-07-31 10:18:00 |
| 9 | 24764 | temperature | 17.910 2025-07-31 10:18:00 |

```

def read_csv_safely(path: str) -> pd.DataFrame:
    df = pd.read_csv(path)
    df.columns = [c.strip() for c in df.columns]
    return df

dfs_raw = {p: read_csv_safely(p) for p in paths}

for p, d in dfs_raw.items():
    print("\nFILE:", p)
    display(d.head(10))
    print("shape:", d.shape)
    print("columns:", list(d.columns))

```

Fig. 2. Fragment of SaveEcoBot data analysis from IoT device 24764

By integrating time-series visualization, threshold comparison with regulatory limits, and interactive exploration, SaveEcoBot supports rapid situational awareness and evidence-based decision-making for environmental risk assessment (Fig. 3).

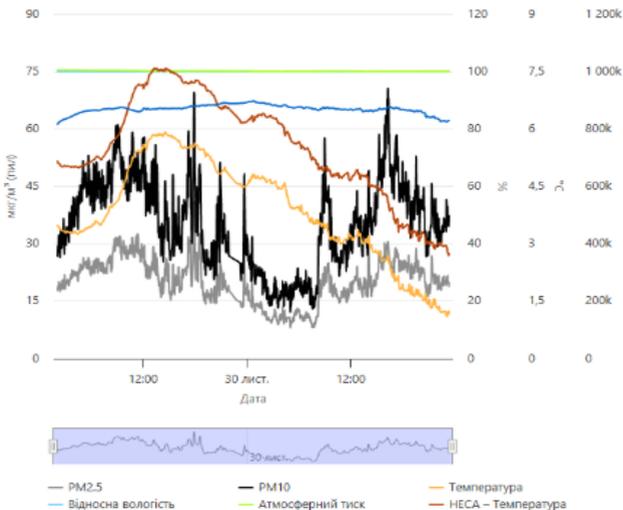


Fig. 3. Air quality data at the address Yuriy Popravky Street, 4 in Kyiv (for the period from 28.11.2025 to 30.11.2025)

The presented figure exemplifies these capabilities by showing the temporal evolution of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations alongside temperature, atmospheric pressure, and relative humidity. The chart reveals pronounced short-term fluctuations in particulate matter, with several peaks approaching or exceeding recommended safety thresholds, while meteorological variables change more smoothly. Notably, increases in particulate concentrations coincide with periods of relatively stable pressure and decreasing temperature, suggesting limited dispersion conditions that may exacerbate pollution accumulation.

Real-time analytics in SaveEcoBot facilitate the identification of hazardous episodes, support the interpretation of pollution–weather interactions, and enable early warning of potentially adverse air quality events.

2. Real-time radiation monitoring integrated with data processing and analysis of solar activity and solar flares

The research of radiation emissions in real time, conducted in parallel with the processing and analysis of solar activity and solar flare data, is of critical scientific and practical importance. Solar activity is a primary driver of variations in cosmic radiation, including high-energy particles and electromagnetic emissions that directly affect the near-Earth space environment. Sudden increases in radiation levels caused by solar flares and coronal mass ejections can pose significant risks to space-borne and ground-based technological systems, as well as to human health in aviation and space missions. Therefore, integrating real-time radiation monitoring with continuous solar data analysis enables timely detection of hazardous events and supports rapid decision-making processes.

From a methodological perspective, the parallel analysis of radiation measurements and solar activity parameters allows for the identification of causal relationships and temporal correlations between solar phenomena and radiation dynamics. Real-time data streams from radiation sensors, when synchronized with observations of solar flares, sunspot activity, and solar flux indices, provide a comprehensive framework for modeling radiation variability.

Such an approach improves the accuracy of predictive models and enhances the understanding of energy transfer mechanisms from the Sun to the Earth's magnetosphere and atmosphere.

The real-time integration of radiation monitoring and solar data analytics is essential for the development of advanced early-warning systems. These systems can support space weather forecasting by detecting precursors of extreme solar events and estimating their potential radiological impact. The

ability to process and analyze large volumes of heterogeneous data in parallel is particularly important in the context of modern observational infrastructures, which rely on distributed sensors, satellite platforms, and high-performance computing environments.

The results of such integrated studies have long-term significance for the design of resilient technological systems and radiation protection strategies. By improving situational awareness of radiation conditions influenced by solar activity, this research contributes to safer satellite operations, more reliable communication and navigation systems, and enhanced protection of critical infrastructure. Consequently, real-time radiation research combined with intelligent analysis of solar activity represents a key interdisciplinary direction at the intersection of space physics, data science, and applied engineering.

Research of streaming data on solar radiation and analysis of indicators from open platforms using software methods was conducted. The basis of the air quality monitoring system is a block of three metal-oxide semiconductor sensors of the MQ series, located on the right side of the board. This block includes sensors MQ-3, MQ-7 and MQ-9, each of which has a similar structure: a ceramic tube with a built-in heating element, covered with a sensitive layer of tin dioxide. The principle of their operation is based on a change in the electrical conductivity of this layer.

These sensors are mounted on expansion boards and enclosed in cylindrical stainless-steel mesh housings, which serve both as particulate filters and as explosion-protection elements due to the presence of internal heating components.

Each sensor contains a micro-ceramic tube coated with a tin dioxide (SnO_2) sensitive layer and an embedded nickel–chromium heating coil.

During operation, the heating element raises the temperature of the SnO_2 layer to activate surface chemical reactions. In clean air, oxygen molecules adsorb onto the sensor surface and capture free electrons, resulting in high electrical resistance. When target gases are present, such as ethanol vapors (MQ-3), carbon monoxide (MQ-7), or carbon monoxide and combustible gases like methane and LPG (MQ-9), they react with the adsorbed oxygen. This reaction releases trapped electrons back into the conduction band, causing a decrease in sensor resistance. The sensor is configured as part of a voltage divider, and the resulting voltage change is sampled by the ADC. An increase in gas concentration corresponds to an increase in the measured output voltage and, consequently, higher ADC readings. The MQ-7 sensor operates with a cyclic heating profile, alternating between high-temperature cleaning and low-temperature sensing phases to improve selectivity for carbon monoxide.

Radiation measurement using a Geiger–Müller tube

Ionizing radiation detection is performed using a Geiger–Müller (GM) tube, specifically the J-305 glass tube, located in the lower section of the device. The tube consists of a sealed glass envelope filled with a low-pressure inert gas mixture and equipped with a central anode wire and a conductive cathode layer. A high voltage, typically in the range of 380–400 V, is applied between the electrodes, establishing a strong electric field without sustaining a continuous current.

When ionizing radiation (primarily beta or gamma particles) enters the tube, it ionizes gas atoms, producing free electrons. These electrons are accelerated toward the anode, initiating a Townsend avalanche that results in a short current pulse. Each pulse corresponds to a single detected radiation event.

Ambient temperature and relative humidity are measured using a digital capacitive sensor module mounted on the SD card adapter. The humidity-sensing element is based on a polymer dielectric whose capacitance varies with absorbed water vapor. As relative humidity increases, changes in dielectric permittivity are converted into precise digital humidity readings by the sensor's internal circuitry.

Temperature measurement is typically realized using an integrated silicon-based temperature sensor or thermistor. Unlike the analog MQ sensors, this module communicates with the microcontroller via a digital interface, ensuring stable, noise-resistant data transmission and eliminating the need for ADC conversion.

In clean air, the resistance of the sensor is high, but when heated and in contact with the target gas, a chemical oxidation reaction occurs on the surface. This leads to a decrease in electrical resistance in proportion to the gas concentration. Each sensor is doped for specific impurities: MQ-3 reacts mainly to alcohol (ethanol) vapors, MQ-7 is specialized for detecting carbon monoxide (CO), and MQ-9 is a combined sensor for carbon monoxide and combustible hydrocarbons such as methane and propane-butane. The signal from the gas sensors is analog and is fed to the analog-to-digital converter (ADC) of the microcontroller.

A 10-bit bit depth with a threshold voltage of 3.3 V is used, which allows converting the sensor output voltage into a digital range of values from 0 to 1023.

The higher the numerical value obtained, the higher the concentration of the detected gas in the air (Fig. 4).

A digital temperature and humidity sensor mounted on an adapter is used to measure the microclimate. Humidity measurement is carried out by the capacitive method: the sensor contains a capacitor with a polymer dielectric capable of absorbing water vapor from the environment.

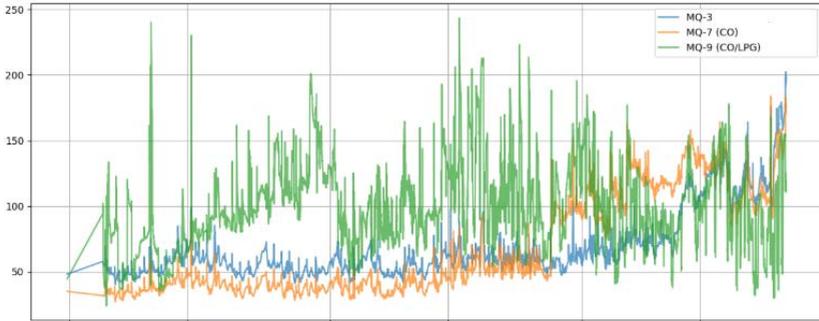


Fig. 4. Gas concentration dynamics

The change in humidity affects the dielectric constant of the polymer and changes the capacitor capacitance, which is then converted into percentage values. The temperature is recorded by a built-in semiconductor element, and all data is transmitted to the controller via a noise-resistant digital interface.

Solar radiation from the height of the sun is shown in the Fig. 5.

Python methods were used to find the regression dependence:

```
df_resampled = df.resample('10T').mean().dropna()
def calculate_sun_altitude(row):
    date_with_tz = row.name.replace(tzinfo=datetime.timezone.utc)
    return get_altitude(row['lat'], row['lon'], date_with_tz)
df_resampled['sun_altitude'] = df_resampled.apply(calculate_sun_altitude, axis=1)
df_daylight = df_resampled[df_resampled['sun_altitude'] > 0].copy()
X = df_daylight['sun_altitude'].values.reshape(-1, 1)
y = df_daylight['radiation'].values
reg = LinearRegression().fit(X, y)
y_pred = reg.predict(X)
r2_score = reg.score(X, y)
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(df_daylight['sun_altitude'], df_daylight['radiation'], alpha=0.3, s=10)
plt.plot(df_daylight['sun_altitude'], y_pred, color='red', linewidth=2,
start_date = df_resampled.index.min()
end_date = start_date + datetime.timedelta(days=7)
week_df = df_resampled[(df_resampled.index >= start_date) & (df_resampled.index
< end_date)].copy()
print(f"\n Analysis of the week {start_date.date()} no {end_date.date()}")
90
```

Sample time interval analysis was from 2023-04-30 to 2023-05-07 (Fig. 6).

Python methods were used to find the regression relationship:

```
week_df['hour_of_day'] = week_df.index.hour + week_df.index.minute / 60
```

```

X_time = week_df['hour_of_day'].values.reshape(-1, 1)
y_rad = week_df['radiation'].values
poly = PolynomialFeatures(degree=2)
X_poly = poly.fit_transform(X_time)
poly_reg = LinearRegression().fit(X_poly, y_rad)
X_range = np.linspace(0, 24, 100).reshape(-1, 1)
y_poly_pred = poly_reg.predict(poly.fit_transform(X_range))

```

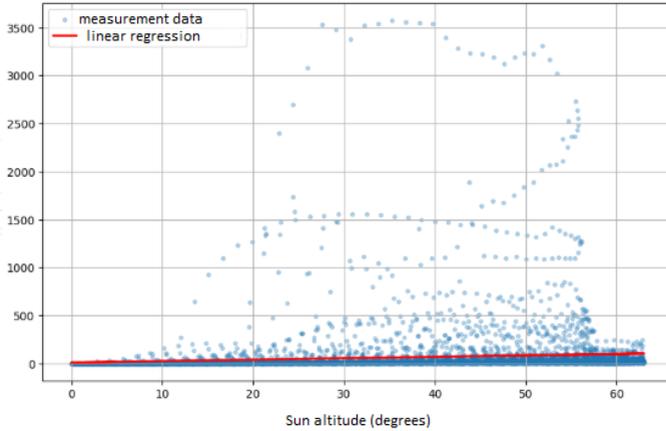


Fig. 5. Dependence of radiation (flares) on the height of the sun

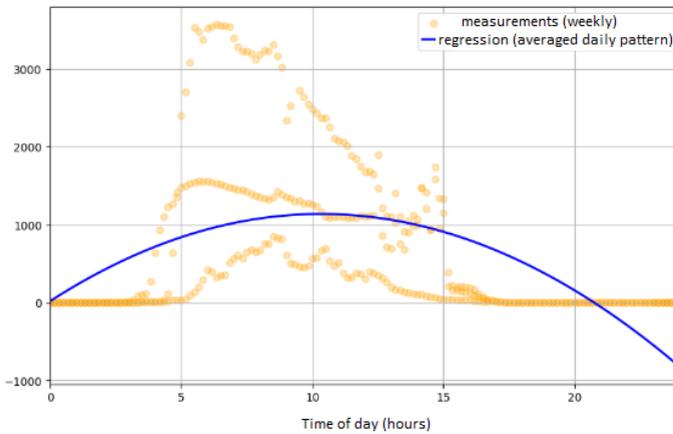


Fig. 6. Radiation dependence on time of day (weekly sample)

The dependence of gas concentrations and radiation on the time of day was studied. Average values by hour:

| hour | radiation | MQ3 | MQ7 | MQ9 |
|------|------------|-----------|-----------|------------|
| 0 | 1.628346 | 68.391634 | 67.022900 | 99.138550 |
| 1 | 1.646679 | 68.290962 | 66.838103 | 98.082266 |
| 2 | 2.050192 | 68.690332 | 67.229613 | 96.802576 |
| 3 | 5.066239 | 69.274220 | 67.648767 | 96.113950 |
| 4 | 27.436708 | 69.658421 | 67.827370 | 95.393173 |
| 5 | 68.353680 | 70.530418 | 68.492415 | 95.075105 |
| 6 | 99.605249 | 70.509736 | 68.121539 | 94.486783 |
| 7 | 106.204988 | 69.695175 | 67.984081 | 94.128687 |
| 8 | 109.893291 | 68.687844 | 68.203765 | 94.863063 |
| 9 | 91.192113 | 68.025165 | 67.803630 | 96.321176 |
| 10 | 94.261812 | 67.231018 | 66.583220 | 97.258566 |
| 11 | 87.988099 | 67.591331 | 67.197946 | 103.845882 |
| 12 | 92.266487 | 67.168665 | 66.660335 | 106.132874 |
| 13 | 76.979410 | 66.839487 | 66.084558 | 109.827603 |
| 14 | 61.979529 | 66.795793 | 65.927512 | 108.319749 |
| 15 | 23.289983 | 66.616441 | 65.780667 | 106.127355 |
| 16 | 7.119139 | 67.138495 | 66.505668 | 105.753083 |
| 17 | 2.238965 | 67.339127 | 66.653917 | 103.355099 |
| 18 | 1.639621 | 67.516913 | 66.607686 | 98.559791 |
| 19 | 1.629242 | 67.574867 | 66.895444 | 96.233144 |
| 20 | 1.619183 | 67.803843 | 67.263903 | 95.050285 |
| 21 | 1.628695 | 68.690631 | 68.443665 | 96.962783 |
| 22 | 1.630391 | 68.674213 | 67.914109 | 97.275175 |
| 23 | 1.623799 | 68.602496 | 67.297990 | 100.783763 |

The observed diurnal pattern of average radiation is primarily driven by the daily cycle of solar elevation and the associated modulation of solar and secondary cosmic radiation reaching the Earth’s surface. Radiation levels increase rapidly after sunrise as the Sun rises higher above the horizon, reducing atmospheric path length and attenuation, which leads to enhanced penetration of high-energy particles and electromagnetic radiation. Peak values are typically observed around local midday, when solar elevation and solar-driven ionization processes are strongest. As the Sun sets, atmospheric absorption increases and the contribution of solar radiation diminishes, resulting in a sharp decline in measured radiation during the evening and nighttime hours, when only background terrestrial and cosmic radiation remains.

According to NOAA, moderate solar activity was observed on May 6, 2023 with several active regions on the Sun (regions 3293, 3294, 3296, 3297, 3299). The largest region, 3297, had an area of 0.460 millionths of a sphere and a complex magnetic configuration (Beta). This activity could have caused an increase in radiation levels, which is confirmed by our data – a record value of 2627 (Fig. 7).

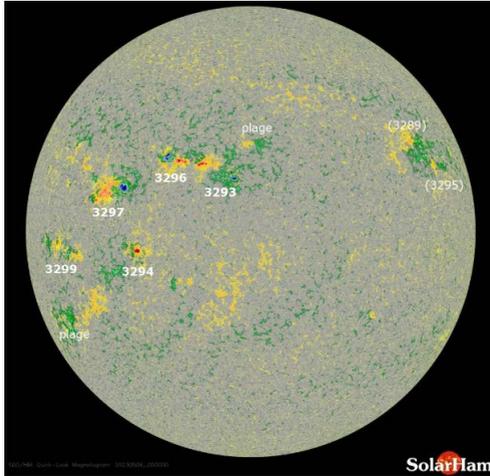


Fig. 7. SDO/HMI Quick-Look Magnetogram (May 6, 2023)¹¹

The magnetogram of the Sun is image of the distribution and polarity of the magnetic field in the photosphere. Such images show areas with positive and negative magnetic polarity (active regions, sunspots), but not the flares themselves.

Solar flares are usually observed: in the ultraviolet or X-ray range (SDO/AIA), as bright local flashes of radiation associated with a sharp restructuring of the magnetic fields. HMI magnetograms are used to analyze the prerequisites of flares, since a complex and tense configuration of the magnetic field can indicate an increased probability of their occurrence, but the flares themselves are not directly visible in them¹²:

```
:Issued: 2023 May 06 0030 UTC
# Prepared jointly by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA,
# Space Weather Prediction Center and the U.S. Air Force.
#
Joint USAF/NOAA Solar Region Summary
SRS Number 126 Issued at 0030Z on 06 May 2023
Report compiled from data received at SWO on 05 May
I. Regions with Sunspots. Locations Valid at 05/2400Z
Nbr Location Lo Area Z LL NN Mag Type
3293 N13E07 150 0110 Dai 10 06 Beta
```

¹¹ SDO/HMI Quick-Look Magnetogram: 20230506_000000. URL: https://solarham.com/pictures/2023/may6_2023_mag.jpg

¹² National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/swpc-products/daily_reports/solar_region_summaries/2023/05/20230506SRS.txt.

```

3294 S08E30 127 0120 Hsx 02 01 Alpha
3296 N16E20 137 0280 Dki 05 11 Beta
3297 N08E36 121 0460 Ekc 11 18 Beta
3299 S06E55 102 0050 Dao 05 04 Beta

```

IA. H-alpha Plages without Spots. Locations Valid at 05/2400Z May

```

Nmbr Location Lo
3289 N20W55 212
3292 N14W54 211
3295 N16W61 218
3298 S16E18 139

```

II. Regions Due to Return 06 May to 08 May

```

Nmbr Lat Lo
3279 S19 048
3282 N12 043

```

Solar Elevation Function (Required for Day/Night Filtering):

```

def calculate_solar_elevation(row):
    """Calculates solar elevation in degrees."""
    lat = row['Lat']
    lon = row['Lon']
    time = row['Timestamp']
    doy = time.timetuple().tm_yday
    gamma = (2 * np.pi / 365) * (doy - 1 + (time.hour - 12) / 24)
    eqtime = 229.18 * (0.000075 + 0.001868 * np.cos(gamma) - 0.032077 * np.sin(gamma)
        - 0.014615 * np.cos(2 * gamma) - 0.040849 * np.sin(2 * gamma))
    decl = 0.006918 - 0.399912 * np.cos(gamma) + 0.070257 * np.sin(gamma) \
        - 0.006758 * np.cos(2 * gamma) + 0.000907 * np.sin(2 * gamma) \
        - 0.002697 * np.cos(3 * gamma) + 0.00148 * np.sin(3 * gamma)
    time_offset = eqtime + 4 * lon
    tst = time.hour * 60 + time.minute + time.second / 60 + time_offset
    ha_rad = np.radians((tst / 4) - 180)
    lat_rad = np.radians(lat)
    cos_zenith = np.sin(lat_rad) * np.sin(decl) + np.cos(lat_rad) * np.cos(decl) * np.cos(ha_rad)
    return np.degrees(np.arcsin(np.clip(cos_zenith, -1, 1)))

# --- Data Loading and Cleaning ---
column_names = [
    'CallSign', 'Time', 'Date', 'Lat', 'Lon', 'Alt',
    'Radiation_Flashes', 'Temp', 'Humidity',
    'MQ3_ADC', 'MQ7_ADC', 'MQ9_ADC', 'Unused', 'Empty'
]
df = pd.read_csv('LOG.TXT', sep=';', names=column_names, header=None)
df.drop(columns=['CallSign', 'Unused', 'Empty'], inplace=True)
numeric_cols = ['Lat', 'Lon', 'Alt', 'Radiation_Flashes', 'Temp', 'Humidity', 'MQ3_ADC', 'MQ7_
ADC', 'MQ9_ADC']
for col in numeric_cols:
    df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors='coerce')
df['Timestamp'] = pd.to_datetime(df['Date'] + ' ' + df['Time'], errors='coerce')
df = df[(df['Lat'] != 0) & (df['Lon'] != 0)].dropna(subset=['Timestamp', 'Lat', 'Lon']).copy()
df['Sun_Elevation'] = df.apply(calculate_solar_elevation, axis=1)

```

```

# --- 2. SOLAR STORM DETECTION LOGIC ---
# 1. NIGHTTIME FILTER: Sun must be significantly below the horizon
# (e.g., lower than -10 degrees, which is past astronomical twilight).
NIGHT_ELEVATION_THRESHOLD = -10

# 2. RADIATION THRESHOLD: Must be significantly above the normal nighttime background
# (Normal background max was 3 flashes. A storm should be > 5,
# or maybe 3x the average background). We set a conservative threshold of 10 flashes.
STORM_RADIATION_THRESHOLD = 10
# Apply filters
night_data = df[df['Sun_Elevation'] < NIGHT_ELEVATION_THRESHOLD]
solar_storm_events = night_data[night_data['Radiation_Flashes'] >=
STORM_RADIATION_THRESHOLD]

```

The solar storm detection technique successfully filtered out the vast majority of noise caused by daylight leakage, leaving only events that recorded high levels of radiation when the sensor was actually in complete darkness.

Event frequency: the events were detected over a two-month period, indicating several separate high-energy particle events occurring near Kyiv.

Typical peak value: most events show peaks in the range of 10 to 22 flashes (in 5 seconds). This is approximately 3-7 times the normal nighttime maximum, indicating a significant increase in the flux of ionizing particles.

Peak event (exception): the event that occurred on 03.07.2023 at 19:45:24 is distinguished by 54 flashes. This value is almost 5 times higher than the next largest event, and approximately 18 times higher than the normal background.

Potential Solar Storm Events Detected (Radiation > 10 flashes at night):

| | Timestamp | Sun_Elevation | Radiation_Flashes |
|---------|---------------------|---------------|-------------------|
| 67336 | 2023-05-08 19:17:34 | -14.3566 | 11 |
| 136836 | 2023-05-12 19:59:23 | -17.0644 | 22 |
| 258585 | 2023-05-19 21:21:49 | -19.5333 | 10 |
| 535912 | 2023-06-04 23:12:14 | -15.234 | 11 |
| 570763 | 2023-06-06 23:41:12 | -13.3423 | 10 |
| 897493 | 2023-06-25 22:12:51 | -16.0957 | 10 |
| 1033739 | 2023-07-03 19:45:24 | -10.6102 | 54 |

In this research, near-real-time event stream processing is implemented using the Kappa architecture, which relies on a single, immutable event log for both micro-batch and replay-based processing. Unlike the Lambda architecture, which separates batch and streaming layers and requires duplicated business logic, the Kappa approach unifies processing semantics through a common

event log. This design reduces development and maintenance costs, simplifies testing procedures, and eliminates inconsistencies between real-time and batch computations.

The immutable nature of the log facilitates the implementation of idempotent processors, enabling safe reprocessing of identical data without side effects – an essential property for fault recovery. The physical decoupling of write and read paths allows independent scaling of ingestion and analytics workloads, while micro-batch support provides elasticity under bursty event arrivals without the operational complexity of heavyweight message brokers. Spatial unification is achieved through the H3 hierarchical hexagonal grid system, which offers near-equidistant neighborhood relationships and stable aggregation operations. Hexagonal geometry more naturally approximates circular influence zones and reduces distortion effects commonly associated with square grids. The hierarchical structure enables seamless transitions across spatial resolutions, as higher-level aggregates are computed by consolidating finer-grained cells, thereby simplifying the construction of multiscale analytical views. Efficient neighborhood operations, such as k -rings and distance disks, are particularly important for calculating spatial risk aggregates in quasi-real-time scenarios (Fig. 8).

The use of a fixed grid also simplifies storage indexing: daily and weekly materializations rely on identical keys, avoiding expensive spatial joins – an advantage in applications where proximity and coverage are prioritized over exact geometric precision.

The presented architecture illustrates an integrated data pipeline for real-time ingestion, processing, and analytical exploitation of heterogeneous geospatial and radiation-related data streams. At the ingestion layer, live and near-real-time events are collected from multiple sources, including social and news channels, satellite-based fire detection systems (FIRMS), and radiation monitoring sensors. All incoming data are normalized and persisted in a centralized event store, which functions as an immutable events log and provides a reliable foundation for downstream processing, replay and auditability.

The processing layer is organized as a micro-batch workflow that performs a sequence of domain-specific transformations and analytics.

Key stages include deduplication of fire radiative power (FRP) events within defined temporal windows, baseline estimation and anomaly detection for gamma radiation measurements, and morphologically aware geocoding to ensure robustness across linguistic and semantic variations in location references.

In parallel, cross-signal corroboration is applied to correlate independent data streams, enabling the identification of consistent patterns and the reduction of false positives by validating events across multiple sensing modalities.

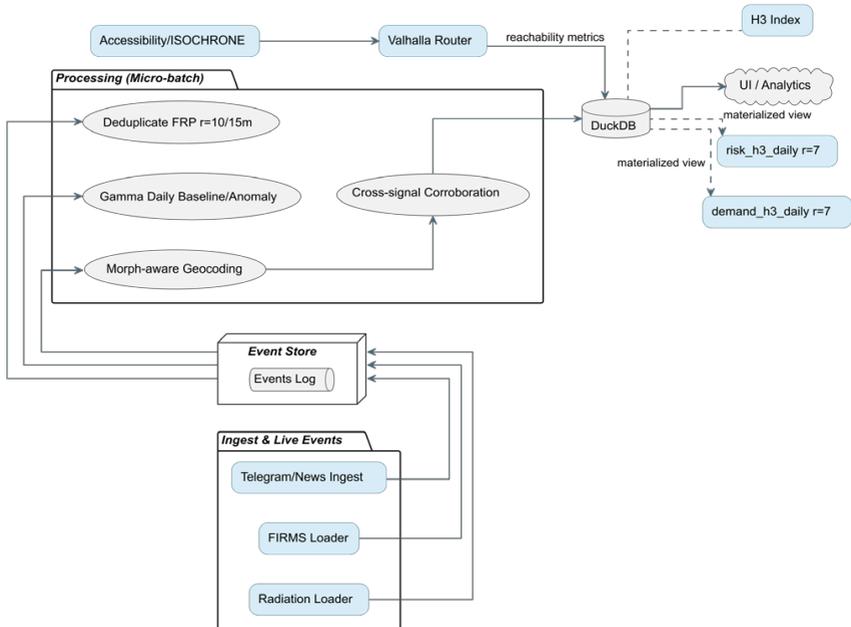


Fig. 8. Diagram of the connections between the elements of the proposed software

Geospatial accessibility and reachability analysis is incorporated through isochrone-based modeling and routing via the Valhalla router, producing reachability metrics that characterize spatial influence and response potential. The processed and enriched data are then materialized in an analytical storage layer based on DuckDB, where spatial indexing H3 supports efficient aggregation and querying.

Materialized views, such as daily risk and demand indicators at H3 resolution, provide a structured interface for user-facing analytics and visualization.

Overall, the architecture emphasizes scalability, temporal coherence, enabling near-real-time situational awareness and decision support in environments influenced by radiation dynamics and geospatial factors.

As a lightweight analytical core, DuckDB is employed as an embedded, column-oriented database optimized for high-performance local OLAP queries. Its vectorized execution model, column compression, and support for modern storage formats enable high query throughput on a single node without deploying distributed clusters. Embedding the database engine directly within the application process simplifies transaction management of local artifacts and

enhances reproducibility by co-locating data and code versions. This configuration is particularly well suited for autonomous and local analytics use cases, where inter-node coordination is unnecessary and data volumes do not justify the operational overhead of distributed processing frameworks. For network-based computations of distance, reachability time, and isochrone construction, the research utilizes the Valhalla routing engine, which operates on OpenStreetMap graph data and supports fully offline execution. Isochrone calculations are performed on preprocessed map tiles, producing temporal accessibility metrics that are directly integrated into coverage models and visualized on the same H3 tiles. Although preprocessing introduces an upfront cost, it is offset by the robustness and speed of accessibility estimation in critical situations, which is especially important for autonomous deployments. The preservation of all intermediate artifacts supports auditing and result reproducibility, in line with contemporary principles of open and reproducible data analytics. The integration of these components results in a coherent architectural framework: the immutable event log ensures reliable data lineage; CQRS decouples analytical queries from write operations and accelerates projection generation; H3 indexing resolves geometric heterogeneity; DuckDB provides fast local aggregations without additional servers; and Valhalla enables offline accessibility assessment.

This hybrid approach, combining micro-batch stream processing, H3-based spatial indexing, embedded OLAP analytics, and offline routing – achieves a balanced trade-off between functionality and architectural complexity for environmental threat monitoring systems. Ultimately, the overall architectural risk profile is reduced: failure of any individual module does not compromise historical data, as all events are preserved in the immutable log and analytical views can be reconstructed through replay. Infrastructure requirements are minimized, node autonomy is increased, and dependency on external services is reduced, which is particularly critical under crisis and emergency conditions.

CONCLUSIONS

The research directions indicate a clear transition from traditional reactive monitoring systems toward intelligent, autonomous software platforms capable of continuous and proactive environmental threat assessment. Such systems represent a critical step toward more resilient and sustainable environmental management in the face of increasing environmental complexity and uncertainty.

The software methods identified periods of increased radiation that coincided with solar activity data from official NOAA sources.

Proposed software monitoring system demonstrated its effectiveness in detecting solar storms and changes in the radiation background, and also showed the possibility of using inexpensive sensors for environmental monitoring.

This research presents a coherent software-based solution for environmental threat assessment that integrates near-real-time stream processing, spatial unification, and efficient local analytics within a compact and resilient architectural framework. By adopting the Kappa architecture with an immutable event log, the proposed approach ensures consistent processing semantics for both real-time and historical data, eliminating the duplication and synchronization issues inherent to Lambda-based solutions. This design significantly improves system reliability, simplifies maintenance, and enhances fault tolerance through deterministic replay and idempotent processing. Compared to existing environmental monitoring platforms that rely on heavyweight distributed infrastructures or tightly coupled processing pipelines, the proposed solution demonstrates clear advantages in terms of architectural simplicity and operational efficiency.

The use of hierarchical H3 spatial indexing provides stable, multi-resolution spatial aggregation and efficient neighborhood analysis, overcoming the limitations of irregular geometries and expensive spatial joins commonly found in traditional GIS-centered systems. This enables scalable, real-time spatial risk assessment while maintaining computational predictability.

The integration of DuckDB as an embedded analytical engine further distinguishes the proposed approach from conventional server-based or cluster-dependent analytics solutions. High-performance local OLAP queries can be executed without the overhead of distributed coordination, improving reproducibility and enabling autonomous operation.

In parallel, the incorporation of the Valhalla routing engine allows for offline computation of accessibility and isochrone-based metrics, a capability rarely supported by existing systems that depend on continuous network connectivity.

The proposed software solution offers a balanced combination of scalability, resilience, and analytical expressiveness, while minimizing infrastructure requirements. Its ability to operate autonomously, recover from failures without data loss, and support quasi-real-time spatial analytics makes it particularly well suited for environmental threat monitoring under resource constraints and crisis conditions. These advantages position the proposed approach as a robust and adaptable alternative to existing environmental monitoring and decision-support systems.

SUMMARY

Software methods for environmental threat assessment represent a critical foundation for modern environmental monitoring systems.

The transition to streaming data analysis has fundamentally changed the requirements for software architectures and analytical methods, emphasizing

real-time processing, adaptability, and scalability. Systematic classification and comparative evaluation of existing methods demonstrate that hybrid, ML-driven approaches integrated into stream processing architectures offer the most promising solutions for real-time environmental threat assessment.

Software-driven approaches can dynamically adapt to changing environmental conditions by updating analytical models and decision rules as new data become available, thereby maintaining relevance in non-stationary environments. Software-based environmental threat assessment systems support proactive and predictive decision-making. By incorporating ML and predictive analytics, these systems can forecast potential threat scenarios and estimate associated risks before critical thresholds are exceeded. Such predictive capabilities are particularly valuable for risk management, early warning systems, and strategic planning in domains related to public health, environmental protection, and critical infrastructure resilience. Despite these advantages, software-based approaches also exhibit several limitations that must be carefully considered.

A fundamental challenge is their strong dependence on data quality and sensor reliability. Inaccurate measurements, missing data, or sensor failures can significantly degrade the performance of analytical models and lead to false alarms or missed detections. This dependency necessitates robust data validation, preprocessing, and fault-tolerance mechanisms within the software architecture. Another limitation is the computational complexity associated with real-time machine learning models, especially deep learning techniques. Processing high-velocity data streams under strict latency constraints requires substantial computational resources and efficient model optimization strategies.

The proposed software solution provides an efficient and resilient framework for environmental threat assessment by combining unified stream processing, hierarchical spatial indexing, and lightweight local analytics. Unlike existing software approaches that rely on complex distributed architectures and duplicated processing logic, the solution ensures consistency, fault tolerance, and reproducibility through an immutable event log and idempotent processing. Its ability to perform near-real-time spatial analytics, operate autonomously with minimal infrastructure, and recover analytical views through replay offers clear advantages in scalability, reliability, and practical applicability, particularly in resource-constrained and crisis scenarios.

Bibliography

1. Akyildiz I.F., Melodia T., Chowdhury K.R. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 2007, vol. 51, no. 4, pp. 921–960. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.10.002>.

2. Ramakrishnan N., Butler P., Muthiah S., Self N., Khandpur R.P., Saraf P., et al. Beating the News with EMBERS: Forecasting civil unrest using open source indicators. *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2014, pp. 1799–1808. DOI: 10.1145/2623330.2623373.
3. Zanella A., Bui N., Castellani A., Vangelista L., Zorzi M. Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 22–32. DOI: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
4. Mujtaba G., Shahzad S.J.H. Air pollutants, economic growth and public health: implications for sustainable development in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 12686–12698. DOI: 10.1007/s11356-020-11212-1.
5. Keswani A., Akselrod H., Anenberg S. Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. *NEJM Evidence*, 2022, vol. 1, no. 7, article EVIDra2200068. DOI: 10.1056/EVIDra2200068.
6. Bibri S.E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 2023, vol. 31, pp. 183–212. DOI: 10.1016/j.scs.2017.02.016.
7. Yang Y., Wu Q., He B., Peng H., Yang R., Hao Z., Liao Y. SeBot: Structural entropy guided multi-view contrastive learning for social bot detection. *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2024, pp. 3841–3852. DOI: 10.1145/3637528.3671871.
8. Sun T., Liu C., Chen L., Qian Z., Li P., Zhu Q. A unified framework for multi-modal rumour detection via multi-level dynamic interaction with evolving stances. *Information Processing & Management*, 2025, vol. 62, no. 3, article 104066. DOI: 10.1016/j.ipm.2025.104066.
9. Rajesh M., Babu R.G., Moorthy U., Easwaramoorthy S.V. Machine learning-driven framework for realtime air quality assessment and predictive environmental health risk mapping. *Sci Rep*. 2025, 15(1):28801. DOI: 10.1038/s41598-025-14214-6.
10. SaveEcoBot. The first environmental system in Ukraine. URL: <https://www.saveecobot.com/en>.
11. SDO/HMI Quick-Look Magnetogram: 20230506_000000. URL: https://solarham.com/pictures/2023/may6_2023_mag.jpg.
12. National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/swpc-products/daily_reports/solar_region_summaries/2023/05/20230506SRS.txt.

Information about the author:

Oleshchenko Liubov Mykhailivna,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Computer Systems Software Department,

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

37, Beresteiskyi ave., Kyiv, 03100, Ukraine

02

SECTION



MATERIALS SCIENCE

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Босий М. В., Кузик О. В.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-3>

ВСТУП

В Україні є перспективні родовища рідкісноземельних металів (РЗМ), що є стратегічною перевагою для промисловості. РЗМ виконують важливу роль у розвитку багатьох галузей виробництва^{1,2}.

Досліджувалися відносно чисті синтетичні Fe – C – Si сплави різної степені евтектичності. Вміст елементів в досліджуваних сплавах змінювався в інтервалі 2,60-3,85 % C; 1,81-3,38 % Si; 0,01 % Mn; 0,004-0,016 % S; 0,005 % P; 0,356 % Ce³.

Проводили дослідження модифікування сплавів фероцерієм при 1450 °C які затвердівали в тиглі зі швидкістю охолодження ~ 90 град/хв. Виконувався термічний аналіз процесу кристалізації, металографічні дослідження виливків.

Також проводили модифікування при розливанні металу в тонкостінні металеві форми діаметром 16 мм з товщиною стінки 0,15 мм, які розташовані в підігрійтій шамотній обоймі. При кристалізації, яка контролюється за термічною кривою, форми витягувалися з обойми і закалювалися в 10 %-му розчині NaCl.

Модифікування ще виконувалося для технічних чавунів наступного складу: 3,14-3,28 % C; 2,65-2,75 % Si; 0,67 % Mn; 0,032 % S; 0,005 % P; 0,290 % Ce. Метал виплавлявся в плавильній печі ємністю 50 кг. Після перегріву до 1435-1457 °C розплав модифікували присадками РЗМ

¹ Шпильовий Л., Білецький В. Роль рідкісних і рідкісноземельних металів у 5-6 технологічних устроях: перспективи України. *Геотехнології*. 2022. № 5. С. 40-44.

² Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласконь С.А. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка*. 2024, вип. 1. с. 222-38. URL: <https://inneco.org/index.php/innecoa/article/view/>

³ Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016.188 с.

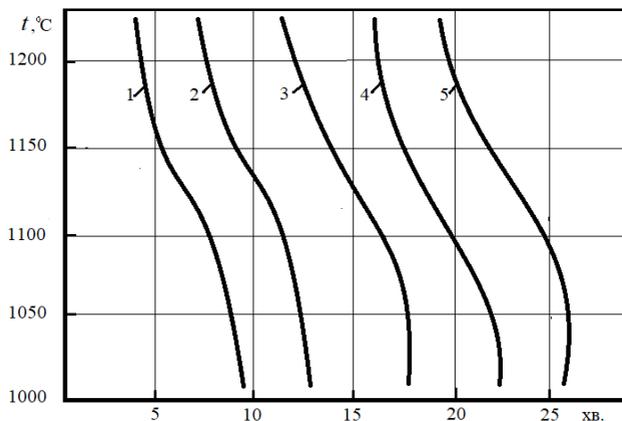
і розливали у форму з різним тепловим опором. Швидкість охолодження проб діаметром 50 мм, довжиною 200 мм змінювалися в діапазоні 65-325 град/хв^{4,5}.

Таким чином, треба вивчити ряд сплавів у широкому інтервалі зміни хімічного складу, швидкостей охолодження і вмісту модифікаторів.

1. Модифікуючий вплив РЗМ на залізуюглецеві сплави

Дослідження проводили для заевтектичних сплавів для дослідів, отриманих при ідентичних умовах модифікування і кристалізації. Із проведених дослідів випливає, що невеликі добавки церію приводять лише до деякого подрібнення евтектичного графіту. Зі збільшенням вмісту церію спостерігається утворення компактного графіту. В структурі з'являються евтектичні карбіди і подальше збільшення церію приводе до формування колоній аустенітно-карбідної евтектики. При максимальних добавках церію евтектика з тонко диференційованим графітом стає переважною складовою первинної структури. Число кулястих включень графіту різко знижується зі зникненням евтектичних карбідів.

На (рис. 1) наведені криві охолодження описуваних зразків.



1, 2, 3, 4, 5 – вміст церію відповідно 0,01; 0,040; 0,163; 0,211; 0,358

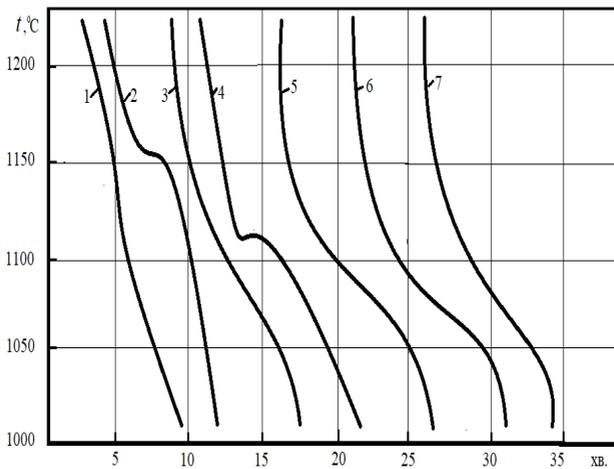
Рис. 1. Криві охолодження заевтектичного чавуну

⁴ Кшнякін В. С., Опанасюк А.С., Дядора К.О. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. у 2 ч. Суми. Сумський державний університет, 2015. Ч. 2. 291 с.

⁵ Антонова Г.В., Вершков О.О., Мацулевич О.Є. Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів. *Матеріалознавство*: навч. посіб. Запоріжжя. 2024. 215 с.

Криві охолодження описуваних зразків (рис. 1) показують зміщення температурного рівня евтектичних заупинок, які закономірно пов'язанні з вмістом церію. Переохолодження рідкої фази збільшується аж до вмісту церію, забезпечуючи максимальну ступінь відбілу. При подальшому підвищенні вмісту церію відбувається формування тонкої графітної евтектики і рівень температурних заупинок при евтектичній кристалізації починає збільшуватися.

Описаний характер процесу структуроутворення є загальним для всіх досліджуваних залізвуглецевих сплавів. На (рис. 2) наведені термічні криві зразків частини дослідів.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – вміст церію відповідно 0,01; 0,033; 0,044; 0,073; 0,089; 0,187; 0,240

Рис. 2. Криві охолодження доевтектичного чавуну

При співставленні термічних кривих зразків частини дослідів при швидкості охолодження (67, 121 і 173 град./хв.) можна вказати на те, що різниця в хімічному складі і швидкості охолодження не позначається на закономірній змінні переохолодження розплавів, що обумовлено вмістом модифікаторів.

Точні характеристики концентраційних зон модифікування, забезпечуючи відповідну форму графітних включень і певну ступінь відбілу, пов'язані зі складом сплаву і швидкістю охолодження.

Поява компактного графіту супроводжує збільшення числа евтектичних карбідів. Зі зростанням швидкості охолодження концентраційна зона

формування компактного графіту зміщується в напрямку менших концентрацій церію. Важливою особливістю високоцерієвих сплавів є утворення тонкої графітної евтектики, що приводить до різкого зниження числа евтектичних карбідів і компактних графітних включень.

Механізм утворення колоній тонкої графітної евтектики вивчається як на синтетичних, так і на промислових сплавах. На кінцевому етапі кристалізації сплаву колонії графітної евтектики приходять в зіткнення і набувають поліедричну форму, границі колоній при цьому збагачуються лікватами.

За даними дослідження великої кількості колоній, структурним центром окремої колонії є найбільш компактне графітне включення, яке дає початок графітному скелету колонії, яка формується шляхом регулярного розгалуження радіально направлених пластин.

Досліджено розподіл церію, ітрію у сплавах, що містять від тисячних часток відсотка до оптимальної кількості (забезпечуючи отримання кулястих зерен графіту). При дослідженні використовували сучасні методи аналізу.

Розподіл глобуляризуючого елемента в модифікованому чавуні можна показати на прикладі церієвого сплаву. При невеликому вмісті церію в сплаві 0,005% та пластинчастій формі графіту спостерігається переважне зосередження церію у графітній фазі^{6,7}.

У сплаві, що містить 0,04% церію з компактною, рідше глобулярною, формою графіту має місце переважна локалізація церію в графіті. При цьому деяка кількість церію є в неграфітній частині сплаву і розподіляється за межами первинної структури.

У церієвому чавуні з підвищеним вмістом модифікатора 0,30 % при збагаченні церієм графітної фази спостерігається переважна локалізація його в неграфітній частині сплаву, по межах евтектичних колоній, що мають не феритну, а перлітну металеву основу.

Так при вмісті церію в чавуні, що дорівнює 0,005%, його концентрація в графітній фазі досягає 0,027-0,034%, в неграфітній частині сплаву – лише 0,0024%. У чавуні з 0,04% церію концентрація його в кулястих зернах графіту досягає 0,27%, у пластинчастих та компактних – 0,15% – 0,25%, при одночасному зниженні його вмісту в неграфітній частині сплаву – 0,015-0,023%. У церієвому чавуні, вмістом 0,31% церію, поряд зі збагаченням церієм зерен графіту відбувається значне зосередження модифікатора за межами первинної структури при його вмісті 0,58-0,72 %. При великих

⁶ Афтанділянц С. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: підручник. К.: Вища освіта, 2012. 548 с.

⁷ Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І. та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.

кількостях церія в чавуні спостерігається його значне збагачення ним не графітової частини сплаву при зниженні його концентрації в графіті.

У відповідності зі зміною вмісту церію в чавуні і графітної фази змінюється і форма включень графіту: пластинчата при невеликих концентраціях церію в чавуні в графітній фазі, куляста – при оптимальних концентраціях церію в чавуні і максимальному вмісті його в графіті. Аналогічні закономірності в розподілі модифікуючого елемента в чавуні, в залежності від його концентрації, і форма включень графіту, які формуються в сплаві, встановлені також і для ітрію^{8,9,10}.

Експериментальні результати показують, що при охолодженні модифікуючого чавуну при зародженні і зростанні графітної фази, модифікатор є поверхнево активним елементом по відношенню до графіту, переважно адсорбується зернами графіту. Це приводить до виникнення і функціонування дифузійних потоків глобуляризуючого елемента, направлених до графітної фази, які особливо інтенсивно протікають в рідкому чавуні.

Наряду з формуванням графітної фази в модифікованому чавуні зароджуються і зростають дендрити аустеніту, об'єднані церієм. В цих умовах при визначеній, але не повній локалізації глобуляризуючого елемента в графіті його розподіл в не графітовій частині сплаву має нерівномірний характер за рахунок пасивного відтиснення атомів модифікатора в міждендритний простір. Підвищення концентрації глобуляризуючого елемента в міждендритному просторі первинних дендритів аустеніту збільшує можливість утворення хімічних з'єднань CeFe_5 , YFe_9 . Це приводить до появи другого дифузійного потоку модифікатора, направленого до хімічної сполуки, що формується в міждендритному просторі.

Всі ці процеси суттєво впливають на будову графітної фази в чавуні. Так модифіковані чавуни глобуляризуючим елементом в кількостях, які не перевищують оптимальні концентрації за рахунок переважно абсорбції глобуляризатора в графіті забезпечує невелирковку коефіцієнтів α_i поверхневого натягу по i -граням зерна графіту і, як випадок цього, у відповідності з правилом Гібса-Кюри-Вульфа – квазіфероїдизацію

⁸ Босий М.В., Боса О.А. Вплив рідкісноземельних металів на структуру та властивості залізуглецевих сплавів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: Гельветика. 2025. № 3 (501). С. 42–48.

⁹ Баглок Г., Троцан А., Уськова Н., Мамонова А., Молчановська Г. Властивості та структура чавуну, модифікованого ЛГМ-технологією. *Процеси лиття*. 2024. 156(2), С. 29–37.

¹⁰ Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / за ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224с.

зерна графіту. Підвищення концентрації модифікатора в чавуні викликає об'єднання графітної фази модифікованим елементом, при якому $\alpha_c = \bar{\alpha}$ вже не реалізується і графіт набуває деглобуляризований карбовидний вигляд¹¹. Результати розподілу РЗМ і ітрію в чавунах дуже добре узгоджуються з літературними даними.

2. Дослідження впливу РЗМ на кристалізацію залізовуглецевих сплавів залізовуглецевих сплавів

Вивчали взаємодію РЗМ на кристалізацію чавуну та його структуру в залежності від умов охолодження.

Для дослідження кристалізації чавуну використовували загартовано структурний метод. При цьому використовували синтетичний чавун, який містить 4,0 % С; 3,00% Si; 0,05% Mn; 0,013 % S; 0,014 % P, модифікований добавками ітрію в межах 0,03 – 1,0 %. Встановлено, що введення в сплав ітрію в межах 0,03-1,0 % не вносить принципових змін в послідовність кристалізації. В чавуні з добавкою до 0,1% ітрію кристалізація починається з виділення графіту і закінчується евтектичним розпадом рідини на А+Г і А+Ц. Збільшення кількості введеного в розплав ітрію в досліджуваних межах сприяє стабілізації рідини, що позначається в зменшенні температури кристалізації надлишкової фази і евтектики. При введенні добавок ітрію більше 0,1% поряд з графітом із рідини кристалізується первинний цементит^{12, 13}.

Встановлена мікроскопічна картина формоутворення графітних включень в залежності від величини добавки ітрія.

В початковому сплаві первинний графіт з моменту появи до завершення кристалізації має пластинчасту форму. В сплавах з добавками 0,03 – 0,05 % ітрію невеликі включення графіту мають кулясту форму. Але в процесі росту вони трансформуються і до повного затвердіння сплаву набувають пластівчасту форму із гострим відгалуженням.

Збільшення кількості введеного в чавун ітрію до 0,1% приводить до того, що графітні включення досягають великих розмірів, залишаючись кулястими більш тривалий проміжок часу. Виявляється характерна для кулястого графіту промениста структура, що зберігається в центральній

¹¹ Лисенко О.Б., Калініна Т.В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 268 с.

¹² Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Мирошніченко Г.О. Рідкісноземельні метали у валкових чавунах // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро: НМетАУ, 2022. С.30-34.

¹³ Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. *Метал і лиття України*, 2020. т.28. №1(320). С.30-33.

частині кінцевих утворень. На периферійних ділянках таких включень графіт кристалізується у вигляді пластинчастих відгалужень^{14,15}.

Подальше збільшення кількості ітрію у сплаві сприяє вдосконаленню форми графіту.

Для дослідження сумісного впливу швидкості охолодження та добавок РЗМ на процес структуроутворення чавун після модифікування виливали у форму з спрямованим відведенням теплоти. Температурні криві кристалізації записували за допомогою термопар у чотирьох точках виливка, що розташовуються на вертикальній осі.

Як модифікатори використовували церій, лантан та ітрію частотою 99,5% основного елемента. Кількість модифікуючої добавки змінювалася в межах від 0,03 – 1,0 %.

На рис. 3 представлена залежність температури початку евтектичного перетворення чавуну від кількості введеного ітрію при швидкостях охолодження 1,78 град/сек (крива 1) та 3,68 град/сек (крива 2). Якісно аналогічна залежність спостерігається для церієвого та лантанового чавуну в абсолютних величинах зниження температури. Найбільш ефективно знижує температуру ітрію, потім вже церій і лантан.

Збільшення добавки ітрію від 0,03% до 0,3% суттєво знижує температуру початку евтектичної реакції. При цьому в структурі чавуну з'являється цементит, графіт набуває компакту кулясту форму. Подальше збільшення присадки ітрію до 1,0 % призводить до значного виділу чавуну.

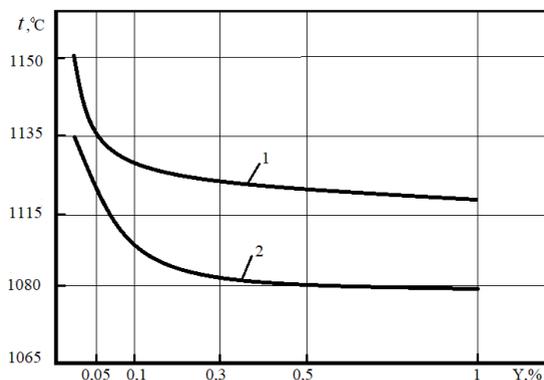
РЗМ покращують ливарні властивості та зменшують усадкоутворення, а також і покращують рідкоплинність сплаву.

Залізовуглецеві сплави при використанні РЗМ застосовуються для виробництва високоякісних виливків із високоміцного чавуну, модифікованого чавуну і ще легованих сталей для машинобудування, автомобілебудування та сільськогосподарської техніки.

Для визначення впливу РЗМ на час евтектичного перетворення використовували криві охолодження в ділянках виливків з мінімальною швидкістю охолодження, де температурна зупинка фіксується найбільш чітко. При побудові графічних залежностей у розрахунок приймали охолодження виливка від початку кристалізації евтектики до температури 1050 °С.

¹⁴ Ямшинський М. М., Федоров Г. Е. Вплив процесів додаткового легування, мікролегування та модифікування на Властивості хромарганцевого чавуну. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С.82-88.

¹⁵ Фесенко К.В. Модифікування чавуну в ливничій системі для виробництва двошарових виливків: дис.... канд. техн. наук: 05.16.04. Київ, 2016. 153 с.



- 1 – швидкість охолодження 1,78 град/сек;
 2 – швидкість охолодження 3,68 град/сек

Рис. 3. Зміна температури початку евтектичного перетворення чавуну в залежності від кількості введеного ітрію

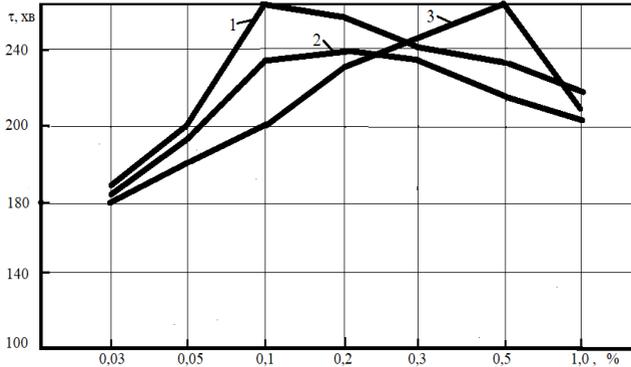
Зі збільшенням добавки РЗМ час евтектичної кристалізації збільшується і має максимальне значення для ітрієвого та церієвого чавунів при введенні 0,1 – 0,3%, а для лантанового при введенні 0,5% модифікатора. Подальше зростання добавок РЗМ призводить до зменшення часу кристалізації евтектики, проте мінімальним воно залишається для вихідного чавуну та чавуну з невеликими до 0,05% добавками РЗМ (рис. 4).

Максимальна тривалість евтектичної кристалізації відповідає утворенню в структурі чавуну кулястої та перехідних форм графіту за наявності незначної кількості цементиту. Зменшення тривалості кристалізації, викликане подальшим збільшенням модифікуючої добавки пов'язане зі зменшенням кількості графіту в структурі сплаву.

Хід температурної кривої кристалізації відображає тепловий баланс між теплою кристалізації, та відведенням теплоти. При оцінці отриманих результатів з цієї точки зору збільшення часу охолодження вилівка в інтервалі температур евтектичного перетворення викликане введенням РЗМ не може бути пояснено зміною фазового складу евтектики оскільки, як було встановлено при металографічному дослідженні РЗМ відбілює чавун, зменшуючи тим самим теплоту. Звідси випливає, що причиною явища, що спостерігається, звісно, служить зменшення швидкості кристалізації в модифікованих чавунах.

До появи суцільної аустенітної оболонки навколо кулястих утворень графіту такому ефекту може сприяти адсорбція РЗМ на графіті, що

призводить до збільшення енергії активації процесу кристалізації та суттєвого переохолодження сплаву, що ускладнює дифузійні процеси.



1,2,3 – криві ітрієвий, церієвий, лантановий чавун

Рис. 4. Час охолодження виливка від початку евтектичного перетворення до температури 1050 °С залежно від введеного модифікатора

Встановлено, що в чавуні, модифікованому 0,3% ітрію, концентрація модифікатора в окремих ділянках кулястих графітних включень досягає 0,81 – 1,21%. Вивчення мікроструктур виливків із чавунів, модифікованих РЗМ, показало, що вплив церію, лантану та ітрію на структуру чавуну є принципово ідентичним. Їх добавки, починаючи від 0,03% ітрію і 0,05% церію та лантану, виявляють відбілюючу дію на структуру чавуну. Зі збільшенням кількості модифікатора, що вводиться, глибина відбілу збільшується від 3-4 мм у чавуні з добавками до 0,05% до 40-50 мм у чавуні, модифікованому 1,0 % РЗМ. Разом з найбільшим відбілюючим впливом на структуру чавуну, ітрій має найефективніший сфероїдизуючий вплив на форму графіту. За ним за рівнем ефективності слідує далі церій і лантан.

Сфероїдизуючий вплив РЗМ на формування графіту значною мірою залежить від умов відведення теплоти. У структурі виливка на відстані 3-5 мм від холодильника утворюється кулястий графіт (діаметр глобулів 10-15 мк) при добавці ітрію 0,03%, а церію та лантану 0,05%, у той час як в іншому об'ємі виливка графіт має пластинчасту або пластівчасту форму. У зоні виливка, що розташовується на відстані 60-65 мм від холодильника, введення ітрію тільки в кількості 0,35-0,4% і церію 0,4-0,45% забезпечує

сферидизацію графіту (діаметр глобулів 50-80 мк) тобто ефективна кількість модифікатора збільшується на порядок^{16, 17, 18, 19}.

Модифікування сплавів РЗМ, наприклад, ітрієм, церієм та іншими є процес введення цих елементів до рідкого розплаву для покращення їх механічних властивостей, жаростійкості, зносостійкості, а також і ливарних властивостей залізвуглецевих сплавів. РЗМ діють як модифікатори при кристалізації сплаву, а також впливають на структуру кристалізації, зменшуючи також пористість і звісно покращуючи мікроструктуру, це важливо для деталей, які будуть працювати в надзвичайних умовах. Модифікування РЗМ покращує механічні властивості сплавів, тобто, збільшуючи міцність, пластичність та завдяки кулястій формі графіту здійснюється також і модифікування кристалічної решітки сталей²⁰.

РЗМ очищують розплав, вони можуть зв'язувати шкідливі домішки – сірку і фосфор з утворенням шлаків.

Модифікатори додають у вигляді феро-сполук або ще чистих металів під час заливання металу в ківш, ще використовують спеціальні добавки, які містять РЗМ.

Використовують жаростійкі сталі для виготовлення деталей, які працюють при дуже високих температурах.

В чавунах використовують РЗМ для покращення як їх механічних властивостей, так і ливарних характеристик, наприклад, це стосується виробництва деталей машин для машинобудування і автомобілебудування.

Можна вважати, що модифікування РЗМ – це один із ефективних методів для створення високоякісних сплавів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

¹⁶ Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Ясинський О.О. Високоміцний чавун зі зміцненням кремнієм та нікелем α -твердим розчином. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 3. С. 63-68.

¹⁷ Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В., Биба Є.Г., Ямшинський М.М., Ковальчук О.Г. Вплив легування, мікролегування та модифікування на властивості зносостійких хромомарганцевих чавунів. *Процеси лиття. Кристалізація та структуроутворення сплавів*. 2025. № 3 (161). С.52-61.

¹⁸ Тростянчин А.М. Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів: дис... д-ра техн. наук : 05.02.01. Львів. 2022. 116 с.

¹⁹ Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Вплив комплексних модифікаторів на структуру чавунів з різним вмістом сірки. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 2 (329). С.30-34.

²⁰ Бубіс А., Федоров Г. Підвищення властивостей жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах мікролегування і модифікування. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2016. (6), С. 158–159.

ВИСНОВКИ

Аналіз морфології колоній аустенітно-карбідної евтектики дозволяє зробити висновок, що утворення графіто-аустенітної евтектики являє типовий випадок росту двох евтектичних фаз. Зародження колоній відбувається в умовах великих переохолоджень. Але висока ступінь диференціювання евтектики забезпечує суттєве підвищення лінійної швидкості кристалізації. Інтенсивне виділення теплоти кристалізації виражається в підвищенні температурного рівня евтектичних зупинок на термічних кривих.

Зразки сплаву різного складу гартувалися на різних етапах кристалізації і піддавалися аналізу. Металографічні дослідження дозволили зробити висновок про існування закономірностей зв'язку між структурою сплава і параметрами модифікування.

Встановлена нерівномірність розподілу церію між структурними складовими сплаву. Присутність в цементиті церію не виявлена. В модифікованих сплавах часто виявляються графітні включення з чітко вираженим внутрішнім ядром. Дослідження показують, що церієм збагачені об'єми графітної фази, які в процесі кристалізації знаходяться в контакт з рідиною.

Зважаючи на встановлений позитивний вплив інтенсифікацій відведення теплоти на формування кулястого графіту, а також результати досліджень субструктури графітних утворень у чавуні, наведено такі міркування про можливий механізм сфероїдируючої дії РЗМ. Дегазація розплаву і насамперед його глибоке розкислення за рахунок утворення стійких оксидів у поєднанні з істотним переохолодженням чавуну призводить до розщеплення графітних кристалів та обмеження включення базисними площинами. При значній анізотропії властивості кристалічних ґрат графіту можуть мати місце вибіркової адсорбція РЗМ на торцевих гранях графітних кристалах, що також, як і високий ступінь переохолодження, забезпечує нівелювання швидкостей зростання різних граней.

На підставі таких уявлень про вплив РЗМ на процес формування графітних включень добре можна пояснити різноманіття форм графіту та його трансформацію в процесі зростання в чавунах, модифікованих різними добавками ітрію.

РЗМ звісно суттєво виконують вплив модифікування на кристалізацію сплавів, вони діють як модифікатори, це впливає на розмір, форму, а також фазовий склад кристалів, що сприяє утворенню нових фаз, ще також можуть впливати і на огранку самих кристалів. Також впливають на швидкість нуклеації і ріст кристалів, при

цьому зміщується рівновага, це призводить до отримання відповідно дрібнозернистої структури та зміцнення сплавів і покращення їх механічних властивостей.

Основні механізми впливу РЗМ – це зміна швидкості нуклеації, а також РЗМ можуть виступати як центри кристалізації, збільшуючи кількість центрів зародкоутворення і, відповідно, зменшуючи розмір зерен. Взаємодіючи з іншими елементами сплаву, вони формують нові, більш за все тугоплавкі сполуки, які впливають на структуру.

РЗМ будуть концентруватися на поверхнях росту кристалів, при цьому змінюється їх морфологія та знижуються дефекти, це покращує як властивості, так і запобігає руйнуванню кристалів.

РЗМ можуть також зміщувати фазові рівноваги, при цьому сприяють виділенню нових фаз або ще стабілізації певних структур, це важливо для сплавів з високою міцністю.

Завдяки взаємодії з іншими домішками (наприклад, із залізом), РЗМ також сприяють, як зменшенню дефектів, так і покращенню якості їх кристалічної структури. РЗМ покращують механічні властивості, при цьому відбувається подрібнення зерна та утворення дисперсних фаз, що зміцнює сплав.

Завдяки РЗМ можна створити нові сплави з унікальним фазовим складом та з підвищеними характеристиками.

Отже, РЗМ є досить потужними модифікаторами, що дозволяє керувати процесом кристалізації сплавів для досягнення їх необхідної мікроструктури, а також властивостей сплавів.

АНОТАЦІЯ

Розглядається проблема модифікування залізовуглецевих сплавів рідкісноземельними металами (РЗМ) – це процес додавання цих елементів (лантану, церію, ітрію тощо) для покращення їх, ливарних і механічних властивостей тобто, покращення пластичності, міцності, зносостійкості та формування дрібнозернистої структури шляхом їх впливу на кристалізацію та фазові перетворення для високоякісних чавунів та сталей. Ключовими аспектами модифікування РЗМ є вплив на структуру, РЗМ також десульфурують сплави та звісно зв'язують шкідливі домішки (сірку, кисень, азот), утворюючи при цьому стабільні сполуки, ще впливають на формування графіту в чавунах і включень в сталях, сприяючи утворенню сфероїдного графіту, тобто кулястого.

Покращення властивостей залізовуглецевих сплавів полягає в зменшенні дефектів. Це стосується мінімізації газових та усадочних порожнин, шлакових включень, що робить виливки більш щільними.

Підвищення механічних властивостей залізовуглецевих сплавів при використанні РЗМ як модифікаторів полягає у збільшенні міцності, твердості, зносостійкості та пластичності сплавів.

РЗМ та їх механізм дії як модифікаторів впливу на кристалізацію сплаву, змінюючи умови зародження та росту кристалів, призводить до формування як більш однорідної, так і дрібної структури.

Таким чином, введення РЗМ в залізовуглецеві сплави є ефективним методом їх модифікування, що дозволяє отримати сплави з покращеними механічними та ливарними властивостями для відповідальних деталей.

Література

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.
2. Шпильовий Л., Білецький В. Роль рідкісних і рідкісноземельних металів у 5-6 технологічних устроях: перспективи України. *Геотехнології*. 2022. № 5. С. 40-44.
3. Новосад І.Я., Руська Р.В., Пласконь С.А. Рідкоземельні метали: ключові компоненти сучасних технологій. *Інноваційна економіка* вип. 1. 2024, с. 222-238. URL: <https://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1209>
4. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства: навч. посіб. у 2 ч. Суми: Сумський державний університет, 2015. Ч. 2. 291 с.
5. Антонова Г.В., Вершков О.О., Мацулевич О.С. Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів. *Матеріалознавство*: навч. посіб. Запоріжжя, 2024. 215 с.
6. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г. Матеріалознавство: підручник. Київ: Вища освіта, 2012. 548 с.
7. Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І. та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.
8. Босий М. В., Боса О.А. Вплив рідкісноземельних металів на структуру та властивості залізовуглецевих сплавів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв. Гельветика. 2025. № 3 (501). С. 42–48.
9. Баглюк Г.А., Троцан А.І., Уськова Н.О., Мамонова А.А., Молчановська Г.М., Властивості та структура чавуну, модифікованого ЛГМ-технологією. *Процеси лиття. Нові методи та прогресивні технології лиття*. 2024. № 2 (156). С. 29-37.
10. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. /

За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. Київ: Видавничий дім “Вінніченко”, 2016. 224 с.

11. Лисенко О.Б., Калініна Т.В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2019. 268с.

12. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Мирошніченко Г.О. Рідкісноземельні метали у валкових чавунах // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро: НМетАУ, 2022. С. 30-34.

13. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. *Метал і лиття України*, 2020. т.28. №1(320). С.30-33.

14. Ямшинський М. М., Федоров Г. Е. Вплив процесів додаткового легування, мікролегування та модифікування на властивості хромарганцевого чавуну. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С.82-88.

15. Фесенко К.В. Модифікування чавуну в ливниковій системі для виробництва двошарових виливків: дис.... канд. техн. наук : 05.16.04. Київ, 2016. 153 с.

16. Бубликов В.Б., Нарівський А.В., Бачинський Ю.Д., Ясинський О.О. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем α -твердим розчином. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 3. С. 63-68.

17. Лук'яненко І.В., Кивгило Б.В., Биба Є.Г., Ямшинський М.М., Ковальчук О.Г. Вплив легування, мікролегування та модифікування на властивості зносостійких хромарганцевих чавунів. *Процеси лиття. Кристалізація та структуроутворення сплавів*. 2025. № 3 (161). С.52-61.

18. Тростянчин А.М. Концепція застосування водневої обробки для удосконалення структурно-фазового стану та властивостей функціональних матеріалів на основі сплавів рідкісноземельних та перехідних металів: дис.... д-ра техн. наук : 05.02.01. Львів, 2022. 116 с.

19. Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О. Вплив комплексних модифікаторів на структуру чавунів з різним вмістом сірки. *Метал та лиття України*. 2022, Том 30. № 2 (329). С.30-34.

20. Бубіс А., Федоров Г. Підвищення властивостей жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах мікролегування і модифікування. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*. 2016. (6), С. 158–159.

Information about the authors:

Bosyi Mykola Viktorovich,

Senior Lecturer at the Department
of Materials and foundry engineering,
Central Ukrainian National Technical University,
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

Kuzyk Oleksandr Volodymyrovych,

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Materials and foundry engineering,
Central Ukrainian National Technical University,
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

ПОШКОДЖЕНІСТЬ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дорофеев В. С., Пушкар Н. В., Зінченко Г. В.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-4>

ВСТУП

При проведенні обстежень технічного стану залізобетонних конструкцій спостерігається велика кількість дефектів та пошкоджень: волосяні тріщини вздовж поздовжньої арматури з товщиною шару корозії арматури до 2,0 мм; тріщини вздовж поздовжньої робочої арматури з шириною розкриття до 3 мм; відколювання захисного шару вздовж поздовжньої арматури внаслідок корозії; випирання робочої арматури колон (рис. 1).¹



Рис. 1. Дефекти і пошкодженість колон

Ми вважаємо, що причиною появи дефектів та пошкоджень конструкцій є неоднорідна структура бетону, на яку впливає середовище експлуатації.

¹ Zinchenko H.V. Stressed-deformed condition and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monografia* / H.V. Zinchenko, V.S. Dorofeev. Riga, 2019. P. 166.

Метою роботи є вивчення основних причин зародження та розвитку дефектів залізобетонних конструкцій в процесі структуроутворення, виникнення та розвиток технологічної пошкодженості бетонів, вплив початкової пошкодженості на експлуатаційні властивості бетонів та конструкцій, а також на роботу залізобетонних конструкцій^{2,3,4}.

1. Формування структури будівельних композитів

Композиційні (складні) матеріали отримують шляхом фізико-хімічного чи фізико-механічного з'єднання різнорідних компонентів. Встановлено, що фізико-механічні характеристики кінцевого матеріалу пов'язані нелінійно з характеристиками вихідних компонентів. Можна припустити, що при взаємодії компонентів утворюються внутрішні по відношенню до матеріалу структури, взаємодія яких призводить до появи явищ синергізму. Як правило, композиційні будівельні матеріали (КБМ) складаються з в'язучого, наповнювачів і заповнювачів. Загальну кількість складових структур КБМ можна виділити за характерними структурними неоднорідностями (рис. 2).

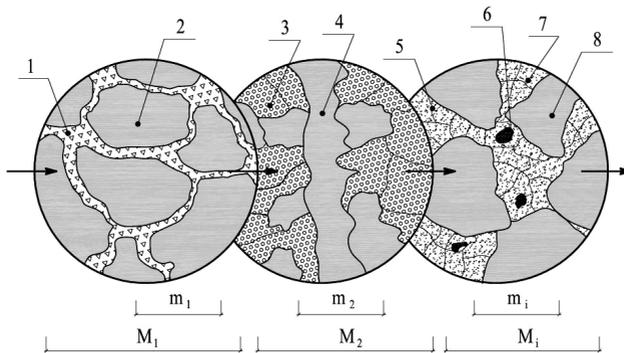


Рис. 2. Організація структури композиційних будівельних матеріалів:

1 – елементарний структурний елемент в'язучого; 2 – наповнювач; 3 – цементний камінь; 4 – мілкий заповнювач; 5 – макроструктурні тріщини; 6 – пори; 7 – розчинна частина (матриця); 8 – крупний заповнювач

² Дорощев В.С., Зінченко Г.В., Курилюк Д.В., Пушкар Н.В. Поновлення громадських будівель, пошкоджених внаслідок дії вибухів *Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society*: праці 2 міжнар. і практ. інтернет-конф. (Дніпро, 7–8 листопада 2024 р.) Дніпро, 2024. С. 90.

³ Дорощев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 65.

⁴ Дорощев В.С., Зінченко Г.В., Романюк В.В. Дослідження характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в залізобетонних елементах. *Ресурсемкі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2017. Вип. 34. С. 131.

На кожному виділеному рівні структурної неоднорідності матеріал можна описати з позиції лінійної механіки, структурної механіки чи мікромеханіки.

Представлення матеріалу як суцільної середи передбачає виділення об'єму, в якому індивідуальні властивості елементів нівелюються. Мікромеханіка вивчає процеси, які протікають між окремими компонентами при їх взаємодії як в процесі технологічної переробки, так і в процесі експлуатації матеріалу. Виявлення особливостей взаємодії окремих складових дозволить розкрити механізм формування середніх характеристик на рівні M_1 . У свою чергу, аналіз взаємодії структур на рівнях M_1, M_2, \dots, M_i (рис.2) розкриває механізм формування фізико-механічних характеристик КБМ з багаторівневою організацією структури. Такі матеріали можна представити як матеріали типу "структура в структурі" чи "композит в композиті".

Для кожного рівня виділеної структурної неоднорідності ймовірна поява тріщин, довжина яких a була би менше самої структурної неоднорідності $m_p, a/m_i < 1$. Оскільки в матеріалі виникають дефекти на різних масштабних рівнях, вони є небезпечними для одних "структур" і безпечними для інших. В загальному випадку необхідно добиватися, щоб тріщини з більш низьких масштабних "структур" не переростали би в більш високі до розмірів M_i .

Поява і розвиток тріщин у твердіючих матеріалах залежать від кількості взаємодіючих фаз, їх механічних характеристик, геометричних параметрів гетерогенної системи, геометричних характеристик композитних зразків чи конструкції, величини і кінетики розвитку власних об'ємних деформацій, зміни реологічних характеристик твердіючої системи, інтенсивності і параметрів технологічних впливів.

Складна функціональна залежність зародження і розвитку технологічних тріщин на характерних рівнях структурних неоднорідностей КБМ ставить задачу вивчення механізмів структуроутворення і руйнування композитів багаторівневої організації структури. Проведені дослідження^{5, 6, 7, 8, 9, 10}

⁵ Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоемкості. Київ, 1991. С. 9.

⁶ Дорофеев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 75.

⁷ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В. Чисельні дослідження, що характеризують початкову стадію роботи композитів. *Нові технології в будівництві*. 2017. Вип. 33. С. 31.

⁸ Дорофеев В.С., Пушкар Н.В. Руйнування гідротехнічних бетонів при дії циклічних навантажень і впливів. *Science and technology of the present time: Priority development directions of Ukraine and Poland: proceedings of International Multidisciplinary Conf.* (Wolomin, 19–20 October 2018). Wolomin, 2018. P. 95.

⁹ Dorofeev Vitaliy, Myronenko Igor, Pushkar Natalia. The Effect of Technological Damage on the Properties and Reliability of Construction Materials and Structures Applied Mechanics and Materials (AMM). 2022. Vol. 908. P. 152.

¹⁰ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоцикловому навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf.* (Brussels, 26–28 December 2022). Brussels, 2022. P. 20.

показали, що для якісного описання фізико-механічних процесів структуроутворення і руйнування КБМ і встановлення кількісних співвідношень достатньо виділити дві структури: мікро- і макрорівні. На мікрорівні КБМ характерною структурною неоднорідністю є "в'язуче-наповнювач". Макроструктура представлена неоднорідністю "розчинна частина-заповнювач". Причому припускається, що кожна виділена структура складається зі своїх структур більш низького масштабного рівня. Такі структури в матеріалі існують не ізольовано одна від одної. Проростаючи з одного на інший масштабний рівень, вони взаємодіють між собою. Виконується своєрідна самоорганізація гетерогенної системи, коли структури нижнього масштабного рівня ініціюють організацію структур більш високого масштабного рівня, що в свою чергу викликає зміну вихідних структур. Така діалектична взаємодія між структурами в поліструктурних КБМ потребує диференційного вивчення кожної структури з послідовним їх з'єднанням у композит.

Багаторівнева організація структури КБМ достатньо чітко проглядається в бетонах, як найбільш масовій продукції промисловості будівельних матеріалів, від субмікрокристалів гелевої складової з розміром $10^{-8} \dots 10^{-10}$ м до неоднорідності "розчинна частина-заповнювач" з характерним розміром $2 \cdot 10^{-2}$ м.

Мікроструктура утворюється шляхом суміщення низьков'язких в'язучих і дисперсних наповнювачів, включаючи дисперсну арматуру мілких фракцій (цементу і води, бітуму і порошку, полімеру і наповнювача). Властивості мікроструктури визначаються явищами, які протікають у контакті рідкої і твердої фаз, тобто залежать від кількості наповнювача, його дисперсності, фізико-хімічної активності поверхні, концентрації в'язучого, кількості небезпечних для даної структури дефектів та інших факторів. Мікроструктура присутня зв'язковими в'язучими КБМ, під якими розуміють бінарні композиції, що складаються з низьков'язких пластичних в'язучих і наповнювачів.

Взаємодія окремих компонентів і складових структур КБМ здійснюється по поверхням розділу (ПР). Можна виділити три типи ПР, характерних для мікро- і макроструктур КБМ:

1. При взаємодії окремих компонентів здійснюється їх взаєморозчинення.
2. Взаємодія компонентів супроводжується хімічними реакціями, у зв'язку з чим утворюється перехідний шар з модифікованого матеріалу.
3. При взаємодії компоненти не створюють перехідні шари.

Виділені типи ПР створюють свої структури КБМ, і повинні мати хімічну стабільність на весь період експлуатації, забезпечувати заданий

рівень механічних властивостей для перерозподілу технологічних, експлуатаційних деформацій і напружень між окремими компонентами та структурами, забезпечувати властивості гетерогенної середи як єдиного матеріалу. Крім того, ПР, що з'явилися, здатні прискорити або уповільнити розвиток тріщин в системі, що необхідно враховувати при проектуванні складів матеріалу з мінімальною кількістю початкових дефектів. В наповнених системах розвинута площа поверхні ПР здатна модифікувати властивості готового матеріалу і змінювати умови його технологічної переробки.

Класифікацію КБМ на макрорівні можна проводити по виду і призначенню заповнювачів:

1. Будівельні композити із заповнювачами у вигляді гранул правильної і неправильної форми. Бетони можуть мати хаотично розташовану арматуру, поперечні розміри елементів якої порівняні з крупністю заповнювачів.

2. КБМ, насичені лінійними армуючими елементами з оптимальним геометричним розташуванням в їх структурі і по об'єму композитних виробів.

3. КБМ, складені із в'язучих і орієнтованих волокнистих заповнювачів, об'єднаних у плоскі армуючі елементи.

4. КБМ, скомпоновані із в'язучих і заповнювачів, об'єднаних у каркаси по об'єму виробів.

Запропонована класифікація по виду і призначенню заповнювачів передбачає, що пружно-механічні характеристики і їх щільність можуть бути вище, дорівнювати або бути нижче пружно-механічних характеристик і щільності в'язучих.

2. Характер розповсюдження внутрішніх поверхонь розділу і технологічних тріщин в бетонах

Проведені дослідження і аналіз показали, що на кожному виділеному рівні структурних неоднорідностей реалізується свій механізм спонтанного структуроутворення. При цьому якісно не схожі механізми організації структур призводять до утворення схожих структурних параметрів – внутрішніх поверхонь розділу (ВПР) і технологічних тріщин. ВПР різних типів і технологічні тріщини визначають гетерогенність окремих структурних неоднорідностей і гетерогенність всього матеріалу. Таким чином, ВПР і технологічні тріщини можна віднести до придбаних структурних елементів, вид і характер розповсюдження яких визначають у подальшому здатність активно вписуватися в умови експлуатації.

Для якісної оцінки ролі одних або інших елементів структури в поведінці поліструктурного матеріалу виникла необхідність розробки моделі структури бетону. При розробці моделі бетону виходили з апріорної інформації про наявність на всіх рівнях структурних неоднорідностей несучильностей у вигляді ВПР і технологічних тріщин. Незалежно від причин створення і масштабу рівня ВПР мають загальні ознаки, до яких можна віднести:

- розділення матеріалу на окремі фрагменти, з утворенням фрагментів чи шарів модифікованого матеріалу, властивості якого відрізняються від властивостей матеріалу в об'ємі;
- здатність сприймати навантаження і деформації у зв'язку з зовнішніми впливами і внутрішніми процесами, які передаються від фрагмента до фрагмента;
- здатність перерозподіляти деформації між фрагментами;
- є одним із важливих джерел внутрішнього і зовнішнього теплообмінів.

Як показано в¹¹, береги тріщин як своєрідні ВПР сприймають об'ємні деформації, що розвиваються у твердіючому в'язучому. Це призводить до збільшення ширини розкриття тріщин, накопичення максимальних пластичних деформацій і скачкоподібного проростання тріщини до наступних місць затримки. При цьому здійснюється збільшення площі поверхні берегів тріщини, що дає можливість сприймати більші деформації і їх градієнти, та призводить до появи явищ формозміни протилежних берегів і подальше збільшення їх розкриття та наступного прориву місць затримки. У випадку проростання тріщини до перетину з берегами іншої тріщини її функції як концентратора напружень втрачаються, і вона перетворюється у ВПР з комплексом перерахованих вище ознак. Таким чином, ВПР є завершеними у своєму розвитку технологічними тріщинами.

В загальному випадку в модель структури бетону включені ВПР, утворені в результаті взаємодії розчинної частини з крупним заповнювачем (рис.3,а) і цементного каменю з м'яким заповнювачем (рис.3,б) та ВПР міжкластерних поверхонь розділу на рівні цементного каменю (рис.3,в). При цьому можна виділити ВПР на межі розділу матриці з заповнювачами і ВПР у матричному матеріалі.

До технологічних тріщин можна віднести несучильності матеріалу, що утворюються на різних рівнях структурної неоднорідності, які можна

¹¹ Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоемкості. Київ, 1991. С.55.

охарактеризувати протяжність, яка в декілька разів більше розміру між протилежними площинами (берегами) і наявність однієї або двох точок (ліній) змикання протилежних площин (берегів).

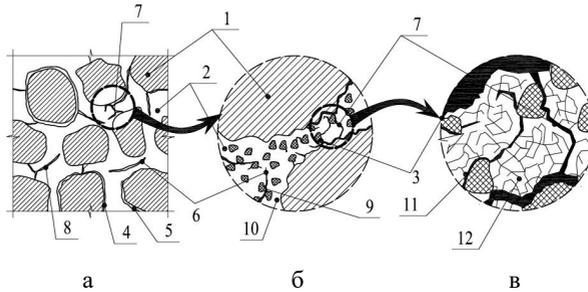


Рис. 3. Модель структури бетону

а – макроструктура; б – рівень "розчинна частина – крупний заповнювач"; в – рівень "цементний камінь – мілкий заповнювач"; 1 – крупний заповнювач; 2 – розчинна частина; 3 – мілкий заповнювач; 4 – тріщини зчеплення по всій поверхні заповнювачів; 5 – тріщини зчеплення, розташовані на окремих ділянках поверхні заповнювачів; 6 – тріщини, розташовані між заповнювачами; 7 – тріщини, які замикаються на берегах інших тріщин; 8 – тріщини, незавершені у своєму розвитку; 9 – модифікований поверхневий шар на ВПП і берегах тріщин; 10 – цементний камінь; 11 – тріщини, що виникли в результаті взаємодії мілких заповнювачів і цементного каменю; 12 – структурні блоки цементного каменю; 13 – міжкластерні поверхні розділу; 14 – технологічні тріщини на рівні цементного каменю

Причиною виникнення зародкових тріщин є об'ємні зміни, які супроводжують твердіння і структуроутворення мінеральних в'язучих. Можна представити, що, розвиваючись по певним залежностям у всьому об'ємі матричного матеріалу, деформації одночасно ініціюють принципово різні механізми утворення зародкових тріщин (базових несучільностей) в детермінованих місцях. На рівні структурної неоднорідності "матриця-заповнювачі" місце виникнення зародкових тріщин визначається геометричними характеристиками макроструктури і співвідношенням значень R_a і R_k . У випадку $R_a < R_k$ зародкові тріщини виникають на межі розділу між матричним матеріалом і заповнювачем з подальшим проростанням на цій границі розділу. Для ситуації $R_a > R_k$ зародкові тріщини з'являються у матричному матеріалі між заповнювачами. Подальша траєкторія таких тріщин визначається структурними особливостями

матричного матеріалу. Конкретне місце появи тріщини в макроструктурі і мікротраєкторії її розвитку пов'язані з утворенням міжкластерних поверхонь розділу різного масштабного рівня, які при об'ємних змінах, що продовжуються, здатні трансформуватися в технологічні тріщини чи ВПР, які характерні для даного рівня структурної неоднорідності.

Можна представити, що ці процеси реалізуються на усіх рівнях структурних неоднорідностей, взаємовпливаючи і взаємодіючи один з одним. У випадку поліструктурної організації матеріалу об'ємні деформації, переходячи на більш високий рівень структурної неоднорідності призводять до появи значних площин поверхонь розділу. Місце і вид цих площин визначаються особливостями даного рівня структурних неоднорідностей, і вони автоматично входять складовою часткою в структуру на рівні взаємодії цементного каменю з мілким заповнювачем (рис.3,б) і на рівні самого цементного каменю (рис.3,в). В моделі представлені технологічні тріщини, які в процесі еволюції матеріалу не виродились у пори і капіляри за рахунок "самозаліковування".

Оскільки траєкторія їх розвитку визначена дискретною будовою різних рівнів структурних неоднорідностей, то до визначеного рівня впливів експлуатаційні тріщини будуть замикатися на берегах технологічних тріщин чи на ВПР. При цьому енергія, необхідна для зростання тріщини розсіюється, що затримує процеси руйнування. Замикання тріщин на берегах інших тріщин чи ВПР переводить їх у новоутворені ВПР, при яких функції тріщини як основного фактору поділу матеріалу на самостійні частини втрачаються. Рівень властивостей при цьому не змінюється оскільки технологічні тріщини перетворюються в експлуатаційні і розвиваються в межах одного структурного фрагменту. Подальші навантаження будуть викликати об'єднання ВПР і тріщин різних структурних фрагментів по достатньо складним траєкторіям, які залежать від початкового дискретного стану кожного рівня структурної неоднорідності. Після об'єднання ВПР до розміру магістральної тріщини може спостерігатися її незворотне зростання до повного розділення матеріалу в конструкції на частини (руйнування).

В силу того, що кінетика руйнування матеріалу конструкцій, які експлуатуються в екстремальних умовах, в значній мірі визначається видом і характером розповсюдження ВПР і технологічних тріщин на різних рівнях структурних неоднорідностей бетону як поліструктурного матеріалу, можна вважати, що, змінюючи основні параметри вихідних структурних елементів в запропонованій моделі структури бетону, можна більш повно використовувати ресурс матеріалу за рахунок зміни його руйнування.

В якості основних факторів, які дозволяють змінити вид і характер ВПР та технологічних тріщин, прийняті форма і мінералогічний склад крупних

заповнювачів. Зміна цих елементів дозволить отримати бетони з різними типами структурних параметрів на рівні макроструктури, представленою неоднорідністю "розчинна частина-крупні заповнювачі".

Кількісну оцінку пошкодженості бетону технологічними дефектами проводили через визначення пошкодженості поверхневими тріщинами.

Пошкодженість бетону дефектами визначали вимірюванням довжини поверхневих тріщин курвіметром з точністю до 0,001 мм на протилежних гранях зразка. Поверхневі тріщини фіксувалися витримкою зразків у водних розчинах таніну. Зміна лужності бетону в районі тріщин змінювала забарвлення танінів, виявляючи та фіксуючи тріщини¹². Прийнята методика визначення тріщин показала, що вона може дозволити виявляти тріщини шириною розкриття від 2 мкм і більше і довжиною 2 мм і більше. Технологічні тріщини визначалися на зразках віком понад 200 діб (рис.4).

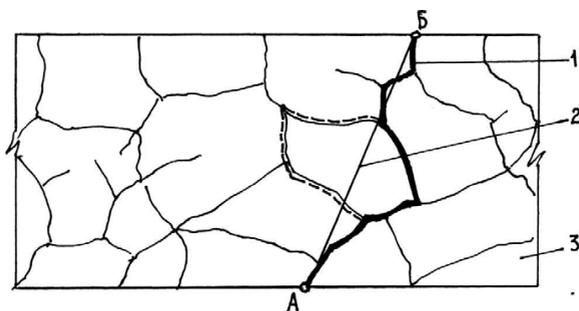


Рис. 4. Метод визначення коефіцієнта ушкодженості:

1 – технологічна тріщина довжиною l_{cr} ; 2 – геодезична лінія l ; 3 – виділена ділянка на поверхні бетону

$$K_{II} = l_{cr}/l \quad (1)$$

Фізична суть коефіцієнта полягає в оцінці питомої довжини поверхневих тріщин, виявлених на одиниці довжини. Зі збільшенням K_{II} міцнісні і деформативні характеристики бетону знижуються.

Розглянемо механізм трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні. Для пояснення механізму зародження тріщин при дії знакозмінних навантажень запропоновано кілька моделей (рис.5).

¹² Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Целікова А.Г. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів. *Вісник Львівського національного аграрного університету, Архітектура і сільське будівництво*. 2017. Вип. 18. С. 77.

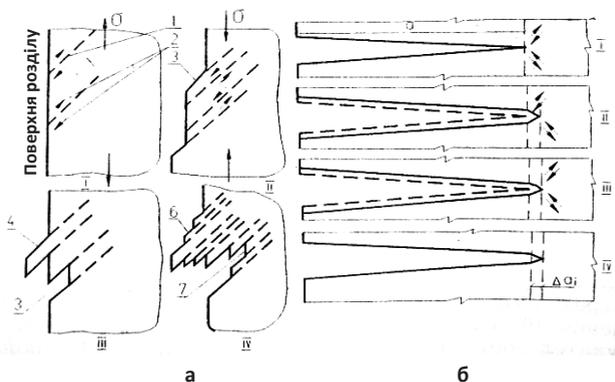


Рис. 5. Механізм зародження тріщин (а) та його розвитку (б)

I...IV – етапи зародження та розвитку втомних тріщин; 1...3 – деформування по площинам; 4, 5 – зміна характеру поверхні; 6 – зародження тріщин екструзії; 7 – зародження тріщин інтрузії

Під дією розтягуючих напружень в деякій площині відбувається зсув. Зсув у зворотному напрямку (зміна знаку напружень) йде по паралельній площині. При цьому можливі видавлювання або екструзія чи вдавлювання або інтрузія поверхні досить ізотропного і пружного матеріалу. При змінних напруженнях вдавлювання являє собою зародкову тріщину, здатну зростати до того часу, поки досягне довжини, при якій визначальною умовою подальшого зростання стануть напруження біля її вершини (рис. 5, б).

Припускається, що в полі високих напружень у вершині тріщини відбувається зсув. Це спричиняє збільшення ширини розкриття тріщини та її зростання на Δa . Відбувається зсув на іншій площині (етап III). Дифузійні процеси здатні перетворити гострий кінець тріщини на тупий. Під дією стискаючих напружень ширина розкриття тріщин зменшується, і пластичні деформації, що виникають, сприяють відновленню гострого гирла (етап IV). Після чого цикл повторюється і тріщина збільшується на чергове значення Δa .

Представимо напівнескінченну пластину з тріщиною, розташованою на осі симетрії (рис. 6). Під впливом зовнішніх впливів матеріал зазнає об'ємних деформацій зі змінним знаком.

Цикл починається з деформацій збільшення об'єму. Через прийняті припущення берега тріщин будуть переміщатися паралельно самим собі¹³.

¹³ Дорофєєв В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 88.

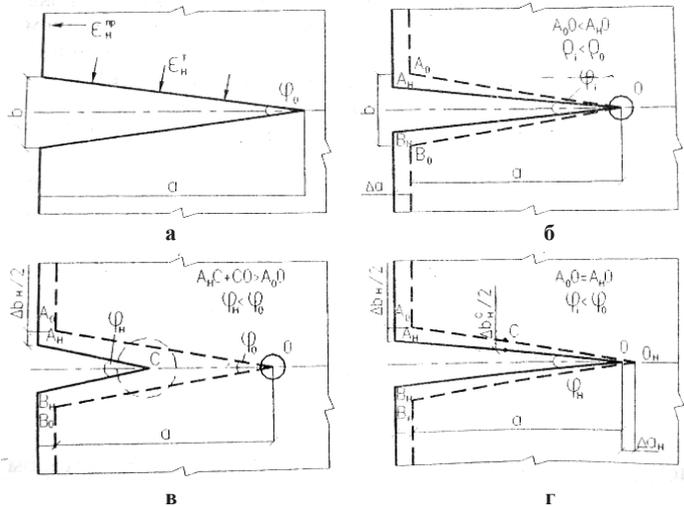


Рис. 6. Механізм втомного зростання технологічної тріщини при знакозмінних об'ємних деформаціях набухання: геометричні параметри технологічної тріщини (а); зміна геометричних параметрів тріщини при пластичних деформаціях біля її гирла (б); зміна параметрів тріщини при пластичному деформуванні гирла та її берегів (в); зміна властивостей тріщини за рахунок її зростання (г)

Введемо кінцеві розміри зразка і прийемо, що в ньому тріщини розташовані паралельно одна до одної на відстані, при якій відбувається нерівномірний розподіл деформацій як по довжині тріщини, так і на протилежних берегах (рис.7).

Збільшення об'єму матеріалу викликає нерівномірний розподіл деформацій на берегах тріщин (рис. 6, б).

Розподіл деформацій в районі тріщини АВ за умови лінійної залежності між об'ємними змінами матеріалу та його лінійними деформаціями визначали графоаналітичним методом.

Аналіз показав, що через геометричні особливості взаєморозташування тріщин та їх розмірів виникають градієнти деформацій, які викликають появу деформацій зсуву. Останні можуть виникнути як на самому березі тріщини, так і біля її гирла. На березі тріщини деформації здатні утворювати ділянки видавлювання, що веде до утворення втомних зародкових тріщин. Зсув у вершині тріщини веде до її розвитку на значення Δa . Градієнт деформацій визначає напрям розвитку такої тріщини. Таким чином, вже на

стадії збільшення об'єму матеріалу при нерівномірному розподілі деформацій набухання на берегах тріщин можливе зростання тріщини та появи зародкових тріщин. Відбувається дроблення структури матеріалу за схемою (рис. 7, в).

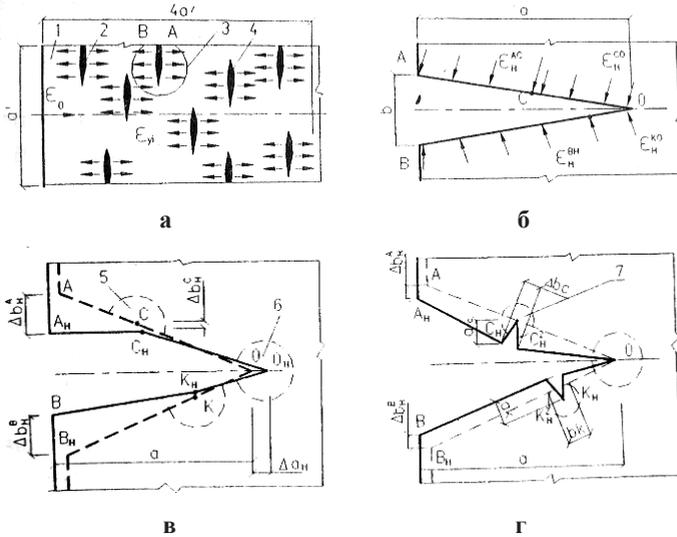


Рис. 7. Механізм зростання втомної тріщини при дії на її береги різновеликих усадкових деформацій: розподіл усадкових деформацій у зразку з тріщинами (а); геометричні параметри тріщини та розподіл на її берегах деформації набухання (б); зміна геометричних параметрів тріщини за рахунок пластичного деформування берегів і гирла (в); те саме за рахунок зародження на її берегах нових тріщин (г); 1 – зразок; 2 – поверхневі тріщини; 3 – різновеликі усадкові деформації; 4 – тріщини в об'ємі матеріалу; 5 – зони пластичності на берегах; 6 – зони пластичності біля гирла; 7 – нові поверхні розділу на берегах тріщини

Потенційна можливість зростання та трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні при знакозмінних об'ємних змінах матеріалу ставить завдання вивчення впливу кількості циклів зміни об'єму на накопичення пошкоджень у бетоні. Збільшення та зменшення об'єму матеріалу відбувається при його експлуатації в умовах періодичного зволоження або висушування, зміни температури та ін.

Проведено випробування зразків віком 540 діб на дію малоциклового зволоження та висушування з метою визначення характеру технологічної

пошкодженості та його впливу на кінетику розвитку експлуатаційних тріщин. Кількість циклів зволоження та висушування становила 80 та 110. У процесі досліджень вимірювалося накопичення пошкоджень та $K_{лr}$. Дослідження показали, що в міру збільшення циклів зволоження та висушування у бетонах різного складу відбувається накопичення пошкоджень¹⁴. При цьому можна виділити три випадки накопичення пошкоджень (рис. 8).

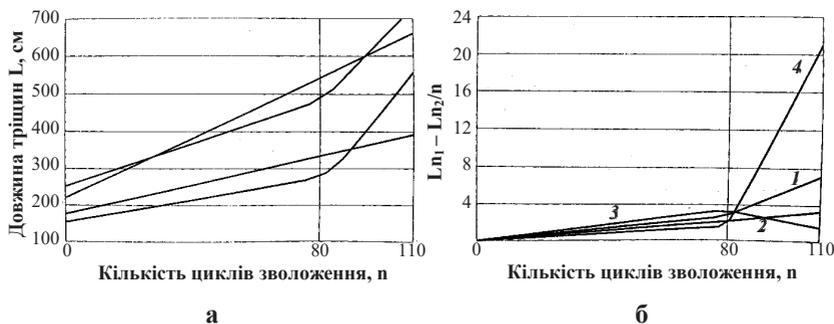


Рис. 8. Вплив зволоження та висушування на зростання поверхневих тріщин: зміна довжини поверхневих тріщин (а); зміна інтенсивності зростання тріщин (б); 1...4 – номери складів бетону

Для першого випадку (рис.8,а) характерно, що при перших 80 циклах відбувається незначне збільшення довжини тріщин. Максимальне збільшення довжини тріщини становить 64%. Це може бути пов'язано з тим, що об'ємні зміни для даних структур бетону при початкових циклах знакозмінної деформації не можуть призвести до утворення нових поверхонь розділу (тріщин), а зміна довжини тріщин може бути пов'язана з підростанням технологічних тріщин.

Для другого випадку характерна інтенсивна зміна протяжності поверхневих тріщин, яка може становити 290%. Це може бути пов'язане з появою та розвитком нових поверхонь розділу. Зі збільшенням кількості циклів від 80 до 110 відбувається різке накопичення пошкоджень, і максимальний приріст становить 399%.

В окрему групу можна віднести склади, для яких зміна пошкодженості відбувається пропорційно кількості циклів.

¹⁴ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоциклового навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf. (Brussels, 26–28 December 2022)*. Brussels, 2022. P. 21.

Відмінність у зміні пошкодженості бетонів дозволяє оцінити швидкість накопичення дефектів по їх інтенсивності (рис.8,б). Дані показують, що для частини бетонних складів максимальна швидкість накопичення дефектів відбувається при 80 циклах. Подальше збільшення кількості циклів знижує інтенсивність приросту довжини розвитку тріщин. Для інших складів бетону (4) інтенсивність накопичення дефектів різко зростає після 80 циклів.

Експлуатація конструкції в зонах поперемінного впливу вологості передбачає, що при зміні кліматичних умов (наприклад, в зимовий період) може відбуватися їх багаторазове заморозування та розморожування.

Випробування проводилося на зразках розмірами 70×70×280 мм за прискореним методом (насичення та розморожування зразків здійснювали в 5% розчині NaCl, а заморозування – в камері при -50°C). Розморожування проводили у ванні з водою, температура якої становила 15...20°C. Було проведено 100 циклів заморозування та відтавання.

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням кількості циклів у бетонах відбувається накопичення пошкоджень. Можна виділити два випадки накопичення пошкоджень (рис.9).

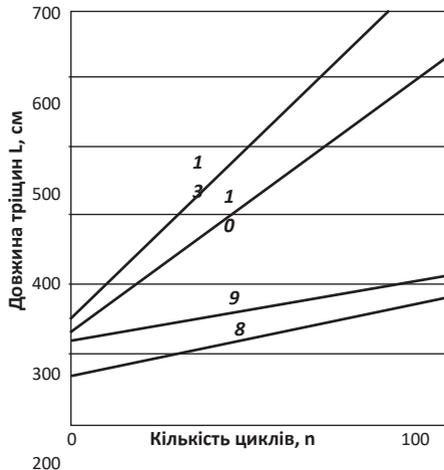


Рис. 9. Вплив кількості циклів заморозування та розморожування на зміну протяжності поверхневих тріщин: 8...13 – номери складів бетону

Для першого випадку характерне незначне збільшення приросту довжини тріщини. Максимальний приріст збільшення довжини тріщини

становить 60%. Це може бути пов'язане з поступовим підrostанням технологічних тріщин.

Для другого випадку характерна помітна зміна протяжності поверхневих тріщин, що становить 211%. Це пов'язано з появою та розвитком нових поверхонь розділу та нових тріщин.

Аналогічні дані отримані для коефіцієнта пошкодженості.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показує, що композиційні будівельні матеріали є складеними багатокомпонентними середовищами зі складною організацією структури по типу "структура в структурі" чи "композит в композиті". Така складна організація структур КБМ є об'єднуючою основою матеріалів різної природи в'язучих, заповнювачів і фізико-механічних властивостей. Це дозволяє цілеспрямовано використовувати окремі структурні елементи і цілі "структури", а також технологічні прийоми і способи для отримання кінцевого продукту з підвищеними механічними характеристиками і експлуатаційною надійністю.

Формування внутрішніх поверхонь розділу між матричним матеріалом та включеннями визначається характером адгезійно-когезійних сил зв'язку на межах розділу, способами укладання та кількістю включень. Цілеспрямована зміна цих параметрів дозволить прогнозувати пошкодженість макроструктури технологічними дефектами.

Прийнята методика оцінки технологічної пошкодженості через поверхневі тріщини показала, що запропонований спосіб дозволяє виявити тріщини з шириною розкриття від 5 мкм і довжиною більше 2 мм, що дає можливість вивчити розвиток технологічних тріщин при дії середі експлуатації, і трансформацію технологічних тріщин в експлуатаційні.

Встановлено вплив початкової пошкодженості матеріалів на експлуатаційні властивості композиційних будівельних матеріалів та конструкцій. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що збільшення початкової пошкодженості за рахунок утворення безлічі тріщин сприяє інтенсивному накопиченню пошкоджень як за рахунок технологічних тріщин, так і за рахунок утворення нових поверхонь розділу (тріщин). Це впливає на характер руйнування зразків після знакозміної деформації, і дозволяє визначити стійкість матеріалу при різних зовнішніх впливах.

Аналіз структури бетону як грубогетерогенного матеріалу і механізмів структуроутворення на мікро- і макрорівнях дозволив запропонувати модель структури бетону, в яку крім заповнювачів, матричного матеріалу, модифікованого шару на межі розділу матриці і заповнювачів, пор і капілярів, включені в якості елементів структури такі елементи як

технологічні тріщини і ВПР. В свою чергу технологічні тріщини і ВПР класифіковані за масштабною ознакою, за місцем виникнення і напрямком розвитку. Проведений аналіз дозволив намітити технологічні шляхи отримання бетонів з регульованими виділеними структурними елементами з метою підвищення стійкості при різних режимах експлуатації.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто композиційні будівельні матеріали (бетони), властивості яких формуються та трансформуються у часі на внутрішніх поверхнях розділу. Описано механізм формування структури композиційних будівельних матеріалів – бетонів з утворенням поверхонь розділу на площині контакту, включень та матриці. Як включення розглянуто дрібний і крупний заповнювач, а як матриця – розчинна частина і цементний камінь. Подібне виділення структурних рівнів дозволяє встановити виникнення небезпечних дефектів, розмір яких більший за розмір складових структури елемента. Тому розмір дефекту, безпечний на одному структурному рівні, стає небезпечним на більш низькому рівні. Технологічні тріщини визначають пошкодженість конструкцій технологічними дефектами, які трансформуються в експлуатаційні та визначають експлуатаційну надійність. Неоднорідність конструкції пропонується визначати через поверхневу пошкодженість технологічними дефектами.

Встановлено характер тріщиноутворення та розвитку тріщин при дії зовнішнього навантаження у залізобетонних стиснутих і згинальних елементах залежно від технологічної пошкодженості. Показано, що розподіл усадкових деформацій в бетоні з сіткою технологічних тріщин впливає на деформативність і на стійкість при атмосферному впливі середовища, а також в умовах втомного малоциклового навантаження.

Література

1. Zinchenko H.V. Stressed-deformed condition and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monografia* / H.V. Zinchenko, V.S. Dorofeev. Riga, 2019. P. 165–184.

2. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Курилюк Д.В., Пушкар Н.В. Поновлення громадських будівель, пошкоджених внаслідок дії вибухів *Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society*: праці 2 міжнар. і практ. інтернет-конф. (Дніпро, 7–8 листопада 2024 р.) Дніпро, 2024. С. 90–92.

3. Дорофеев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. 168 с.

4. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Романюк В.В. Дослідження характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в залізобетонних елементах. *Ресурсоємкі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2017. Вип. 34. С. 129–135.

5. Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоемкості. Київ, 1991. 144 с.

6. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Целікова А.Г. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів. *Вісник Львівського національного аграрного університету, Архітектура і сільське будівництво*. 2017. Вип. 18. С. 75–82.

7. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В. Чисельні дослідження, що характеризують початкову стадію роботи композитів. *Нові технології в будівництві*. 2017. Вип. 33. С. 30–35.

8. Дорофеев В.С., Пушкар Н.В. Руйнування гідротехнічних бетонів при дії циклічних навантажень і впливів. *Science and technology of the present time: Priority development directions of Ukraine and Poland: proceedings of International Multidisciplinary Conf. (Wolomin, 19–20 October 2018)*. Wolomin, 2018. P. 94–97.

9. Dorofeev Vitaliy, Myronenko Igor, Pushkar Natalia. The Effect of Technological Damage on the Properties and Reliability of Construction Materials and Structures *Applied Mechanics and Materials (AMM)*. 2022. Vol. 908. P. 149–156.

10. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоцикловому навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf. (Brussels, 26–28 December 2022)*. Brussels, 2022. P. 19–23.

Information about the authors:

Dorofeyev Vitaliy Stepanovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Construction, Architecture and Design
Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko ave., Odessa, 65044, Ukraine

Pushkar Natalia Volodymyrivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Reinforced Concrete Structures
and Transport Facilities,
Odessa State Academy of Building and Architecture,
4, Didrihsona str., Odessa, 65029, Ukraine

Zinchenko Hanna Valeriivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department
of Construction, Architecture and Design,
Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko ave., Odessa, 65044, Ukraine

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СКЛЯНИХ І АЛЮМОСИЛІКАТНИХ МІКРОСФЕР

Казимиренко Ю. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-5>

ВСТУП

Сучасний попит на поліфункціональні композиційні матеріали зумовлює розвиток технологій і розширення сировинної бази для їх створення. Екстремальні умови експлуатації вимагають від розробників виготовлення легковажних матеріалів, здатних витримувати динамічні, термоциклічні, гідростатичні навантаження та працювати в умовах теплових, електромагнітних, іонізуючих випромінювань та корозійних середовищ. Надання цих спеціальних властивостей здійснюється за участю неорганічних мікросфер, які вводяться у певній кількості до складу композицій.

Це скляні, керамічні, вуглецеві, металізовані та інші види мікросфер, що виробляються хімічними та енергетичними підприємствами, попит на які зростатиме. Кожний з цих видів матиме свої структурні і морфологічні особливості, фізико-механічні та хімічні властивості. Крім складу сполучників і мікросфер на експлуатаційні властивості впливатиме упорядкованість мікросфер у об'ємі композицій.

1. Аналіз технологічних питань та формулювання проблеми досліджень

1.1. Технологічні можливості упорядкованого пакування мікросфер у складі композицій

Відомі технології створення композиційних матеріалів за їх участю ґрунтуються на:

– введенні їх до складу каучуків задля отримання триботехнічних матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя ковзання та малою швидкістю зношування;

- додаванні їх у цементні склади тонкошарових будівельних сумішей з підвищеними адсорбційними властивостями;
- утворенні водно-дисперсійних складів, використання яких спрямовано на регулювання процесів паропроникнення і водопоглинання;
- змішуванні металізованих скляних мікросфер з суспензіями для отримання теплозахисних покриттів з ефектом екранування від електромагнітних випромінювань;
- формуванні синтактичних пін на основі термореактивних полімерів, які застосовуються для виготовлення відповідальних елементів і деталей засобів морської, підводної, аерокосмічної техніки.

Так, у триботехнічних матеріалах алюмосилікатні порожнисті мікросфери (АСПМ), якщо вони знаходяться на поверхні тертя¹, являють собою «захисний екран від подальшого зношування». Масовий вміст АСПМ у складі бутадієн-стирольної гумової суміші знаходиться у межах 2...8%. Для підвищення теплоізоляційних властивостей мінеральних в'язучих або полімерних штукатурних покриттів наповнення порожнистими скляними або алюмосилікатними мікросферами зростатиме до 90%², що пояснюється особливостями механізмів теплопередачі в об'ємі суцільного композиту. Завдяки склоподібним поверхням мікросфер перенос тепла відбувається від нагрітих поверхонь до холодних через електромагнітні хвилі (фотони), ефект від яких посилюється віддзеркаленням основних типів випромінювань і конвективними процесами по повітрю. Збільшення коефіцієнту заповнення об'єму мікросферами сприятиме підвищенню здатності «розсіювання радіаційної складової» теплового потоку, який падає на декоративну поверхню енергозберігаючого покриття фасаду будівель³. Цей ефект значно посилюється в результаті застосування металізованих мікросфер⁴. Автори⁵ зосереджують увагу на рівномірному

¹ Півоваров О. А., Павленко А. А. Інноваційне застосування алюмосилікатних мікросфер (ценосфер) як ефективного наповнювача в композиційні матеріали. *Наука, технології, інновації*. 2023. № 2. С.48-56. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-06>

² Плахотніков К. В., Деденьова О. Б., Бодаренко О. І. Адсорбційні властивості алюмосилікатних мікросфер у цементному композиті. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 92. № 2. С. 219-225. DOI: [10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225](http://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225)

³ Саєнко Н. В., Биков О. О., Попов Ю. В., Демідов Д. В. Оцінка можливості застосування водно-дисперсних покриттів в якості декоративно-захисної обробки фасадів будівель. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture: Building materials and techniques*. 2020. № 79. Рр. 126-134 DOI: [10.31650/2415-377X-2020-79-126-134](http://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-126-134)

⁴ Сімбіркіна А. М., Хандецький В. С., Сverdліковська О. С., Черваков О. В. Безконтактні вимірювання провідності прототипів зовнішніх теплозахисних покриттів на основі металізованих скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2020. № 5. С. 81-87. DOI: [10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87](http://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87)

⁵ Гусакова К. Г., Трачевський В. В., Шульженко Д. М., Grande D., Файнлейб О. М. Синтактичні піни як композиційні матеріали для високотехнологічних галузей промисловості. *Полімерний журнал*. 2023. 45, № 3. С. 181–194 DOI: <https://doi.org/10.15407/polymerj.45.0>

розподілі скляних мікросфер у об'ємі полімерної матриці і залежності гідростатичної міцності та інших функціональних властивостей синтактичних пін від коефіцієнта пакування мікросфер, який може сягати 0,9. Більшість технологій створення композиційних матеріалів можна назвати «холодними» або «теплыми», де температурні параметри просочення не перевищуватимуть 60...90 °С, що є енергоефективним та позитивно впливатимуть на зберігання мікросферами сферичної форми, змочуваності їх сполучниками. Натомість суттєво змінити властивості і набути нового досвіду застосування композицій, наповнених скляними і керамічними мікросферами, можна шляхом застосування високотемпературних технологій, які дозволять міцно з'єднувати їх між собою та використовувати металеві компоненти.

1.2. Формулювання науково-технічної проблеми та мети дослідження

На підставі проведеного аналізу літературних джерел в роботі сформульовано **науково-технічну проблему** розвитку технологій створення поліфункціональних композицій, наповнених неорганічними мікросферами.

Мета дослідження – ґрунтовний аналіз, узагальнення можливостей застосування високотемпературних технологій для отримання композиційних матеріалів за участю порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер з визначенням проблемних питань, переваг, недоліків, фізико-хімічних процесів як науково-технічних передумов щодо їх розвитку.

Об'єкт досліджень – фізико-хімічні процеси формування композиційних матеріалів і покриттів, до складу яких входять порожнисті скляні і алюмосилікатні мікросфери.

Предмет досліджень – технології спікання та електродугового напilenня для формування композиційних матеріалів і покриттів з участю мікросфер.

1.3. Матеріали для отримання експериментальних зразків

Експериментальні роботи полягали у отриманні та дослідженні партії пробних зразків:

- спечених без сполучника скляних мікросфер;
- спечених скляних мікросфер з порошком (пудрою) алюмінію;
- електродугових покриттів, наповнених скляними мікросферами;
- електродугових покриттів, наповнених алюмосилікатними мікросферами.

В технологіях використано порожнисті скляні мікросфери (PCM) виробництва фірми «ЗМС» (офіційним дистриб'ютором компанії «ЗМ»

в Україні є фірма INTA 3M) та АСПМ зольні марки МПк200-400 (ТОВ «Виробниче об'єднання Мікросфери», Україна). Хімічний склад вихідних матеріалів, які застосовано для отримання експериментальних зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних матеріалів

| Матеріали | Опосередкований хімічний склад, мас.%,% |
|--|---|
| Для технологій спікання скляних мікросфер без сполучника | |
| Скляні мікросфери системи Na ₂ O–B ₂ O ₃ –SiO ₂ | SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃ |
| Скляні мікросфери системи Na ₂ O–SiO ₂ | SiO ₂ – 77,0; Na ₂ O ₃ – 23,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃ |
| Для технологій спікання скляних мікросфер з порошком алюмінію | |
| Скляні мікросфери системи Na ₂ O–B ₂ O ₃ –SiO ₂ | SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃ |
| Порошок алюмінію, ДСТУ 6058-73 (зокрема марки ПА-4) | Al – 98,8; Fe – 0,35; Si – 0,4; Cu – 0,02 |
| Пудра алюмінію ДСТУ 5494-95 (зокрема марки АПС-1А) | Al – 99,8; Fe – 0,2 |
| Для формування покриттів, наповнених мікросферами | |
| Сталева підкладка | |
| Ст3 (ГОСТ 380-2005) | C – 0,14...0,22; Mn – 0,30...0,60; Si – не більше 0,05; Fe – основа |
| Зварювальний дріт | |
| 65Г (за вмістом Mn близька до AISI 1066/1070) | C – 0,62...0,7%; Si – 0,17...0,37%; Mn – 0,9...1,2%; Cr не більше 0,25%; Fe – основа |
| Св-08 (ISO 14341-A-G 4Si1) Св-08Г2С (ISO 14341-A-G3Si1) | C – 0,5...0,12%; Si – 0,17...0,37%; Mn – 0,35...0,65%; Cr не більше 0,1%; Fe – основа C – 0,05...0,11; Si – 0,70...0,95; Mn – 1,80...2,0; Cr – до 0,20; Ni – до 0,25; S – до 0,025; P – до 0,03 |
| СвАМг-5 (ER 5356 / AWS A5.10) | Mg – 5,0; Fe – до 0,4; Cr – 0,12 ; Mn – 0,15; Si – до 0,25; решта – Al |
| Наповнювач | |
| Алюмосікатні мікросфери | SiO ₂ – 74,9%; Al ₂ O ₃ – 13,9%; K ₂ O – 2,8%; Na ₂ O – 1,9%; Fe ₂ O ₃ – 0,9%; CaO – 1,2%; FeO – 0,6%; TiO ₂ – 0,2% Склад газової фази в середині мікросфер: CO ₂ – 70%; N ₂ – 30% |
| Скляні мікросфери | SiO ₂ – 69,0; Na ₂ O ₃ – 13,5; CaO – 6,0; B ₂ O ₃ – 7,5; ZnO – 2,0; F – 2,0 Склад газової фази в середині мікросфер – SO ₃ |

Джерело: таблицю складено автором.

2. Технологічна ланка отримання і експлуатаційна спрямованість композиційних матеріалів і покриттів

Проаналізуємо «лінійку» розроблених композиційних матеріалів і покриттів (рис. 1): їх технологічні особливості, структуру, застосування.

«Синтактичне піноскло» – таку авторську назву отримав легковажний композиційний матеріал, який складається лише з одних скляних мікросфер, спечених без сполучників. Експериментальні роботи проводилися з ПСМ натрійборсилікатного і натрійсилікатного складу; їх хімічний склад наведено у табл. 1. Завдяки варіювання температурно-деформаційними і часовими параметрами⁶, можна отримувати композит щільністю 320...360 кг/м³, який здатний витримувати всебічний гідростатичний тиск до 40...45 МПа. Рекомендована технологічна послідовність складається з операцій:

- дозування скляних мікросфер масовим або об'ємним способом;
- їх вібраційного ущільнення, яке сприятиме більш компактному пакуванню мікросфер різного діаметра (20...100 мкм), де більш дрібні частинки розташовуються між частинками більшого діаметру, утворюючи механічний зв'язок;

- спікання мікросфер у декілька етапів з температурою кінцевої ізотермічної витримки 600...650 °С. На певній стадії прогрівання порошкове тіло можна підпресувати невеликим тиском (0,2...1,2 МПа), що сприятиме умовам контактного припікання скляних частинок за рахунок розм'якшення найбільш легкотопкої склафази у стінці мікросфери.

Формування щільного каркасу відбувається шляхом утворення міжчасткових контактних площин, як це показано на фрагменті мікроструктури (рис. 1, оптичну мікрофотографію зроблено у темному полі на мікроскопі ММР-2Р при збільшенні 360 разів). Підібрані технологічні режими сприятимуть зберіганню скляними частинками форми, максимально наближеної до сферичної та формуванню певної відкритої пористості (7...20%) у структурі матеріалу. Це зумовлює поєднання гідростатичної міцності з теплоізоляційної здатністю композиту ($\lambda = 0,031...0,50$ Вт/(м·К) в діапазоні температур 25...400 °С, що дозволяє рекомендувати його для обладнання засобів морської і підводної техніки⁷.

⁶ Казимиренко Ю. О., Гайдаєнко О. В. Комп'ютерне моделювання розподілу температур спікання скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2024. № 3. С. 67-74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-67-74

⁷ Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. 3 (119). Vol. 30. Pp. 174-180. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0050>

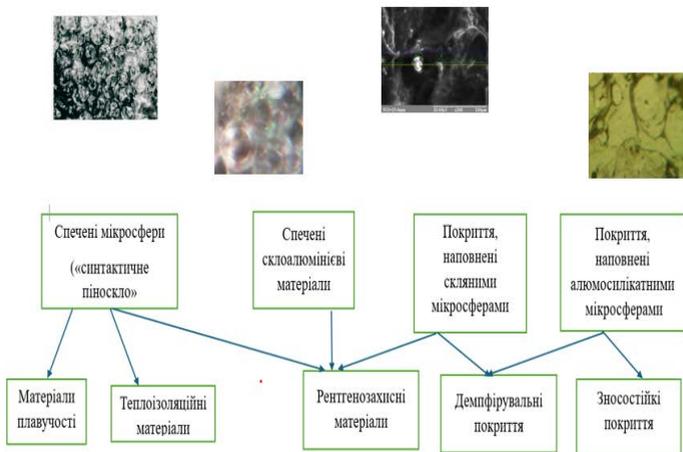


Рис. 1. «Лінійка» матеріалів і покриттів, наповнених мікросферами

[складено автором]

Спечені склоалюмінієві матеріали виготовляються за аналогічною методикою, що й «синтактичне піноскло». До певного навішення скляних мікросфер додається 50% (об'ємн.) порошку або пудри алюмінію (хімічний склад наведено у табл. 1). Технологічна задача полягатиме у формуванні щільно спеченої композиції з почерговим розташуванням компонентів: алюміній–скляна мікросфера: на рис. 1 наведено фрагмент оптичної мікрофотографії, зробленої за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-И зі збільшенням у 500 разів. Така структура забезпечує підвищені рентгенозахисні властивості матеріалів⁸; питомий свинцевий еквівалент (відношення свинцевого еквіваленту до товщини зразку) становить 0,45...0,6; для «синтактичного піноскла» питомий свинцевий еквівалент складатиме 0,14. Автором досліджено потрібний ефект поглинання скляною порожнистою мікросферою потоку іонізуючих випромінювань (стінка мікросфери–SO₃–стінка мікросфери), який також притаманний для метал-скляних матеріалів і покриттів і пояснює зростання рентгенозахисних властивостей і радіаційної стійкості композицій зі збільшенням у їх об'ємі ПСМ⁹. На локальних ділянках між

⁸ Казимиренко Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2013. № 8. С. 134–140.

⁹ Kazymyrenko Y. Patterns and Mechanisms of interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrats Structure. *The advanced science journal*. 2014. Iss. 12. P. 45–48

мікросферами утворюються субмікрокристалічні області, які додатково поглинають енергію випромінювань. Наявність пористості збільшує анізотропію металевої матриці і сприятиме багаторазовому розсіюванню променів. У складі метал-скляних композицій скляна мікросфера набуває ефекту «металізації», який посилює здатність послаблювати дифузійний потік падаючих променів і пояснює підвищені рентгенозахисні властивості у порівнянні з «синтактичним піносклом».

Описані процеси є характерними й для *метал-скляних електродугових покриттів*. Потрапляючи у зону дуги під час електродугового напилення порожниста скляна мікросфера обволікається розплавленим металом і через низьку щільність спливає на поверхню покриття. Тому під час мікроструктурних досліджень поперечних шліфів виявляється занижена їх концентрація (до 11%), основний вміст скляних мікросфер ($35\pm 7\%$) спостерігається на поверхні напиленого на сталеву підкладку зразку. Це пояснює здатність розроблених покриттів захищати від дії випромінювань поверхню конструкцій майже удвічі у порівнянні з покриттями без наповнювача. Питомий свинцевий еквівалент покриттів композиції Св-АМ5-ПСМ складатиме 0,75; для композиції Св-08Г2С- ПСМ – 0,55, що пояснюється відбивною здатністю алюмінію. Проте сталеві покриття характеризуються підвищеною зносостійкістю і демпфувальною здатністю¹⁰. Під час короткочасного потрапляння у зону дуги мікросфери зберігають сферичну форму, як це підтверджує фрагмент електронної мікрофотографії на рис. 3 (зроблено за допомогою рентгенівського мікроскопа-мікроаналізатора РЕМА-102-02).

Експериментальні дослідження з формування *електродугових покриттів* з суцільнотягнутих дротів Св-08Г2С, Св-08Г2, 65Г (хімічний склад наведено у табл. 1), *наповнених алюмосилікатними порожнистими мікросферами* показали доцільність їх подальшого використання в умовах тертя¹¹, підвищених температур і хімічно активних середовищ¹². Мікросфери, потрапляючи у зону електричної дуги, зберігають форму сферичною (фрагмент оптичної мікрофотографії, зробленої за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-И зі збільшенням у 500 разів, наведено на рис. 1), не

¹⁰ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Теоретичні передумови експлуатації конструкцій з метал-скляними захисними покриттями в умовах суднових вібрацій. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1. С. 175-185. DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.175-185

¹¹ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 3. С. 81-86. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/13>

¹² Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 38-44 DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-38-44

змінюють свого хімічного складу, не утворюють склофазы і не вступають у взаємодію з матеріалом сталевий матриці. Як і у випадку формування електродугових покриттів, наповнених скляними мікросферами, АСМП сконцентровані на їх поверхні і утворюють ефект підвищеної зносостійкості, який найбільш очевидний для покриттів композиції 65Г–АСМП 65Г¹³. Значення мікротвердості ($H\mu_{50} = 3,59$ ГПа) перевищує мікротвердість покриття з 65Г приблизно на 17%. Підвищена на 10 % пористість не вважається недоліком або дефектом, а є сприятливою для просоченням мастилом задля подальшої роботи в умовах тертя.

3. Фізико-хімічні процеси структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів

В основу пояснення фізико-хімічних процеси формування композиційних матеріалів і покриттів покладено:

- теоретичні і технологічні напрацювання науковців з дифузійного зварювання ситалів з металами¹⁴;
- фізико-хімічне обґрунтування процесу змочування скла краплями розплавленого металу задля отримання міцного паяного з'єднання¹⁵;
- структурно-хімічна теорія склування скляних розплавів, започаткована Р.Л. Мюллером¹⁶ і розвинута на протязі багатьох років науковцями з області створення спеціальних видів стеклол¹⁷ і досліджень їх функціональних властивостей¹⁸;
- основні положення механіки структурно-неоднорідних матеріалів¹⁹;

¹³ Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Перспективи застосування покриття з 65Г, наповненого алюмосилікатними мікросферами, у суднобудівних технологіях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2022, Том 33 (72), 6, С. 8-12. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/02>

¹⁴ Березін Л. Я., Ганєєв Т. Р. Особливості технології зварювання вузлів мідь–алюміній–ситал. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 7 (71). С. 158-163.

¹⁵ Красовський В. П., Габ І. І., Стецюк Т. В., Красовська Н.О. Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія розплавів і пайка металів*. 2017. Вип. 50. С. 18-27.

¹⁶ Stefan Reinsch. Oberflächenkeimbildung von Silikatgläsern der Stöchiometrie des Cordierits und des Diopsids. Berlin. 2001. 121 s.

¹⁷ Стронський О. В., Венгер Є. Ф., Олексенко П. Ф., Мельничук О. В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 236 с.

¹⁸ . Плем'яників М. М., Жданюк Н. В. Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. *Склоподібні матеріали і виробы. Функціональні матеріали*. [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 100 с.

¹⁹ Міленін С. О., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Повторак Н. І. Скінчено-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 14-19 DOI: <https://doi.org/10.37434/dnk2021.02.02>

– наукові уявлення про поверхневі явища у мікрогетерогенних і дисперсних системах²⁰.

В табл. 2 узагальнено проблемні питання формування певної структури матеріалів і покриттів, яку необхідно отримати протягом технологічного циклу задля формування необхідних експлуатаційних властивостей. Для їх вирішення автором розроблено технологічні рекомендації, які також наведені у таблиці.

Таблиця 2

Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів і технологічні рекомендації щодо їх вирішення

| Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів | Практичні рекомендації |
|--|--|
| Спінання без сполучників скляних мікросфер | |
| Утворення рідкої фази під час контактного прип'якання скляних частинок | Застосування технології гарячого пресування з прикладанням невеликого тиску ($P = 0,2 \dots 1,2$ МПа) до попередньо розігрітої формовки |
| Низький ступінь спікаємості скляних мікросфер | Контроль за усадочними процесами протягом всього технологічного циклу і остигання спеченого тіла разом з формою і піччю |
| Порушення мікросферами сферичної форми при перевищенні термодформаційних параметрів ($t \geq 650$ °C; $P \geq 1,2$ МПа) | Аналіз мікроструктури, ретельне контролювання термо-деформаційних і часових параметрів |
| Високий відсоток (до 25...30%) відкритої пористості у об'ємі спеченого матеріалу | Застосування віброутрушування навішання скляних мікросфер та застосування невеликих тисків гарячого пресування |
| Спінання скляних мікросфер з металами | |
| Різниця у значеннях коефіцієнтів термічного розширення (КТР) металу і скла | Зняття міжфазних напружень шляхом остигання спеченого тіла разом з формою і піччю |
| Окиснювальні процеси у металевих порошках | Реалізація процесу спікання у інертному середовищі або у контейнері, виготовленого з термічно необробленого графіту |
| Втрата скляними мікросферами сферичної форми при підвищенні температури | Застосування режимів поступового прогрівання порошкових сумішей, контроль за рівномірним розподілом температур у пресовці |
| Рівномірний розподіл рідкої фази | Застосування під час спікання невеликих тисків пресування, зокрема на температурних етапах проміжних витримок |

²⁰ Мчедов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Глазкова О.М., Лебідь О.В. Колоїдна хімія: підручник. 2- вид., випр. і доповн. Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 500 с.

Продовження таблиці 2

| Проблемні питання структуроутворення композиційних матеріалів і покриттів | Практичні рекомендації |
|--|---|
| Витікання металевої складової | Вибір металевих порошків з достатньо широким діапазоном плавлення |
| Додавання скляних мікросфер до складу електродугових покриттів | |
| Нерівномірний розподіл скляних мікросфер по об'єму покриття | Структурний дефект є невірним, проте не суттєво впливає на експлуатаційні властивості |
| Низький коефіцієнт заповнення об'єму покриття скляними мікросферами | Структурний дефект є невірним. Збільшення об'ємного вмісту мікросфер у складі покриттів знижує рентенозахисні властивості, проте підвищує міцність зчеплення з підкладкою |
| Додавання алюмосилікатних мікросфер до складу електродугових покриттів | |
| Нерівномірний розподіл алюмосилікатних мікросфер по поверхні покриття | Структурний дефект є невірним, проте не суттєво впливає на експлуатаційні властивості |
| Викришування алюмосилікатних мікросфер з металевої матриці через низьку когезійну міцність | Застосування додаткового дифузійного випалу або просочення пористої поверхні покриття легкоплавкими компонентами |

Джерело: складено автором

Результати теоретичних і експериментальних досліджень показали перспективи розвитку високотемпературних технологій для одержання нових конкурентоспроможних матеріалів покриттів, наповнених скляними і алюмосилікатними мікросферами. Проте на даний час проблемним питанням, яке потребує подальшої розробки, є енергоефективність обладнання, необхідність його удосконалення і модернізації.

ВИСНОВКИ

Порожнисті скляні і алюмосилікатні мікросфери є перспективною вихідною сировиною для створення поліфункціональних композиційних матеріалів, які одночасно поєднують у собі теплоізоляційні, антифрикційні, міцнісні та інші властивості, які регулюються пакуванням або раціональним розподіленням мікросфер по об'єму та поверхні композитів.

Конкурентоспроможними технологіями отримання композиційних матеріалів і покриттів за участю скляних і керамічних мікросфер є різновиди спікання та газотермічного наплення по сталевій поверхні.

Експериментально отримано і досліджено спробні зразки, які складаються зі спечених без сполучника скляних мікросфер; спечених скляних мікросфер з порошком (пудрою) алюмінію; електродугових

покриттів, наповнених скляними мікросферами та електродугових покриттів, наповнених керамічними мікросферами.

Визначено зв'язок між структурними особливостями отриманих матеріалів, геометричним пакуванням мікросфер у їх складі та функціональним призначенням.

Проаналізовано проблемні питання структуроутворення розроблених матеріалів і покриттів та запропоновано практичні рекомендації щодо їх вирішення.

Науково-практичне значення одержаних результатів полягатиме у створенні науково-технічних передумов для отримання нових конкурентоспроможних композиційних матеріалів і покриттів з порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер, використовуючи для цього високотемпературні технології.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням технологічних можливостей створення функціональних матеріалів для суднобудування і об'єктів морської інфраструктури.

АНОТАЦІЯ

Сучасний ринок хімічної промисловості створює велике різноманіття неорганічних мікросфер, за участю яких виготовляються легковажні композиційні матеріали і покриття для суднобудування і морської техніки, авіабудування, галузей енергетики тощо. Їх властивості залежать не тільки від складу компонентів, а й від характеру розподілення мікросфер по об'єму та поверхні матеріалу, а також щільності їх пакування у композиціях. На відміну від відомих технологій, де порожнисті скляні або алюмосилікатні мікросфери з'єднуються з полімерними або в'язучими речовинами, впровадження високотемпературних технологій дає змогу поєднувати їх з металами, створюючи матеріали з новими властивостями. Спінанням скляних мікросфер без сполучників можна одержувати легковажні композиційні матеріали, які складаються виключно з одних мікросфер і поєднують у собі теплоізоляційну здатність і гідростатичну міцність, що зумовлює їх застосування для виготовлення підводних технічних засобів і плавучих об'єктів. З'єднанням спінанням скляних мікросфер з порошком або пудрою алюмінію і додавання їх до складу алюмінієвих і сталевих електродугових покриттів дає змогу формувати радіаційно захисні композиції з підвищеними рентгенозахисними властивостями, які знайшли своє застосування для виготовлення елементів суден для радіоактивних вантажів. Наповнення сталевих покриттів порожнистими скляними і алюмосилікатними мікросферами надає їм демпфувальних властивостей, зносостійкості, термо- і корозійної стійкості, що є дуже важливим

для сучасного машинобудування. Проаналізовано проблемні питання структуроутворення розроблених матеріалів і покриттів та запропоновано практичні рекомендації щодо їх вирішення. Науково-практичне значення одержаних результатів полягатиме у створенні науково-технічних передумов для отримання нових конкурентоспроможних композиційних матеріалів і покриттів з порожнистих скляних і алюмосилікатних мікросфер, використовуючи для цього високотемпературні технології. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням технологічних можливостей створення функціональних матеріалів для суднобудування і об'єктів морської інфраструктури.

Література

1. Півоваров О. А., Павленко А. А. Інноваційне застосування алюмосилікатних мікросфер (ценосфер) як ефективного наповнювача в композиційні матеріали. *Наука, технології, інновації*. 2023. № 2. С.48-56. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-06>
2. Плахотніков К. В., Деденьова О. Б., Бодаренко О. І. Адсорбційні властивості алюмосилікатних мікросфер у цементному композиті. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 92. № 2 С. 219-225. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-219-225
3. Саєнко Н. В., Биков О. О., Попов Ю. В., Демідов Д. В. Оцінка можливості застосування водно-дисперсних покриттів в якості декоративно-захисної обробки фасадів будівель. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture: Building materials and techniques*. 2020. № 79. Рр. 126-134 DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-126-134
4. Сімбіркіна А. М., Хандецький В. С., Сverdліковська О. С., Черваков О. В. Безконтактні вимірювання провідності прототипів зовнішніх теплозахисних покриттів на основі металізованих скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2020. № 5. С. 81-87. DOI: 10.32434/0321-4095-2020-132-5-81-87
5. Гусакова К. Г., Трачевський В. В., Шульженко Д. М., Гранде Д., Файнлейб О. М. Синтактні піни як композиційні матеріали для високотехнологічних галузей промисловості. *Полімерний журнал*. 2023. 45, № 3. С. 181-194 DOI: <https://doi.org/10.15407/polymerj.45.0>
6. Казимиренко Ю. О., Гайдаєнко О. В. Комп'ютерне моделювання розподілу температур спікання скляних мікросфер. *Питання хімії та хімічної технології (Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii)*. 2024. № 3. С. 67-74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-67-74
7. Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining

materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. 3 (119). Vol. 30. Pp. 174-180. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0050>

8. Казимиренко Ю. О. Перспективи застосування металоскляних покриттів з підвищеними рентгенозахисними властивостями для конструкцій технічних засобів перевезення радіоактивних речовин. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. № 8. С. 134–140.

9. Kazymyrenko Y. Patterns and Mechanisms of interaction of Radioactive Cargo Radiation with Metal-Glass Layer of Watercrafts Structure. *The advanced science journal*. 2014. Iss. 12. P. 45–48. URL: https://www.researchgate.net/publication/287570622_Patterns_and_Mechanisms_of_Interaction_of_Radioactive_Cargo_Radiation_with_Metal-Glass_Layer_of_Watercrafts_Structure

10. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Теоретичні передумови експлуатації конструкцій з метал-скляними захисними покриттями в умовах суднових вібрацій. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1. С. 175-185. DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.175-185

11. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72). № 3. С. 81-86. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/13>

12. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 38-44 DOI: 10.25140/2411-5363-2022-1(27)-38-44

13. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Макруха Т. О. Перспективи застосування покриття з 65Г, наповненого алюмосилікатними мікросферами, у суднобудівних технологіях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2022, Том 33 (72), 6, С. 8-12. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/02>

14. Березін Л. Я., Ганєєв Т. Р. Особливості технології зварювання вузлів мідь–алюміній–ситал. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 7 (71). С. 158-163. URL:<http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/7416>

15. Красовський В. П., Габ І. І., Стецюк Т. В., Красовська Н.О. Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія розплавів і пайка металів*. 2017. Вип. 50. С. 18-27. URL:<https://nasplib.isofts.kiev.ua/items/4ba050b1-286a-48a9-83cf-e195cb292ae5>

16. Stefan Reinsch. Oberflächenkeimbildung von Silikatgläsern der Stöchiometrie des Cordierits und des Diopsids. Berlin. 2001. 121 s. URL:https://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/reinsch_stefan.pdf

17. Стронський О. В., Венгер Є. Ф., Олексенко П. Ф., Мельничук О. В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 236 с. URL: <https://www.researchgate.net/profile>

18. Племянніков М. М., Жданюк Н. В. Нові склоподібні матеріали і методи їх синтезу. *Склоподібні матеріали і виробу. Функціональні матеріали*. [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 100 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/51ff9424-a1ec-45b8-a8c0-b502aa75eb8d/content>

19. Міленін С. О., Великоіваненко О. А., Розинка Г. П., Повторак Н. І. Скінчено-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 14-19 DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>

20. Мчедов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Глазкова О.М., Лебідь О.В. Колоїдна хімія: підручник: 2- вид., випр. і доповн. Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 500 с. URL: <https://chemistry.karazin.ua>

Information about the author:

Kazymyrenko Yuliia Oleksiivna,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Materials Science and Technology of Metals,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
9, Heroiv Ukrainy ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine

CREATION AND TESTING OF AUXILIARY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR SOLVING CURRENT PROBLEMS OF LASER WELDING OF THIN-WALLED PRODUCTS MADE OF STAINLESS STEELS

Yurchenko Yu. V.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-6>

INTRODUCTION

The use of sheet metal allows reducing the weight and dimensions of welded structures, as well as decreasing their cost. At the current stage of welding technology development, much attention is paid to welding metals with a wall thickness of less than 2 mm in various structures¹. Thin sheet metal is traditionally used in industries such as aviation, chemical, food, etc. In aviation, these are pipelines, turbine elements, fuselages, etc.^{2,3}. Every year, hundreds of aircraft are manufactured worldwide, with kilometers of welded joints in their construction. In the chemical industry, these are pipelines, reservoirs, tanks, and vats. These products usually have a significant length of welded joints and increased requirements for their quality. In light industry, particularly in the food industry, most metal products are thin-walled: refrigeration units, pipelines, vessels, tanks, containers for sugar and dairy plants^{4,5}. Thin-

¹ Altenbach H., Eremeyev V. Thin-walled structural elements: Classification, classical and advanced theories, new applications. shell-like structures / ed. by H. Altenbach, V. Eremeyev. Cham: Springer International Publishing, 2017. URL:https://doi.org/10.1007/978-3-319-42277-0_1 (date of access: 17.01.2026)

² Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Bernatsky A.V., Siora, A.V. Laser welding of thin-wall filter elements of steel 08Kh18N10T. *The Paton Welding Journal*, 2017. Vol. 4. P. 49-52. URL: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.10> (date of access: 17.01.2026).

³ Kuczek T. Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures. *Engineering Optimization*. 2015. Vol. 48, no. 2. P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2015.1017350> (date of access: 17.01.2026).

⁴ McNair S. a. M., Chaharsooghi A. S., Carnevale M., Rhead A., Onnela A., Daguin J., Cichy K., et al. Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 118, no. 3–4. P. 667–681. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8> (date of access: 17.01.2026).

⁵ Wang K., Li L. Structural analysis and optimal design of a spherical thin-walled stainless steel water tank without reinforced tie ribs. *Journal of Vibroengineering*. 2024. Vol. 20, no. 4. P. 983-1000. URL: <https://doi.org/10.21595/jve.2024.23812> (date of access: 17.01.2026).

sheet structures are also actively used in automotive engineering, household appliances, construction, medicine, etc. Among the materials most commonly used in these industries, austenitic stainless steels are the most widespread. They account for about two-thirds of global production of stainless steels⁶. Their structure remains austenitic across the entire temperature range – from cryogenic to melting temperatures – due to alloying with nickel, as well as nitrogen and manganese. Austenitic steels are not susceptible to heat hardening, but can be strengthened by cold deformation. They have excellent formability and weldability, are non-magnetic, and retain their ductility at very low temperatures^{7,8}. The most common is the 300 series – chromium-nickel alloys, where the austenitic structure is achieved mainly by adding nickel. The most widespread steels of the austenitic class are AISI 304, AISI 316, and AISI 321. The chemical composition of these steels according to ASTM A480/A480M-22a is given in Table 1.

Table 1

Chemical composition of steels, % by wt.⁹

| Grade | C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | Ti | Mo | Fe |
|----------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|------|-------|---------|------|
| AISI 304 | ≤0,08 | ≤0,8 | ≤2 | 9 –11 | ≤0,02 | ≤0,035 | 17–19 | ≤0,3 | – | – | Bal. |
| AISI 316 | ≤0,03 | ≤0,4 | ≤1–2 | 13–15 | ≤0,02 | ≤0,035 | 16–18 | – | – | 2,5–3,1 | Bal. |
| AISI 321 | ≤0,12 | ≤0,8 | ≤2 | 9 –11 | ≤0,02 | ≤0,035 | 17–19 | ≤0,3 | 0,4–1 | – | Bal. |

Stainless steels AISI 304, AISI 316, and AISI 321 are widely used in industry due to their corrosion resistance and high mechanical properties. AISI 304 is the most common grade used in the food industry, household appliances, architecture, and mechanical engineering. AISI 316 contains molybdenum, which increases its resistance to aggressive environments, particularly those containing chlorine, making it the grade of choice for marine, chemical, and medical applications. AISI 321 is alloyed with titanium and is characterized by high heat resistance and resistance to intergranular

⁶ Michler T. Austenitic stainless steels. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016. Vol. 1, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.02509-1> (date of access: 17.01.2026).

⁷ Ibrahim O., Ibrahim I., Khalifa T. Impact behavior of different stainless steel weldments at low temperatures. *Engineering Failure Analysis*. 2010. Vol. 17, no. 5. P. 1069–1076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.12.006> (date of access: 17.01.2026).

⁸ Lv X., Chen S., Wang Q., Jiang H., Rong L. Temperature dependence of fracture behavior and mechanical properties of AISI 316 austenitic stainless steel. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 9. 1421. <https://doi.org/10.3390/met12091421> (date of access: 17.01.2026).

⁹ ASTM A480/A480M-22a. Standard specification for general requirements for flat-rolled stainless and heat-resisting steel plate, sheet, and strip. Effective from 2023-06-02. Official edition. URL: https://store.astm.org/a0480_a0480m-22a.html (date of access: 17.01.2026).

corrosion, which makes it applicable for use in high-temperature equipment, aviation, and other industries where high operating temperatures are present^{10, 11, 12}.

Given the properties mentioned above, austenitic steels are most often used for the manufacture of thin-walled structures. To join them, welding processes must be used that ensure minimal heat impact and high-quality welded joints. The main types of welded joints for thin-sheet products are butt joints for flat products and girth joints for cylindrical products.

1. Analysis of the disadvantages of common methods for welding thin-walled products

Today, the most common methods of welding thin-walled products in the world are plasma, electron beam, TIG welding, and MIG welding^{13, 14, 15}.

Despite the variety of welding processes, the methods described above have their disadvantages. Plasma welding involves high costs for welding equipment and consumables. This can significantly increase the cost of implementing the technology. In addition, achieving the required weld quality requires high precision in joining the welded edges, which complicates the process, especially when it comes to processing thin or long parts¹⁶.

Although electron beam welding is effective, it is not without its disadvantages. The welding equipment for this technology is complex and expensive, making it less accessible for widespread use. In addition, vacuum chambers are required for welding, which limits the ability to process large or

¹⁰ Michler T. Austenitic stainless steels. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016. Vol. 1, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.02509-1> (date of access: 17.01.2026).

¹¹ Ibrahim O., Ibrahim I., Khalifa T. Impact behavior of different stainless steel weldments at low temperatures. *Engineering Failure Analysis*. 2010. Vol. 17, no. 5. P. 1069–1076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.12.006> (date of access: 17.01.2026).

¹² Lv X., Chen S., Wang Q., Jiang H., Rong L. Temperature dependence of fracture behavior and mechanical properties of AISI 316 austenitic stainless steel. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 9. 1421. <https://doi.org/10.3390/met12091421> (date of access: 17.01.2026).

¹³ Kumar K., Kumar C. S., Masanta M., Pradhan S. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry. *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 50. P. 999–1004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.308> (date of access: 17.01.2026).

¹⁴ Advancing implantable medical device reliability with enhanced laser joining technology. *Home – Medical Design Briefs*. URL: <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/52177-advancing-implantable-medical-device-reliability-with-enhanced-laser-joining-technology> (date of access: 17.01.2026).

¹⁵ Sabdin S. D., Hussein N. I. S., Sued M. K., Ayof M. N. Joining of thin plates using various arc welding heat sources—A Review. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 357-370. URL: <https://jamt.utem.edu.my/jamt/article/view/4005> (date of access: 17.01.2026).

¹⁶ Khoshnaw F. *Welding of metallic materials methods, metallurgy, and performance*. Elsevier, 2023. 608 p. URL: <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03713-8> (date of access: 17.01.2026).

heavy products. Since electron beam welding is performed in closed vacuum chambers, complex guidance systems are required for accurate positioning of the electron beam and finding the welding location. The process itself is also accompanied by X-ray radiation, which requires special protective measures for personnel¹⁷.

TIG welding also has its drawbacks. In particular, excessive welding current can cause the tungsten electrode to melt, affecting the quality of the weld by forming brittle tungsten in the weld pool. In addition, this welding process has a low speed, which limits its productivity when welding large-sized products.¹⁸

Among the main disadvantages of MIG welding is a less stable welding arc, which can lead to an uneven welding process. Another problem is feedback from the welding wire, which can sometimes be uneven, making it difficult to control the welding process. In addition, there may be problems with wire burnout and increased sparking, which can lead to a fire hazard. Welding also produces a large amount of smoke and harmful fumes, requiring the use of appropriate ventilation and personnel protection measures¹⁹.

2. Analysis of the growth and spread of laser tech for welding thin-walled products

Along with the above-mentioned methods of welding thin-walled structures, laser welding is becoming increasingly popular and widely used. Over the past 10 years, laser technologies have developed rapidly, reducing the cost of kilowatt power of laser radiation by approximately 10 times, which has made laser welding even more competitive compared to traditional types of welding²⁰. This is confirmed by data from various consulting agencies, which indicate that the global market for laser welding

¹⁷ Kumar K., Kumar C. S., Masanta M., Pradhan S. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry. *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 50. P. 999–1004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.308> (date of access: 17.01.2026).

¹⁸ Manh N. H., Van Anh N., Van Tuan N., Xu B., Akihisa M. Research and development of a novel TIG welding torch for joining thin sheets. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 23. 5260. URL: <https://doi.org/10.3390/app9235260> (date of access: 17.01.2026).

¹⁹ Lv X., Chen S., Wang Q., Jiang H., Rong L. Temperature dependence of fracture behavior and mechanical properties of AISI 316 austenitic stainless steel. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 9. 1421. <https://doi.org/10.3390/met12091421> (date of access: 17.01.2026).

²⁰ Yurchenko, Yu. V., et al. Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International Journal of Science Engineering and Technology*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue5.289> (date of access: 17.01.2026).

equipment in 2022-2023 amounted to \$2.5-2.9 billion^{21,22,23}. This market is expected to reach approximately \$4 billion by 2032, with a compound annual growth rate (CAGR) of 5.5% during the forecast period²⁴. The rapid evolution of laser technologies is also confirmed by a significant increase in the number of scientific publications related to laser processing, particularly laser welding.

To assess the spread of lasers in welding technologies, a bibliometric analysis of the Scopus and Google Scholar databases was conducted. The analysis consisted of determining the number of publications covering laser welding processes published between 2014 and 2024. The search was conducted using keywords in two categories: “Laser welding processes” and “Prevalence of laser use.” According to the results of the analysis, works devoted to laser welding account for approximately 12% of publications on Google Scholar (90,000) and 17% of publications in the Scopus database (88,850) related to welding materials. At the same time, 51% (340,600 works) of the peer-reviewed publications in Scopus focus on materials processing in industry (Materials Science and Engineering). 24% (160,190 works) are devoted to the use of laser technologies in medicine and biotechnology, and chemical sciences rank third with 16% (108,970 works). This indicates that over the last decade, laser welding processes have become an important and relevant area of scientific research²⁵.

The main advantages of laser welding are: no need for complex vacuum chambers, highly localized thermal effect, small size of the heat-affected zone, and minimal residual deformation. Fig. 1 shows a comparative diagram of heat-affected zones for different welding methods. It shows that laser welding has one of the smallest heat-affected zones, making this process one of the most optimal for welding thin-walled structures.

²¹ Bala Y., Rajendran D. K. Global welding market growth. *Automation in Welding Industry: Incorporating Artificial Intelligence, Machine Learning and Other Technologies*. 2024. P. 229–243. URL: <https://doi.org/10.1002/9781394172948.ch13> (date of access: 17.01.2026).

²² Buang A. S., Bakar M. S. A., Rohani M. Z. A review of trend advanced welding process and welding technology in industries. *International Journal of Technical Vocational and Engineering Technology*. 2024. Vol. 5, no. 1. P. 133-145. URL: <https://journal.pktm.com.my/index.php/ijtv/article/download/103/72> (date of access: 17.01.2026).

²³ Rahadian N. Advancements in welding technology: A comprehensive review of techniques, materials, and applications. *Journal PEP Bandung*. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 62-110. <https://ejournal.pepbandung.ac.id/index.php/gm/article/view/12> (date of access: 17.01.2026).

²⁴ Manh N. H., Van Anh N., Van Tuan N., Xu B., Akihisa M. Research and development of a novel TIG welding torch for joining thin sheets. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no, 23. 5260. URL: <https://doi.org/10.3390/app9235260> (date of access: 17.01.2026).

²⁵ Yurchenko, Yu. V., et al. Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International Journal of Science Engineering and Technology*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue5.289> (date of access: 17.01.2026).

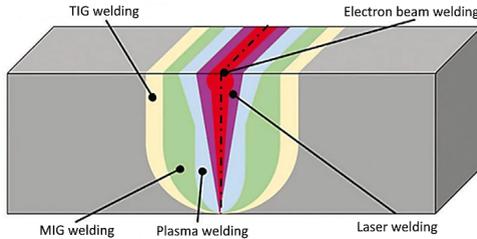


Fig. 1. Heat-affected zone for different welding technologies²⁶

Despite the rapid growth of laser welding as a highly productive technology with deep penetration, minimal deformation, and high process speed, a number of technical challenges and problems remain relevant and still don't have a final solution. These include the formation of craters at the beginning and end of the welded joint, ensuring reliable gas protection, effective heat removal, control of welding stresses and deformations, as well as reliable clamping of the welded edges of thin-sheet parts.

3. Analysis of the main problems of laser welding of thin-walled products

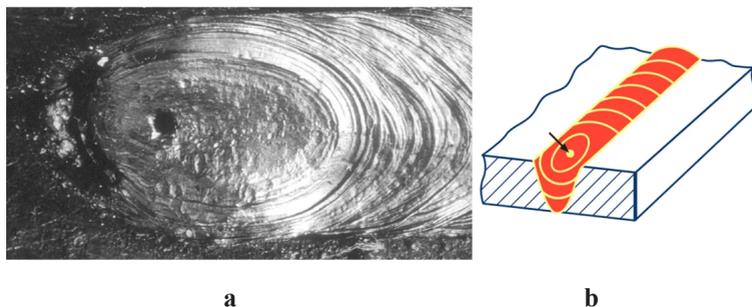
3.1. Crater formation in a welded joint

The formation of craters at the end of a welded joint during laser welding remains one of the pressing issues in the manufacture of ring welded joints in thin-walled products. According to EN ISO 6520-1:2007²⁷, a crater is a cavity that forms at the end of a welded joint under the effect of electric arc pressure and/or gas jet and volumetric shrinkage of metal during its crystallization. In international terminology, this defect is referred to as a «crater» and is shown in Figure 2. The problem of crater formation at the end of a welded joint has been known for a long time, but with the development of welding technologies, thin-walled or closed joints, where it is impossible to use traditional lead-out strips, it is becoming increasingly relevant²⁸.

²⁶ Advancing implantable medical device reliability with enhanced laser joining technology. *Home – Medical Design Briefs*. URL: <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/52177-advancing-implantable-medical-device-reliability-with-enhanced-laser-joining-technology> (date of access: 17.01.2026).

²⁷ EN ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. Effective from 2014-02-15 URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/vigotovlennya-mk-mizhnarodna-gilka-standarty/78-dstu-iso-5817-2016-zvaryuvannya.pdf> (date of access: 17.01.2026).

²⁸ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).



**Fig. 2. Crater at the end of a welded joint during laser welding:
a) top view, b) scheme of the crater of a welded joint²⁹**

Despite its apparent simplicity, the crater zone is highly complex in terms of thermodynamics, hydrodynamics, metallurgy, and stress-strain state. This is where hot cracks, pores, shrinkage cavities, and microinclusions most often occur, which impair the mechanical properties of the joint, reduce its tightness, and, under unfavorable conditions, can lead to premature failure of the welded joint under load (Fig. 3)³⁰.

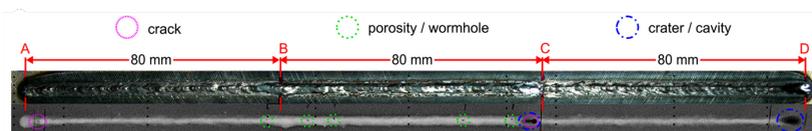


Fig. 3. Defects in welded joints³¹

Controlling the completion of the welding process is particularly challenging. While most technological solutions are aimed at ensuring a stable weld pool in steady state, the completion zone is inherently unstable: after the heat source is turned off, the character of heat flows, temperature distribution, and crystallization rate change, leading to a local loss of balance between phase and hydrodynamic

²⁹ EN ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. Effective from 2014-02-15 URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/vigotovlennyya-mk-mizhnarodna-gilka-standarty/78-dstu-iso-5817-2016-zvaryuvannya.pdf> (date of access: 17.01.2026).

³⁰ Jian G. A. O., Xiaojiao S. O. N. G., Lihua P. A. N., Ling X. I. A., Jie X. U. Study on the quality control of arc crater in laser welding girth weld. *Electric Welding Machine*. 2022. Vol. 52, no.5. P. 112-116. URL: <http://doi.org/10.7512/j.issn.1001-2303.2022.05.16> (date of access: 17.01.2026).

³¹ Lai W. J., Ganguly S., Suder W. Study of the effect of inter-pass temperature on weld overlap start-stop defects and mitigation by application of laser defocusing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 117–130. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06851-8> (date of access: 17.01.2026).

processes. As a result, the crater becomes a concentrator of residual stresses and a source of crack initiation. In addition to cold cracks, there is also the problem of hot cracks forming during laser welding of austenitic stainless steels³². The main reason for their occurrence is the presence in the microstructure of the welded joint of residual molten films with a reduced melting point, which are formed as a result of micro-segregation of low-melting elements such as sulfur, phosphorus, copper, silicon, or the formation of eutectics based on Ni_3S_2 , Fe_3P , etc. These films remain in a liquid state even at temperatures significantly lower than the equilibrium solidus temperature of the base material, making them particularly sensitive to mechanical and thermal loads³³. Under the action of shrinkage stresses arising during cooling or as a result of a rapid change in heat flows in the area of the welded joint, these films lose their integrity, forming hot cracks.

Avoiding crater formation at the beginning and end of a welded joint is an important condition for ensuring high quality and tightness of welded joints, especially during laser welding. One of the key approaches to minimizing craters in laser welding is to adjust the heat balance at the beginning and end of the welded joint.

The most common and effective strategy for avoiding crater formation is to reduce the laser power at the end of the weld (ramp-down). The method of reducing the power of laser radiation at the end of the welded joint allows the temperature in the weld pool to be lowered, promoting uniform crystallization. By reducing temperature gradients and cooling rates, shrinkage stresses are reduced, susceptibility to hot cracks is reduced, and the risk of shrinkage cavities forming in the crater is minimized³⁴.

In their study, Kenda et al.³⁵ used three variants of laser radiation power reduction (RD) profiles (Fig. 4). Profile P_1 – classic regime with a linear power reduction of -1.5 W/ms for transition from deep penetration to heat conduction regime. Profile P_2 is a new approach with a zigzag decline: initially to 73% of

³² Ramon J., Basu R., Voort G. V., Bolar G. A comprehensive study on solidification (hot) cracking in austenitic stainless steel welds from a microstructural approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 194. 104560. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104560> (date of access: 17.01.2026).

³³ Zhang P., Jia Z., Yu Z., Shi H., Li S., Wu D., Tian Y. A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys. *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 140. 107094. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107094> (date of access: 17.01.2026).

³⁴ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

³⁵ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

power, then 53 Hz modulation with a slope of -0.15 W/ms. Profile P_3 is similar to P_2 , but with a frequency of 106 Hz and a slope of -0.25 W/ms.

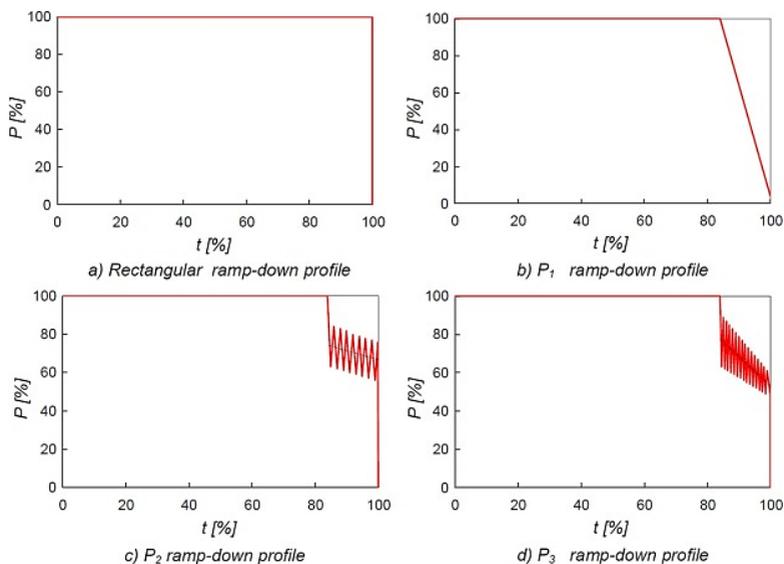


Fig. 4. Laser power reduction profiles: a) rectangular, b) P_1 , c) P_2 , d) P_3 ³⁶

Fig. 5 shows a top view of three typical welded joint finishes made according to RD profiles P_1 , P_2 , P_3 . When welding with profile P_1 , the surface of the welded joint is smooth but has several long axial cracks, which usually occur under such conditions (Fig. 5a). These cracks begin when the power is reduced, and in a certain area of the welded joint, they exist in parallel across the width. The surface of the welded joint when using zigzag profiles P_2 and P_3 (Fig. 5b and 5c) has an arc-shaped structure, i.e., it contains pronounced crystallization zones. The number of such zones corresponds to the number of power modulation cycles embedded in the corresponding RD profile. The images in Fig. 5b and 5c also show that only short surface cracks are formed when zigzag profiles are used. This is because the powerful modulation of the laser beam forms crystallization zones that act as barriers to crack propagation³⁷.

³⁶ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

³⁷ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

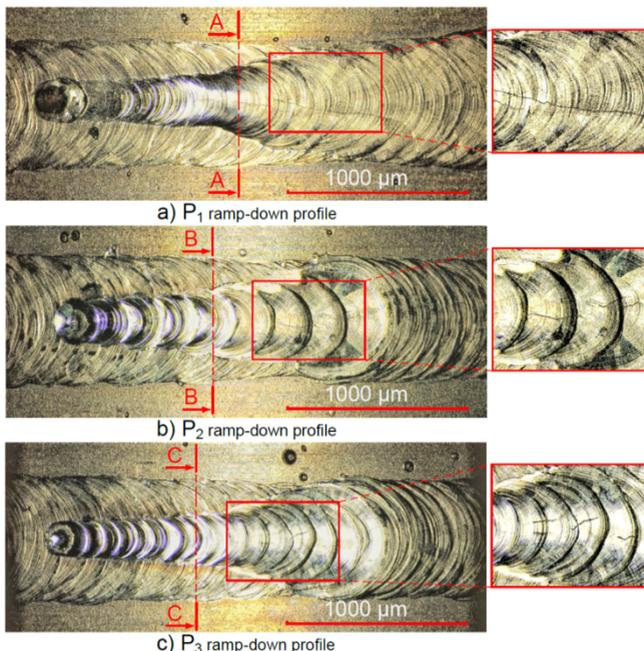


Fig. 5. Comparison of crack morphology on the surface of a welded joint at different laser power reduction profiles: a) P_1 ; b) P_2 ; c) P_3 ³⁸

There are several other methods for avoiding crater formation, including defocusing the laser beam, welding with overlap, and using a “smoothing” weld³⁹. The disadvantage of the laser defocusing method is the need to use complicated optical systems in welding heads that ensure controlled change of the focal length. This complicates the design of the equipment, increases its cost and maintenance requirements. The “smoothing” weld method requires an additional pass, which also increases processing time and additional internal stresses due to repeated thermal influence.

Based on the results of a review of scientific works devoted to the study of crater formation at the end of a welded joint, the following conclusion can be drawn. Despite the existence of a certain number of scientific works in this

³⁸ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

³⁹ Gook S., Üstündag Ö., Gumenyuk A., Rethmeier M. Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00841-x> (date of access: 17.01.2026).

area, the topic of crater formation during laser welding of thin-walled welded joints made of stainless steel remains unexplored. Therefore, further research in this area remains relevant.

3.2. Protection of the welding zone to ensure high quality welded joints

The topic of gas protection during welding with concentrated energy sources is relevant because most methods involve welding in the open air without the use of vacuum chambers. Gas protection plays a key role in such cases. Due to the high temperature and localized action of the heat source, even a small amount of air entering the welding zone can lead to the formation of oxide films, pores, cracks, and other defects. This degrades the metal structure and reduces the strength and durability of welded joints^{40, 41, 42, 43}. One of the main factors that reduce the effectiveness of gas protection during welding is flow turbulence. When transitioning from laminar to turbulent flow, the protective gas mixes intensively with the surrounding air, causing the oxygen concentration in the welding zone to rise rapidly (Fig. 7)^{44, 45}. As a result of pulse exchange at the transition layer with the environment or with the wall (i.e., metal surface), the velocity profile undergoes asymmetric changes with increasing propagation length⁴⁶.

Therefore, analysis of surface and free jets allows to evaluate the efficiency of protective gas delivery through flat or tubular nozzles⁴⁷.

⁴⁰ Mahajanam S., Heidersbach K. Corrosion studies of heat-tinted austenitic stainless steel. *Materials Performance*. 2021. Vol. 60, no. 5. P. 42–47. URL:https://doi.org/10.5006/mp2021_60_5-42 (date of access: 17.01.2026).

⁴¹ Kearns J. R. The corrosion of heat tinted austenitic stainless alloys. *Corrosion*. 1985. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.5006/c1985-85050> (date of access: 17.01.2026).

⁴² Zhang Z., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L., Zhou C. Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 404. P. 110–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.252> (date of access: 17.01.2026).

⁴³ Hinds G., Wickström L., Turnbull A. Influence of weld preparation procedure and heat tinting on sulfide stress corrosion cracking of duplex stainless steel. *Corrosion*. 2015. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.5006/c2015-06084> (date of access: 17.01.2026).

⁴⁴ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).

⁴⁵ Chen K., Hu Z. H., Huang R., Li M. X., Xiao R. S. Outflow Forms of Shielding Gas in Laser Welding by Schlieren. *Journal of Beijing University of Technology*. 2007. Vol. 33, no. 12. P. 1340–1344. URL: <https://journal.bjut.edu.cn/bjgydxxb/en/article/pdf/preview/10.3969/j.issn.0254-0037.2007.12.020.pdf> (date of access: 17.01.2026).

⁴⁶ Zou J., Xie S., Kong H., Liu T., Fang C., Wu Q. Active control effect of shielding gas flow on high-power fiber laser welding plume. *Journal of Laser Applications*. 2024. Vol. 36, no. 3. P. 032011. URL: <https://doi.org/10.2351/7.0001407> (date of access: 17.01.2026).

⁴⁷ Tani G., Ascari A., Campana G., Fortunato A. A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys. *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254, no. 4. P. 904–907. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.067> (date of access: 17.01.2026).

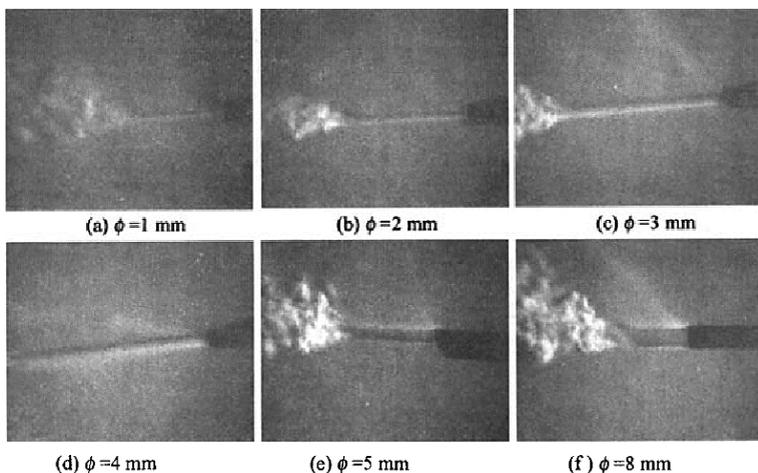


Fig. 6. Characteristics of helium flow depending on nozzle diameter, visualized using schlieren imaging⁴⁸

Near-surface jets demonstrate a significantly longer laminar flow section and less turbulence at the same Reynolds number⁴⁹, which indicates the advantage of flat nozzles over other shapes. Depending on the Re value, either stable (Re = 330) or unstable (Re = 370...750) near-surface jets are formed, with higher flow velocities slowing down earlier and being more dependent on external disturbances. The flow rate of the protective gas is one of the most thoroughly studied parameters due to the ease of its regulation. Blackburn et al.⁵⁰ found that reducing the flow velocity improves the visual appearance of the weld, as excessive velocity causes turbulence in the gas flow.

Vyskoč⁵¹ investigated the effect of flow velocity on the shape of a weld and found that increasing it reduces the energy absorbed by the plasma

⁴⁸ Chen K., Hu Z. H., Huang R., Li M. X., Xiao R. S. Outflow Forms of Shielding Gas in Laser Welding by Schlieren. *Journal of Beijing University of Technology*. 2007. Vol. 33, no. 12. P. 1340-1344. URL: <https://journal.bjtu.edu.cn/bjgydxxb/en/article/pdf/preview/10.3969/j.issn.0254-0037.2007.12.020.pdf>.(date of access: 17.01.2026).

⁴⁹ Wang S., Zhou Y., Alam M. M., Yang H. Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26, no. 11. 115107. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4901969>.(date of access: 17.01.2026).

⁵⁰ Blackburn J., Allen C., Hilton P., Li L. Nd:YAG laser welding of titanium alloys using a directed gas jet. *Journal of Laser Applications*. 2010. Vol. 22, no. 2. P. 71–78. URL: <https://doi.org/10.2351/1.3455825>.(date of access: 17.01.2026).

⁵¹ Vyskoč M., Sahul M., Dománková M., Jurčí P., Sahul M., Vyskočová M., Martinkovič M. The effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of AW5083 aluminum laser weld joints. *Metals*. 2020. Vol. 10, no. 11. 1443. URL: <https://doi.org/10.3390/met10111443>.(date of access: 17.01.2026).

torch and at the same time increases the width of the weld. The paper analyzed the relationship between the distance of the shielding gas supply and the porosity of the weld. The optimal supply distance stabilized the vapor-gas channel and reduced porosity. In addition to gas consumption, the researchers also focused on the position of the gas shielding nozzle⁵². Campana et al.⁵³ concluded that for effective protection, the gas should be supplied at a perpendicular to the workpiece surface, and the nozzle height should be minimized to ensure reliable protection of the vapor-gas channel and the high-temperature welding zone. Grevey et al. investigated the effect of the nozzle angle and found that as the angle decreases, the size of the gas protection zone increases⁵⁴.

The most characteristic manifestation of insufficient gas protection of the welding zone is the formation of oxide films on the metal surface, known as heat tint. On stainless steels, such oxide films form at temperatures above 300°C. Their thickness depends on the temperature regime, the duration of heating, and the oxygen content in the weld zone (Fig. 7). Areas with oxide films are characterized by lower corrosion resistance compared to the base metal, which can lead to the formation of local corrosion^{55,56}.

The color of oxide films formed during welding varies from light straw to dark blue depending on the temperature. This is due to the formation of oxide films, which are predominantly composed of chromium and iron. During oxidation, alloying elements, in particular chromium, can diffuse to the surface because they oxidize more easily than iron⁵⁷.

⁵² Hamadou M., Fabbro R., Caillibotte G., Chouf K., Briand F. Study of assist gas flow behavior during laser welding. *ICALEO 2002: 21st International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. October 14–17, 2002 Scottsdale, Arizona, USA. URL: <https://doi.org/10.2351/1.5066140> (date of access: 17.01.2026).

⁵³ Campana G., Ascari A., Fortunato A., Tani G. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases. *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255, no. 10. P. 5588–5590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.169> (date of access: 17.01.2026).

⁵⁴ Grevey D., Sallamand P., Cicala E., Ignat S. Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2004. Vol. 37, no.8. P. 647–651. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.08.015> (date of access: 17.01.2026).

⁵⁵ Kearns J. R. The corrosion of heat tinted austenitic stainless alloys. *Corrosion*. 1985. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.5006/c1985-85050> (date of access: 17.01.2026).

⁵⁶ Elshawesh F., Elhoud A. Role of heat tint on pitting corrosion of 304 austenitic stainless steel in chloride environment (No. INIS-FR--3844). Societe de Chimie Industrielle (SCI), 28 Rue Saint Dominique, F-75007 Paris (France). 2004. URL: <https://inis.iaea.org/records/0167-4rr25> (date of access: 17.01.2026).

⁵⁷ Mahajanam S., Heidersbach K. Corrosion studies of heat-tinted austenitic stainless steel. *Materials Performance*. 2021. Vol. 60, no. 5. P. 42–47. URL: https://doi.org/10.5006/mp2021_60_5-42 (date of access: 17.01.2026).

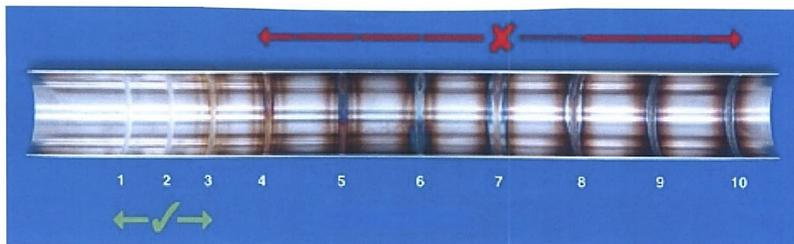


Fig. 7. Colors of oxide films on the surface of stainless steel⁸

As a result, an area with reduced chromium content forms under the film, which negatively affects the corrosion resistance of this area compared to the rest of the steel volume⁵⁹. The rate of oxidation and the level of depletion of alloying elements in the area under the film are determined not by the overall chemical composition of the steel, but by the properties of the oxide film itself, in particular its ability to diffuse⁶⁰. Heterogeneous oxides consisting mainly of chromium and iron form on the surface. They are located above the metal that has already lost some of the chromium. Due to its heterogeneous structure, the presence of defects and internal stresses, such an oxide film does not provide reliable protection against corrosion. In certain environments, this can lead to local corrosion in the area with reduced chromium content located under the film⁶¹. During service, welded joints made of stainless steel may be exposed to various types of corrosion, namely pitting, crevice, intergranular, and stress corrosion^{62, 63, 64}. A protective passive film on the

⁵⁸ Tran N., Nguyen V., Nguyen V., Trung T., DO, Nguyen V., Nguyen V. Effects of heat input and backing gas on bead geometry and weld heat tint in sanitary tube welding. *Thermo*. 2025. Vol. 5, no. 4. 49. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo5040049> (date of access: 17.01.2026).

⁵⁹ Ciofu F., Nioata A., Luca L. Duplex stainless steel corrosion resistance. *Fascicle of Management of Technological Engineering*. 2010. Vol. 9. URL: <https://imt.uoradea.ro/auo.fimte/files-2010-v2/TCM/Ciofu%20Florin%20L2.pdf> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁰ Olsson C., Landolt D. Passive films on stainless steels—chemistry, structure and growth. *Electrochimica Acta*. 2003. Vol. 48, no. 9. P. 1093–1104. URL: [https://doi.org/10.1016/s0013-4686\(02\)00841-1](https://doi.org/10.1016/s0013-4686(02)00841-1) (date of access: 17.01.2026).

⁶¹ Morcillo M., Diaz I., Cano H., Chico B., De La Fuente D. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 213. P. 723–737. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334> (date of access: 17.01.2026).

⁶² Kearns J. R. The corrosion of heat tinted austenitic stainless alloys. *Corrosion*. 1985. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.5006/c1985-85050> (date of access: 17.01.2026).

⁶³ Aljohani T. A., Alateyah A., El-Sanabary S., El-Garaihy W. Corrosion of weldments. *Welding of Metallic Materials: Methods, Metallurgy, and Performance*. 2023. P. 565–588. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00010-9> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁴ Zhu L., Cui Z., Cui H., Wang X., Li Y. The effect of applied stress on the crevice corrosion of 304 stainless steel in 3.5 wt% NaCl solution. *Corrosion Science*. 2022. Vol. 196. 110039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.110039> (date of access: 17.01.2026).

surface of stainless steel provides high resistance to uniform corrosion in typical oxidizing environments^{65, 66, 67}. However, in the presence of aggressive factors, local destruction of this film is possible, leading to the formation of pitting corrosion^{68, 69}. The effect of high temperatures in the range of 500–800 °C (so-called «critical temperatures») during welding followed by slow cooling in air makes 2 mm thick austenitic corrosion-resistant steel AISI 304 susceptible to intergranular corrosion^{70, 71, 72}.

Under these conditions, chromium carbides precipitate along the grain boundaries, reducing the chromium content in the adjacent area (Fig. 8). If the chromium concentration decreases below the critical level for passivation (approximately 11.5%), this area becomes anodic relative to the rest of the grain, leading to sensitization of the material and its susceptibility to intergranular corrosion⁷³. Areas with chromium depletion may also become pathways for the preferential formation of other types of localized corrosion or crack propagation in the presence of tensile stresses⁷⁴.

⁶⁵ Wang X., Sun Y., He P., Tan X., Zhou Q., Wu W., Lv C., Li J., Jiang Y. Understanding the pitting behavior of laser welds in different austenitic stainless steels: From the perspective of pitting initiation. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 224, 111483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111483> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁶ Sun L., Chen S., Qiu J., Zhao T. Research on the mechanism and detection method of intergranular corrosion of AISI 304 stainless steel by electrochemical techniques in heat exchanger equipment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 32, no. 2. P. 534–543. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07132-5> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁷ Kappes M. A. Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review. *Corrosion Reviews*. 2019. Vol. 38, no. 1. P. 1–24. URL: <https://doi.org/10.1515/correv-2019-0061> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁸ Wang X., Sun Y., He P., Tan X., Zhou Q., Wu W., Lv C., Li J., Jiang Y. Understanding the pitting behavior of laser welds in different austenitic stainless steels: From the perspective of pitting initiation. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 224, 111483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111483> (date of access: 17.01.2026).

⁶⁹ Aghuy A. A., Zakeri M., Moayed M., Mazinani M. Effect of grain size on pitting corrosion of 304L austenitic stainless steel. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 94. P. 368–376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.02.024> (date of access: 17.01.2026).

⁷⁰ Sun L., Chen S., Qiu J., Zhao T. Research on the mechanism and detection method of intergranular corrosion of AISI 304 stainless steel by electrochemical techniques in heat exchanger equipment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 32, no. 2. P. 534–543. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07132-5> (date of access: 17.01.2026).

⁷¹ Srinivasan N. Sensitization of Austenitic Stainless steels: current developments, trends, and future directions. *Metallography Microstructure and Analysis*. (2021). Vol. 10, no. 2. P. 133–147. URL: <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00724-y> (date of access: 17.01.2026).

⁷² Shit G., Mariappan K., Ningshen S. Improvement of sensitization and intergranular corrosion of AISI type 304L stainless steel through thermo-mechanical treatment. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 213. 110975. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.110975> (date of access: 17.01.2026).

⁷³ Shit G., Mariappan K., Ningshen S. Improvement of sensitization and intergranular corrosion of AISI type 304L stainless steel through thermo-mechanical treatment. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 213. 110975. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.110975> (date of access: 17.01.2026).

⁷⁴ Vakili M., Koutnik P., Kohout J., Gholami Z. Analysis, assessment, and mitigation of stress corrosion cracking in austenitic stainless steels in the oil and gas sector: a review. *Surfaces*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 589–642. URL: <https://doi.org/10.3390/surfaces7030040> (date of access: 17.01.2026).

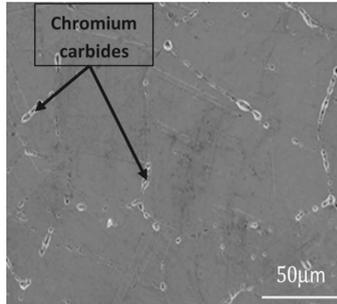


Fig. 8. SEM image of chromium carbides at the grain boundaries of AISI 304 steel⁷⁵

Special gas protection systems are used to prevent the formation of oxide films on the metal surface during welding and to reduce the likelihood of corrosion damage. They ensure the supply of protective gas to the welding area in order to isolate the molten metal and adjacent areas from contact with oxygen, nitrogen, and moisture from the environment. The development of effective gas protection devices is a relevant area of research, since the quality of a welded joint significantly depends on the stability and uniformity of the gas flow. A number of scientific papers have proposed technical solutions aimed at forming a laminar flow of shielding gas, which increases the effectiveness of protection and minimizes the formation of defects in the welded joint^{76, 77, 78}.

One of the main ways to make reliable gas protection is to gradually create a steady laminar flow. To start with, diffusers made of sintered metal or metal foam are used to even out the gas speed. These diffusers really cut down on flow turbulence and make the gas spread out more evenly (Fig. 9)⁷⁹. Depending on

⁷⁵ Sun L., Chen S., Qiu J., Zhao T. Research on the mechanism and detection method of intergranular corrosion of AISI 304 stainless steel by electrochemical techniques in heat exchanger equipment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 32, no. 2. P. 534–543. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07132-5>.(date of access: 17.01.2026).

⁷⁶ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139>.(date of access: 17.01.2026).

⁷⁷ Derakhshan E. D., Yazdian N., Craft B., Smith S., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 104. P. 170–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026>.(date of access: 17.01.2026).

⁷⁸ Vykhatar B., Lingner M., Richter A. M., Hoops F. Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 111. P. 532–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085>.(date of access: 17.01.2026).

⁷⁹ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139>.(date of access: 17.01.2026).

the requirements for protection quality and nozzle design, it is possible to use both individual elements and their combinations. For example, a honeycomb structure can be installed after the diffuser to direct the flow along the nozzle axis, effectively reducing transverse velocity fluctuations. At the same time, to achieve sufficient stabilization, a ratio of cell length to diameter of at least 5:1 is selected, which suppresses turbulence and promotes the formation of laminar flow⁸⁰. It is important to avoid abrupt changes in the shape and cross-section of the internal channels of the nozzle. The transition areas between sections are made with radius, which reduces the probability of flow disruption and the formation of new areas of turbulence. Such a smooth direction ensures a uniform laminar flow, especially if the channel length is sufficient to form a full parabolic velocity profile (Fig. 9)⁸¹.

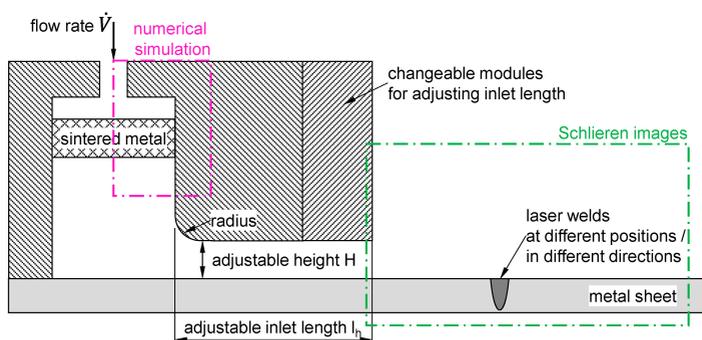


Fig. 9. Schematic cross-section of a protective nozzle with radiused edges and a sintered metal diffuser⁸²

Another common technique is to use multiple directions for supplying protective gas. Gas is supplied both directly to the welding area and to the surrounding space. This is achieved through separate channels: one directed straight at the welding area, another at an angle or opposite to the direction of the beam to prevent air ingress, and a third through the central chamber with subsequent distribution

⁸⁰ Derakhshan E. D., Yazdian N., Craft B., Smith S., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 104. P. 170–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026> (date of access: 17.01.2026).

⁸¹ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).

⁸² Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).

through a honeycomb structure. In addition, the devices are equipped with welding fume extraction systems that do not interfere with the main flow of shielding gas. For this purpose, extraction nozzles are used, which remove gas only from the periphery, leaving the central zone with a clean inert environment⁸³.

A review of scientific works on gas protection shows that there are currently studies devoted to the general patterns of laminar flow formation during welding with a relatively large gap between the clamping plates. However, the development of devices capable of ensuring an effective laminar gas flow in a narrow gap between closely spaced clamping plates of the clamping device remains outside the scope of research. This confirms the relevance of creating gas protection devices for such welding conditions.

3.3. Formation of welding stresses and deformations

Welding with highly concentrated energy sources inevitably leads to residual stresses and deformations after cooling of the weld zone. Localized heat influence and subsequent uneven cooling cause internal stresses and deformations that can significantly affect the geometric accuracy and strength of structures⁸⁴. Figure 10 shows typical forms of deformation that occur during the welding of flat parts.

Transverse and longitudinal shrinkage, as well as angular distortion, are the three main types of welding deformation that are commonly combined in real welded structures⁸⁵.

In particular, Figure 11a shows the distribution of longitudinal residual stresses (in the direction of welding) both along the weld and at the cross section in its center. The maximum tensile residual stress is recorded in the area around the weld line. Compressive stresses are formed in areas distant from the weld zone to maintain equilibrium. Along the weld line, the residual stresses at its ends decrease to zero due to free boundaries. Similarly, Figure 11b shows the distribution of transverse residual stress: it is tensile in the center and compressive at the beginning and end of the weld, and approaches zero at the edges of the plate⁸⁶.

⁸³ Vykhtar B., Lingner M., Richter A. M., Hoops F. Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 111. P. 532–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085> (date of access: 17.01.2026).

⁸⁴ Huang H., Tsutsumi S., Wang J., Li L., Murakawa H. High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2017. Vol. 135. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.004> (date of access: 17.01.2026).

⁸⁵ Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374> (date of access: 17.01.2026).

⁸⁶ Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374> (date of access: 17.01.2026).

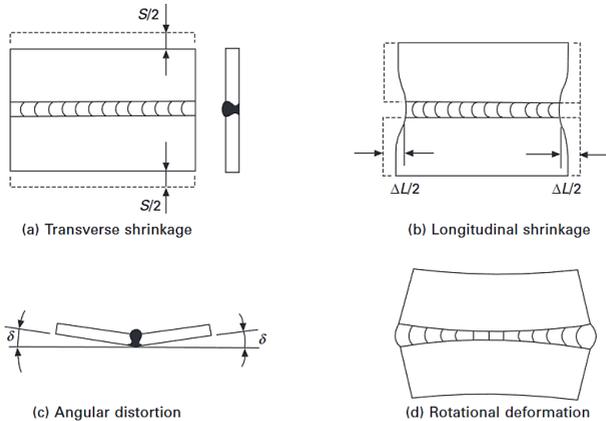


Fig. 10. Typical deformations during welding: (a) transverse shrinkage; (b) longitudinal shrinkage; (c) angular deformation; (d) rotational deformation⁸⁷

The level of welding deformations and residual stresses is largely determined by the amount of heat input. As a rule, with an increase in heat input, both residual stresses and the degree of deformation increase⁸⁸. In this sense, laser welding, which is characterized by high energy density, is advantageous because it requires less heat input compared to other welding methods.⁸⁹

The evolution of residual stresses during welding is related to the interaction of metallurgical changes and microstructure morphology. Tensile residual stresses have a negative effect on structural integrity, while compressive residual stresses usually have a positive effect, in particular increasing fatigue strength^{90, 91}. The change in stress caused by grain size may be a consequence

⁸⁷ Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374> (date of access: 17.01.2026).

⁸⁸ Liu Z., Jin X., Li J., Hao Z., Zhang J. Numerical simulation and experimental analysis on the deformation and residual stress in trailing ultrasonic vibration assisted laser welding. *Advances in Engineering Software*. 2022. Vol. 172. 103200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103200> (date of access: 17.01.2026).

⁸⁹ Tayebi M., Soltani H. M., Rajaei A. Laser welding. In *IntechOpen eBooks*. 2022. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102456> (date of access: 17.01.2026).

⁹⁰ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).

⁹¹ Chiocca A., Frendo F., Bertini L. Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 38. P. 447–456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045> (date of access: 17.01.2026).

of variations in the properties of the austenitic and ferritic phases, in particular elastic deformation, thermal and plastic mismatch. At the same time, the crystal lattice parameter, which is a function of the interstitial atom content, is crucial for interpreting the desired residual stress in expanded austenite of AISI 316 steel⁹². On the other hand, it has been proven that solid-phase transformation has a certain effect on the distribution of residual stresses in AISI 304 steel, but this effect is not significant⁹³.

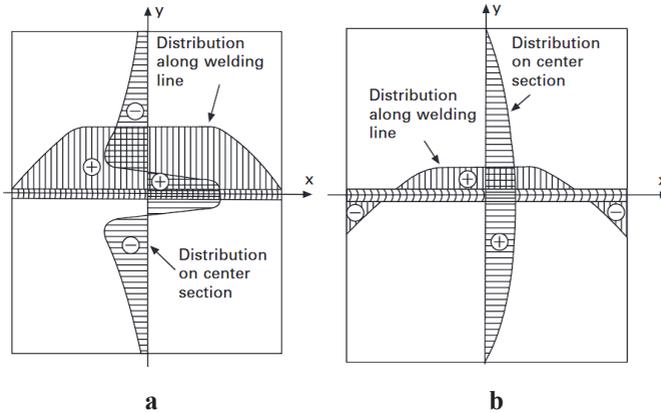


Fig. 11. Scheme of residual stress distribution during welding: (a) stress in the welding direction, (b) stress in the transverse direction⁹⁴

The study⁹⁵ examined the effect of microstructure and heat input on residual stresses after laser welding of 1 mm thick AISI 304 stainless steel. During the research, laser welding was performed with a constant laser power of 750 W, while the welding speed was varied in the range of 0.6...1 m/min, and the defocusing value was varied in the range of 0...-1 mm. It was found that a ratio of chromium to nickel equivalents of about 1.69 confirms a ferrite-austenite

⁹² Hummelshøj T. S., Christiansen T. L., Somers M. A. Lattice expansion of carbon-stabilized expanded austenite. *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 63, no. 7. P. 761–763. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.05.031>. (date of access: 17.01.2026).

⁹³ Lin Y., Chou C. A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995. Vol. 48, no. 1–4. P. 693–698. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01710-i](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01710-i). (date of access: 17.01.2026).

⁹⁴ Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374>. (date of access: 17.01.2026).

⁹⁵ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009>. (date of access: 17.01.2026).

type crystallization mode, in which the microstructure consists of a combined phase of needle-like and lath δ -ferrite in an austenitic matrix. The maximum δ -ferrite content (12%) is achieved at the lowest heat input of 45 J/mm, while at an increase to 75 J/mm, its amount decreases to 7–8%. With increasing heat input, the thickness of dendrites increases from 484 nm to 927 nm, and the interdendritic interval doubles from 3 to 6 μm , while lath δ -ferrite decreases in favor of needle-like δ -ferrite (Fig. 12). The highest quality welded joint is observed with minimal heat input, which is explained by a very fine dendritic structure and minimal inter-dendritic spacing. The higher coefficient of thermal expansion of nickel compared to chromium causes tensile stresses in the γ -austenite phase and compressive stresses in the δ -ferrite dendritic phase.

At low heat input, which increases the chromium content and reduces nickel, compressive stresses arise, which contribute to a reduction in residual stresses. Also, reducing the heat input from 75 to 45 J/mm reduces the longitudinal tensile stresses to 245 MPa, which is below the yield strength, and the transverse residual stresses change from tensile to compressive (Fig. 13)⁹⁶.

Several approaches can be used to reduce stress and deformation levels. For example, the use of closely spaced external clamping plates when welding straight welded pipe joints. External clamping plates significantly reduce residual stresses and welding deformations by more than 30% compared to not using clamping plates.⁹⁷ The use of copper backing plates on the back side of welded joints also significantly reduces residual stresses and deformations⁹⁸.

Based on the results of a literature review of contemporary scientific works on laser welding of thin-walled parts, the following areas for further research were identified:

1. Gas protection during laser welding of thin-walled products in a narrow gap between clamping plates is important to prevent the formation of oxide films, pores, and a decrease in the corrosion resistance of joints. Currently, there are studies devoted to the general patterns of laminar flow formation during welding with a relatively wide gap between the clamping

⁹⁶ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).

⁹⁷ Mandal N.R. Welding Residual Stress and Distortion. *Ship Construction and Welding. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping*. 2017. Vol. 2. Springer URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2955-4_17 (date of access: 17.01.2026).

⁹⁸ Mohammed M. S., Hamdey M. D., Kareem A. H., Majdi H. S. Investigation of copper backing plate effects in stainless steel welding distortion, heat distribution, and residual stress. *International Journal of Heat and Technology*. 2024. Vol. 42, no. 4. P. 1434–1446. URL: <https://doi.org/10.18280/ijht.420433> (date of access: 17.01.2026).

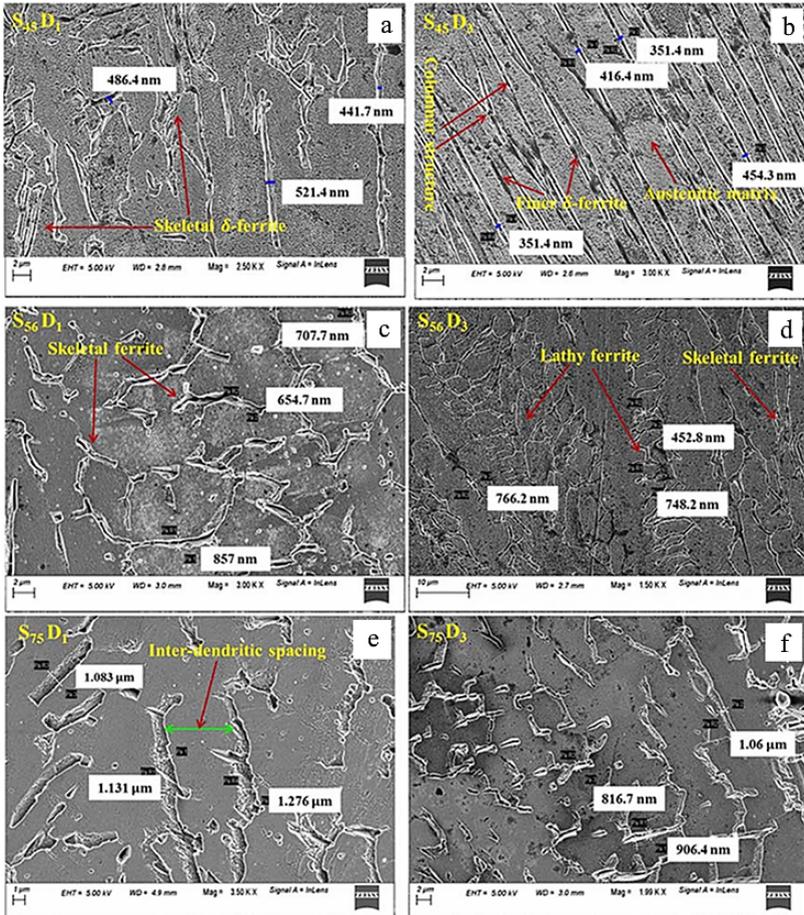


Fig. 12. Variation of the primary dendritic lattice of δ -ferrite under different welding parameters for 1 mm thick AISI 304 steel: a) $P = 750$ W, $V = 1$ m/min, $\Delta F = 0$ mm; b) $P = 750$ W, $V = 1$ m/min, $\Delta F = -1$ mm; c) $P = 750$ W, $V = 0.8$ m/min, $\Delta F = 0$ mm; d) $P = 750$ W, $V = 0.8$ m/min, $\Delta F = -1$ mm; e) $P = 750$ W, $V = 0.6$ m/min, $\Delta F = 0$ mm; f) $P = 750$ W, $V = 0.6$ m/min, $\Delta F = -1$ mm⁹⁹

⁹⁹ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).

plates^{100, 101, 102}. However, the development of devices capable of ensuring an effective laminar gas flow in the narrow gap between closely spaced clamping plates remains outside the scope of research. This confirms the relevance of creating gas protection devices for such welding conditions. To reduce turbulence in the flow and ensure stable and constant gas protection in the welding zone, it is promising to use additional gas distribution elements in the design of gas protection devices based on metal meshes or sintered porous metal, which allow stabilizing the speed and reducing the intensity of mixing with atmospheric air^{103, 104}. The ratio of the diameter to the length of the outlet channel also plays an important role, which must be at least 1:5 to ensure laminar flow stability¹⁰⁵. Further research should focus on developing a gas protection device for welding in conditions of a narrow gap between the clamping plates, which would ensure a stable laminar flow of protective gas.

2. The problem of deformation and residual stresses in thin-walled welded structures is particularly critical due to the low rigidity of the elements and high sensitivity to thermal effects. Even when using laser welding with a lower level of heat input compared to other welding methods, deformations caused by a concentrated heat source can lead to a loss of geometric accuracy and strength of products and welded joints, respectively^{106, 107}. Among the known solutions, the most effective are the use of copper backing plates, which, due to their high thermal conductivity, ensure effective heat dissipation and reduce the size of

¹⁰⁰ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰¹ Derakhshan E. D., Yazdian N., Craft B., Smith S., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 104. P. 170–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰² Vykhatar B., Lingner M., Richter A. M., Hoops F. Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 111. P. 532–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰³ Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰⁴ Derakhshan E. D., Yazdian N., Craft B., Smith S., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 104. P. 170–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰⁵ Vykhatar B., Lingner M., Richter A. M., Hoops F. Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 111. P. 532–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰⁶ Huang H., Tsutsumi S., Wang J., Li L., Murakawa H. High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2017. Vol. 135. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.004> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰⁷ Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374> (date of access: 17.01.2026).

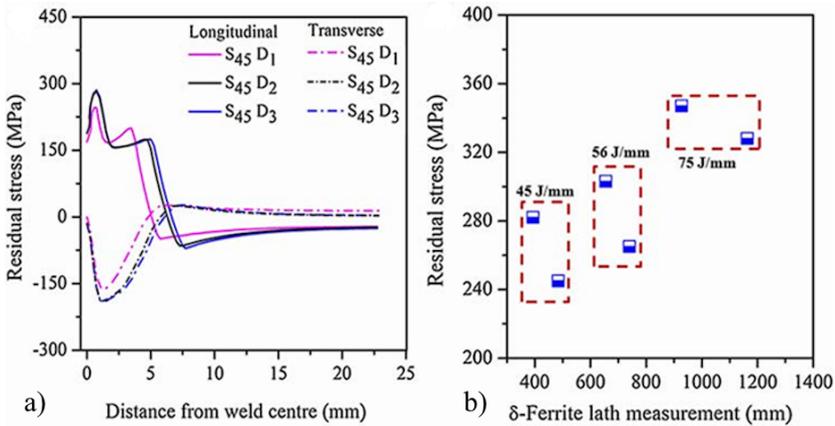


Fig. 13. a) distribution of residual stresses at the lowest heat input of 45 J/mm, b) change in the size of primary δ -ferrite dendrites depending on residual stress¹⁰⁸

the heat-affected zone, as well as the optimization of laser welding parameters, which reduce the levels of stress and deformation in welded products^{109, 110, 111}. An important condition for the effectiveness of these solutions is the optimal placement of the clamping plates and ensure that the parts fit completely to the copper backing plate. Further research may be directed toward studying the stresses and strains in the welded part at different distances between the clamping plates.

3. The formation of craters at the end of a welded joint during laser welding remains one of the major problems in the manufacture of girth welded joints in thin-walled products. Despite the existence of research, the main focus in

¹⁰⁸ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).

¹⁰⁹ Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).

¹¹⁰ Mandal N.R. Welding Residual Stress and Distortion. *Ship Construction and Welding*. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping. 2017. Vol. 2. Springer URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2955-4_17 (date of access: 17.01.2026).

¹¹¹ Mohammed M. S., Hamdey M. D., Kareem A. H., Majdi H. S. Investigation of copper backing plate effects in stainless steel welding distortion, heat distribution, and residual stress. *International Journal of Heat and Technology*. 2024. Vol. 42, no. 4. P. 1434–1446. URL: <https://doi.org/10.18280/ijht.420433> (date of access: 17.01.2026).

these studies is on the welding of dissimilar metals or carbon steels^{112, 113}. There are still only a limited number of studies specifically related to the welding of thin-walled elements made of austenitic stainless steel. This creates a need for further research into avoiding crater formation when welding thin-walled products with a rotation axis made of stainless steel. One of the most promising approaches to eliminating crater formation is to use a smooth increase and decrease in laser power at the beginning and end of the welding process, respectively. The use of zigzag power modulation allows to reduce the length of crystallization cracks in the crater and limit their penetration into the welded joint¹¹⁴. In addition, overlap welding and smoothing welds also help reduce the risk of craters and crystallization cracks forming¹¹⁵. Further research prospects include optimizing the profiles of increasing and decreasing the power of laser radiation during welding, taking into account the specific geometry of the joint and the properties of the material.

4. Development and testing of auxiliary technological equipment for laser welding

The efficiency of laser welding of thin-walled stainless steels is largely determined not only by the parameters of the welding modes, but also by the level of technological support for the process. Given the short lifetime of the weld pool (10-20 ms) and the limited length of the welded joint section, which requires gas protection no more than 30-40 mm long. Therefore, it is important to use gas protection devices that ensure stable conditions for the crystallization of the weld metal and prevent the formation of oxides and defects in welded joints.

An important auxiliary technological device is a clamping device designed for precise fixing and joining of welded edges. Its use will minimize gaps between welded parts, improve heat dissipation from the welding area, and reduce the probability of non-welds and thermal deformations.

To ensure process stability and high repeatability of girth welded joints, it is also necessary to use a precision rotator, which will ensure accurate positioning

¹¹² Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

¹¹³ Gook S., Üstündag Ö., Gumenyuk A., Rethmeier M. Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00841-x> (date of access: 17.01.2026).

¹¹⁴ Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

¹¹⁵ Gook S., Üstündag Ö., Gumenyuk A., Rethmeier M. Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00841-x> (date of access: 17.01.2026).

of parts, uniform movement, and improve weld formation, especially at the beginning and end of the welded joint, where craters and other defects often occur.

The development of 3D models and working drawings of auxiliary technological equipment elements was carried out using the Autodesk Inventor CAD system.

4.1. Creation and testing of a gas protection device

To solve the problem of gas protection of the welding zone, a gas protection device for welded joints was designed (Fig. 14) and manufactured (Fig. 15). The design of the device allows the use of various protective gases, which are applied depending on the chemical composition of the materials being welded. The protective gas is supplied to the outer surface of the welded samples, to the molten metal bath spot, and to the welded seam. The gas protection device for laser processing consists of two parts.

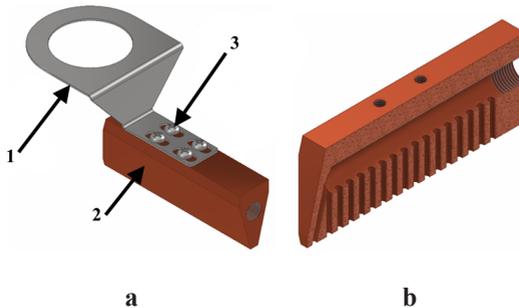


Fig. 14. 3D model of a gas protection device for welded joints (a): 1 – protective gas distributor mounting, 2 – protective gas distributor, 3 – M4 screws; (b) cross-section of the protective gas distributor housing



Fig. 15. Manufactured gas protection device for welded joints

The gas protection distributor is a solid structure made of copper measuring 80×16×28 mm, has two side bevels at an angle of 75° for unhindered passage between the clamping plates of the clamping device, and a third bevel at an angle of 15° for docking with the nozzle of the laser processing head. The gas protection distributor body has a blind hole Ø8.6 mm and sixteen holes Ø2 mm perpendicular to it, as well as one hole Ø2 mm at an angle for supplying protective gas to the welding zone. The length of the holes is 13 mm, which ensures laminar flow of the protective gas and eliminates turbulence that can lead to air suction into the welding zone. The Ø8.6 mm hole has a G1/8 thread for connecting the fitting. There are also four M4 threaded holes for attaching the protective gas distributor holder. The distributor and gas protection holder are fastened to each other with four M4 screws. The protective gas distributor fastener is a bent thin-sheet part made of 0.8 mm thick corrosion-resistant steel. The part has 4 grooves for attaching to the gas protection distributor and one Ø33 mm hole for attaching to the laser processing head using a nozzle clamping nut. Figure 16 shows a schematic of the gas protection device attachment to the laser welding head.

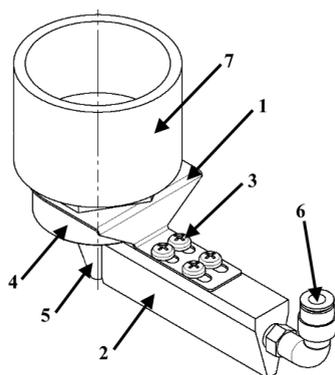


Fig. 16. Scheme of attaching the gas protection device to the laser welding head, where 1 – protective gas distributor attachment, 2 – protective gas distributor, 3 – M4 screws, 4 – nozzle clamping nut, 5 – nozzle, 6 – fitting, 7 – laser welding head housing

4.2. Creation and testing of a clamping device

In accordance with the requirements of EN ISO 15614-11:2015 on the manufacture of test welded joints, a preliminary design of laboratory equipment for the manufacture of flat and cylindrical samples from thin-sheet material using laser processing technologies was developed. Fig. 17 shows a 3D model of the developed technological equipment.

In accordance with the draft design, a clamping conductor was manufactured for welding test welded joints using mechanical processing such as milling, grinding, drilling, and welding.

The clamping device for welding flat and cylindrical samples consists of several parts and has dimensions of 650×170×675 mm (Fig. 18). Frame 1 is designed for mounting device elements on it. It is a welded structure made of a 25×25 square profile pipe. A base plate 7 and a screw mounting plate 8 for the drive of the movable clamp 4 are welded to two sides of the opposite edges. A profile pipe was chosen to reduce the weight of the frame structure. The base plates and screw mounting plate are machined and have parallel edges. The frame dimensions are 650×170×186 mm.

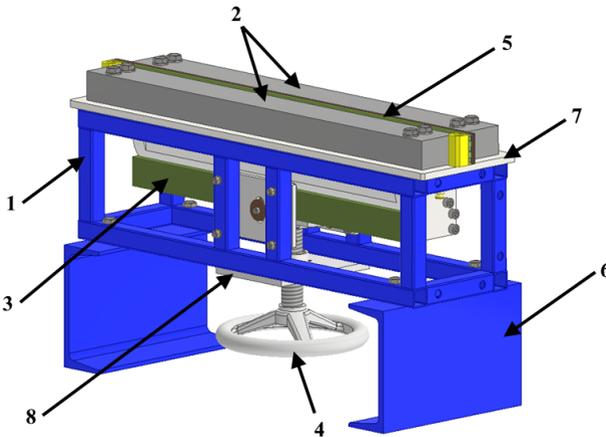


Fig. 17. 3D model of a clamping device for welding flat and cylindrical samples made of thin sheet material: 1 – frame; 2 – clamping plates; 3 – inner clamp (movable); 4 – movable clamp drive; 5 – weld joint orientation device; 6 – support elements; 7 – base plate; 8 – screw mounting plate

Frame 1 is installed on two support elements 6 made of channel bar No. 16, which are fixed on the assembly and welding table. To ensure uniform contact with the sample and prevent deformation during welding, clamping plates 2 made of 20 steel measuring 660×68×20 mm are used. Two fixed clamping plates with bevels towards the weld are installed on the base plate for unobstructed passage of the gas protection device.

The movable clamp 3 is a cylindrical element made of aluminum alloy D16T and is fixed with a screw on the underside of the clamping device. The diameter

of the body can vary depending on the diameter of the workpiece being welded. The clamp body has a gas protection system for the back of the weld, which consists of a protective gas supply channel and a weld cooling element. It provides reliable protection of liquid and hot (with a temperature above 500°C) metal from the surrounding atmosphere. A groove and a protective gas supply channel are provided for inserting the gas supply bar. The gas supply bar has 49 holes with a diameter of 2 mm for the passage of protective gas from the back side of the weld. The types of protective gas are selected depending on the chemical composition of the materials being welded. The shielding gas is supplied to the inner surface of the welded samples, the molten metal pool spot of the laser beam, and the welded seam (seam protection length up to 90 mm). The gas supply system is equipped with a 10 mm diameter hose connector (through which the gas is supplied). Gas consumption is 4–30 l/min at a pressure of 0.01–0.25 MPa. To reduce resistance when removing the welded cylindrical workpiece (part), flats are machined on both sides of the housing. The dimensions of the housing are 500 mm in length, 81 mm in diameter, and it weighs 6 kg.



Fig. 18. Clamping device for welding flat and cylindrical samples made of thin sheet material

The clamping device design also includes two cooling plates made of copper with a 4×2 mm groove for gas supply from the reverse side of the workpiece (part) with a length of 500 mm. The Ø1.5 mm holes for the protective gas outlet in the gas supply plate are made together with the holes in the cooling plates. The gas supply plate and the cooling plate are connected to each other in one part. Depending on the profile of the workpiece (part) being welded (flat or cylindrical), the plates are changed in the clamp body.

The welded joint alignment device is designed to set a guaranteed gap between the edges of the workpiece (part) before final compression and to align the edges along the axis of the clamping device in the manipulator coordinate system. The alignment device is set in the groove between the fixed clamping plates using pins mounted on the frame. Between the support plate and the clamping plate there is an alignment ruler – a steel strip 27×500 mm thick 0.15 – 0.35 mm, made of 65G steel. It is fixed by compression between the support and clamping plates. Figure 19 shows schemes of laser welding using a clamping device.

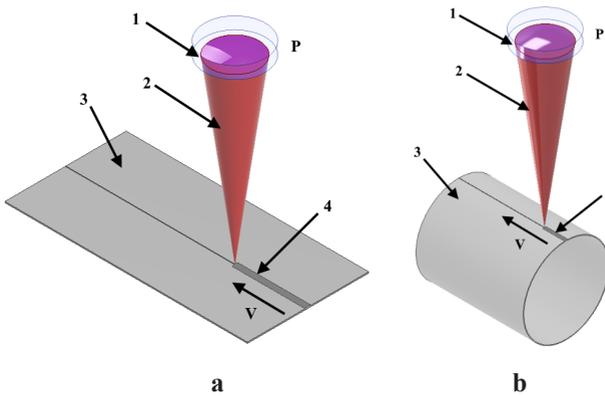


Fig. 19. Schemes of laser welding using a clamping device: a) welding of flat parts, b) welding of cylindrical parts, where 1 – focusing lens, 2 – laser beam, 3 – workpiece to be welded, 4 – weld

To test the clamping device and gas protection device, experiments were conducted on welding 1.5 mm thick AISI 321 steel using various welding parameters. A DY044 Nd:YAG laser with a radiation power of up to 4.4 kW and a radiation wavelength of $\lambda=1.06 \mu\text{m}$, manufactured by Rofin-Sinar (Germany), was used for the research. The welding post is shown in Figure 20.

Test bead-on-plate welds were performed using different welding modes. Laser welding modes were optimized by visually inspecting the welded joint for defects in accordance with EN ISO 13919-1:2015 «Welding – Electron and laser-beam welded joints – Guidance on quality levels for imperfections – Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys». This standard provides for visual inspection for the presence of such defects in welded joints as: lack of fusion, lack of penetration, undercut, excessive convexity, excessive penetration, metal leakage, concavity of the root of the weld and its undercut, metal spatter. Based on the results of visual inspection, no defects were found, and three optimal

welding modes with the same linear energy were selected: 1) $P = 1.5$ kW, $V = 1.5$ m/min, 2) $P = 2.5$ kW, $V = 2.5$ m/min, 3) $P = 3.5$ kW, $V = 3.5$ m/min, welds No. 1, No. 7, and No. 8, respectively (Fig. 21).



Fig. 20. Welding post with installed clamping device (a) and gas protection device (b)

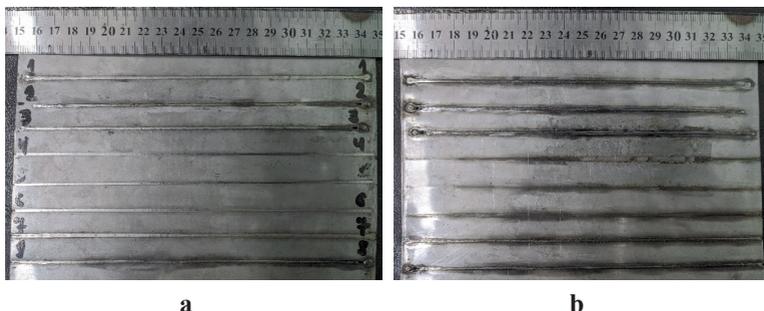


Fig. 21. Welded AISI 321 steel bead-on-plate samples: (a) weld face, (b) root side

As can be seen from the images of welded samples, the clamping device for welding thin-sheet materials ensures constant uniform heat dissipation from the welding zone, uniform clamping of the welded sample along the entire length of the clamping conductor, as well as gas protection of the reverse side of welded joints. In turn, the gas protection device for the welding zone and the cooling metal of the weld also provides reliable gas protection, which allows to obtain welded joints without heat tint. Fig. 22 shows images from X-ray inspection, which show the absence of pores in the obtained welds.

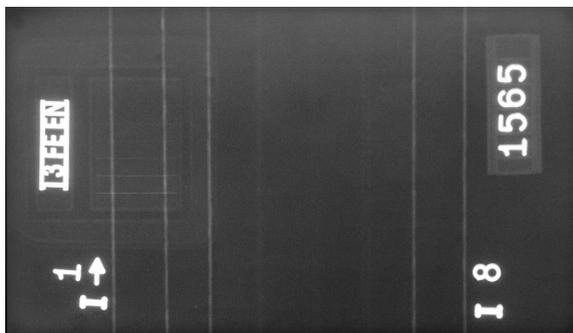


Fig. 22. X-ray image of the resulting bead-on-plate welds in 1.5 mm thick AISI 321 steel

4.3. Creation and testing of a precision rotator

For laser welding of girth welded joints of thin-walled products made of high-alloy steels, auxiliary precision technological equipment was developed and manufactured, which is a precision rotator (Fig. 23).

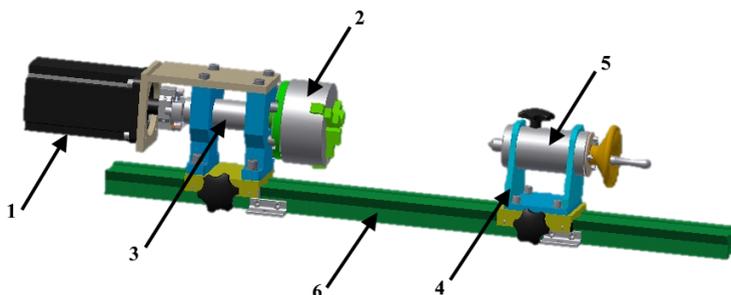


Fig. 23. 3D model of a precision rotator: 1 – servomotor; 2 – chuck for clamping rotating bodies; 3 – front headstock; 4 – rear headstock; 5 – rear headstock spindle for supporting rotating bodies; 6 – bed

Figure 24 shows the general view of the front headstock

The bracket is made of 10 mm thick steel plates welded at a 90° angle and machined in two mutually perpendicular planes for mounting the motor and fastening to the bearing housing. The bearing housing is mounted on a slide made of Steel 3 (mild steel). Its purpose is to allow the headstock to move along the machine bed. The bed profile resembles a dovetail. The bearing housing is made of 25 mm thick steel and accommodates bearings that support

the axis of rotation of the faceplate (Fig. 25, item 1). A $\text{\O}120$ mm lathe chuck is mounted on the faceplate for clamping the workpieces. A coupling is installed on the faceplate shaft to connect it to the motor shaft. A spacer sleeve is installed between the housing elements and serves to protect the bearings from contamination (Fig. 25, item 2).

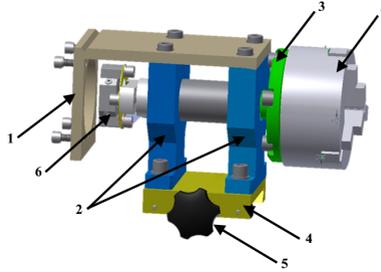


Fig. 24. General view of the front headstock: 1 – bracket; 2 – bearing housing; 3 – faceplate with shaft; 4 – slide; 5 – locking screw; 6 – coupling; 7 – chuck

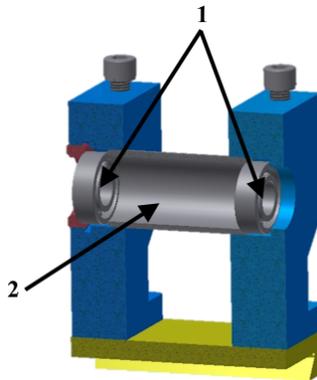


Fig. 25. Bearing housing, where 1 – bearings, 2 – spacer sleeve

Figure 26 shows a general sectional view of the rear headstock. The purpose of the rear headstock is to support the axis of the welded structure component. The clamping cone moves in the horizontal direction by means of a sleeve actuated by a screw–nut pair during rotation of the handwheel.

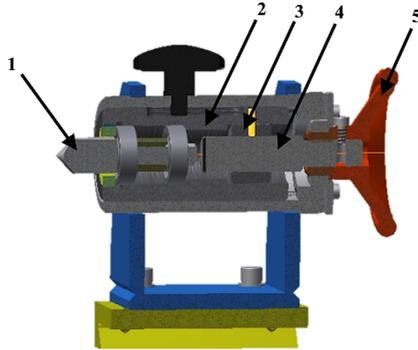


Fig. 26. Sectional view of the rear headstock: 1 – clamping cone; 2 – sleeve; 3, 4 – screw–nut pair; 5 – handwheel.

Figure 27 shows the completed precision rotator.



Fig. 27. Precision rotator

Due to the presence of a frame, the precision rotator allows welding parts up to 450 mm long. The chuck for clamping rotating bodies can accommodate parts with a diameter of 6 to 90 mm. The servomotor is synchronized with the laser welding system, ensuring positioning accuracy of 1 mm and repeatability of no worse than ± 0.08 mm.

The precision rotator allows laser welding according to the scheme shown in Figure 28.

As a test of the precision rotator, laser welding of a bellows with a flange made of stainless steel AISI 304 was performed (Fig. 29).

Laser welding was performed in pulse mode with a pulse frequency of 1000 Hz. The welding head has a focal length of 200 mm ($\Delta F = +5$ mm). The maximum power of laser radiation is $P = 240$ W. The welding speed

$V = 0.5 \text{ m/min}$ (1 rev/5 sec). To protect the welding area, a protective gas – high-purity argon – was used. The gas consumption was 20 l/min.

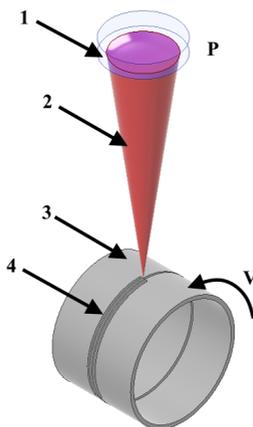


Fig. 28. Laser welding scheme on the precision rotator, where 1 – focusing lens, 2 – laser beam, 3 – workpiece to be welded, 4 – weld

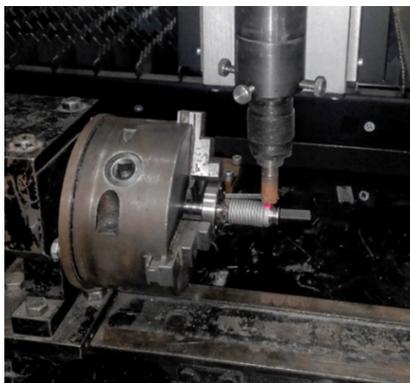


Fig. 29. Welding bellows on a precision rotator

To prevent metal spatter and crater formation, a smooth start and smooth stop at the end of the welded joint welding process was used, as well as a smooth increase and decrease in laser radiation power at the beginning and end of the welding process. The parameters of the laser welding parameters are given in Table 2.

Table 2

Laser welding parameters for bellows

| Stages of welding | Welding speed, V m/min | Welding power, P_{average} W | Movement relative to the axis of the part, degrees |
|-------------------|---------------------------|---|--|
| Power increase | 0,5 | 20 | 3 |
| | 0,5 | 40 | 3 |
| | 0,5 | 60 | 3 |
| Main seam | 0,5 | 120 | 365 |
| Power decrease | 0,5 | 60 | 3 |
| | 0,5 | 40 | 3 |
| | 0,5 | 20 | 3 |

As a result of laser welding using a precision rotator, a welded joint of the bellows with the flange was obtained (Fig. 30).

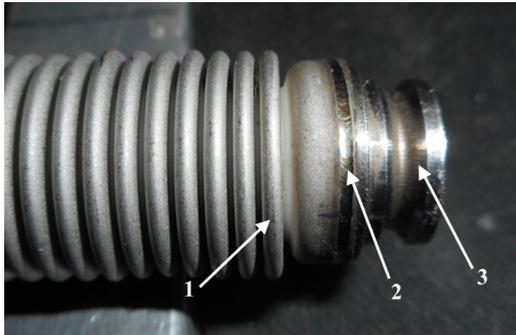


Fig. 30. Result of laser welding of a bellows made of AISI 304 steel with a wall thickness of 0.25 mm with a flange made of AISI 304 steel, where 1 – bellows, 2 – weld, 3 – flange

The rotator allows to make girth welded joints, ensuring uniform weld penetration. An additional advantage is the presence of a servo motor, which provides precise control of the rotation speed and allows to automate the welding process, increasing its stability and productivity. This, in turn, makes it possible to develop laser welding technology for other products used in various industries, such as aircraft manufacturing, mechanical engineering, etc.

CONCLUSIONS

Analysis of scientific works on laser welding of thin-walled products has made it possible to identify a number of pressing issues and to develop and

manufacture the necessary auxiliary technological equipment to overcome them:

1) The clamping device allows the production of flat and cylindrical samples from thin-sheet material that meet the requirements of EN ISO 15614-11:2015, from steels and alloys across a wide range of technological parameters. This is achieved thanks to the clamping device's design, which includes an internal clamping device with a shielding gas system for the weld root, a copper cooling plate, and an alignment ruler for the edges of the workpieces to be welded.

2) The gas shielding device provides reliable protection of the welding zone and the cooling weld metal due to its shape, which allows it to be used between closely spaced clamping plates of the clamping device. Additionally, the diameter and length of the gas supply holes have a ratio greater than 1:5, which ensures a laminar flow of the shielding gas and prevents the formation of turbulence.

3) The precision rotator enables the formation of girth welds with diameters up to 90 mm, ensuring uniform weld penetration thanks to the servomotor, which provides precise control of the rotational speed and allows automation of the welding process, thereby enhancing its stability and productivity. Another advantage is the ability to synchronize the servomotor with the laser control unit, which makes it possible to apply a technological technique such as smooth increase and decrease laser radiation power at the beginning and end of the welding process to prevent crater formation in the welds.

The results of testing the developed auxiliary technological equipment confirmed its effectiveness. The use of this equipment will allow solving a wide range of tasks relevant for the rocket, chemical, medical, defense and other industries that use thin sheet metal in production.

SUMMARY

The effectiveness of laser welding of thin-walled corrosion-resistant steels is determined not only by the welding parameters but also by the level of technological support of the process. This study analyzes the main challenges in laser welding of thin-walled components, including insufficient shielding of the weld zone, difficulty in achieving precise edge alignment, thermal deformations, and defect formation at the beginning and end of the weld. Based on this analysis, the key steps to eliminate these issues and improve process stability were identified. A set of auxiliary technological equipment was developed and manufactured, including a clamping device, a shielding gas device, and a precision rotator. The proposed clamping device ensures accurate positioning of components, minimization of gaps, and effective heat dissipation. The shielding gas device creates a stable

laminar flow of protective gas over the weld and the cooling metal. The precision rotator provides uniform formation of girth welds and enables automation of the welding process. The developed equipment was experimentally tested under real laser welding conditions. The results demonstrated that the obtained welds comply with the requirements of EN ISO 15614-11:2015, confirming the effectiveness of the proposed technical solutions.

Bibliography

1. Altenbach H., Eremeyev V. Thin-walled structural elements: Classification, classical and advanced theories, new applications. shell-like structures / ed. by H. Altenbach, V. Eremeyev. Cham: Springer International Publishing, 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42277-0_1 (date of access: 17.01.2026)
2. Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Bernatsky A.V., Siora, A.V.. Laser welding of thin-wall filter elements of steel 08Kh18N10T. *The Paton Welding Journal*, 2017. Vol. 4. P. 49-52. URL: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.10> (date of access: 17.01.2026).
3. Kuczek T. Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures. *Engineering Optimization*. 2015. Vol. 48, no. 2. P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2015.1017350> (date of access: 17.01.2026).
4. McNair S. a. M., Chaharsooghi A. S., Carnevale M., Rhead A., Onnela A., Daguin J., Cichy K., et al. Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 118, no. 3–4. P. 667–681. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8> (date of access: 17.01.2026).
5. Wang K., Li L. Structural analysis and optimal design of a spherical thin-walled stainless steel water tank without reinforced tie ribs. *Journal of Vibroengineering*. 2024. Vol. 20, no. 4. P. 983-1000. URL: <https://doi.org/10.21595/jve.2024.23812> (date of access: 17.01.2026).
6. Michler T. Austenitic stainless steels. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016. Vol. 1, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.02509-1> (date of access: 17.01.2026).
7. Ibrahim O., Ibrahim I., Khalifa T. Impact behavior of different stainless steel weldments at low temperatures. *Engineering Failure Analysis*. 2010. Vol. 17, no. 5. P. 1069–1076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.12.006> (date of access: 17.01.2026).
8. Lv X., Chen S., Wang Q., Jiang H., Rong L. Temperature dependence of fracture behavior and mechanical properties of AISI 316 austenitic stainless

steel. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 9. 1421. <https://doi.org/10.3390/met12091421> (date of access: 17.01.2026).

9. ASTM A480/A480M-22a. Standard specification for general requirements for flat-rolled stainless and heat-resisting steel plate, sheet, and strip. Effective from 2023-06-02. Official edition. URL: https://store.astm.org/a0480_a0480m-22a.html (date of access: 17.01.2026).

10. Kumar K., Kumar C. S., Masanta M., Pradhan S. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry. *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 50. P. 999–1004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.308> (date of access: 17.01.2026).

11. Advancing implantable medical device reliability with enhanced laser joining technology. *Home – Medical Design Briefs*. URL: <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/52177-advancing-implantable-medical-device-reliability-with-enhanced-laser-joining-technology> (date of access: 17.01.2026).

12. Sabdin S. D., Hussein N. I. S., Sued M. K., Ayof M. N. Joining of thin plates using various arc welding heat sources—A Review. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 357-370. URL: <https://jamt.utm.edu.my/jamt/article/view/4005> (date of access: 17.01.2026).

13. Khoshnaw F. Welding of metallic materials methods, metallurgy, and performance. Elsevier, 2023. 608 p. URL: <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03713-8> (date of access: 17.01.2026).

14. Manh N. H., Van Anh N., Van Tuan N., Xu B., Akihisa M. Research and development of a novel TIG welding torch for joining thin sheets. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 23. 5260. URL: <https://doi.org/10.3390/app9235260> (date of access: 17.01.2026).

15. Yurchenko, Yu. V., et al. Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International Journal of Science Engineering and Technology*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue5.289> (date of access: 17.01.2026).

16. Bala Y., Rajendran D. K. Global welding market growth. *Automation in Welding Industry: Incorporating Artificial Intelligence, Machine Learning and Other Technologies*. 2024. P. 229–243. URL: <https://doi.org/10.1002/9781394172948.ch13> (date of access: 17.01.2026).

17. Buang A. S., Bakar M. S. A., Rohani M. Z. A review of trend advanced welding process and welding technology in industries. *International Journal of Technical Vocational and Engineering Technology*. 2024. Vol. 5, no. 1. P. 133-145. URL: <https://journal.pktm.com.my/index.php/ijtvte/article/download/103/72> (date of access: 17.01.2026).

18. Rahadian N. Advancements in welding technology: A comprehensive review of techniques, materials, and applications. *Journal PEP Bandung*. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 62-110. <https://ejournal.pepbandung.ac.id/index.php/gm/article/view/12> (date of access: 17.01.2026).

19. EN ISO 6520-1:2007. Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding. Effective from 2014-02-15 URL: <https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dstu/vigotovlennyya-mk-mizhnarodna-gilka-standarty/78-dstu-iso-5817-2016-zvaryvannya.pdf> (date of access: 17.01.2026).

20. Kenda M., Klobčar D., Nagode A., Bračun D. Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 128. 105579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579> (date of access: 17.01.2026).

21. Jian G. A. O., Xiaojiao S. O. N. G., Lihua P. A. N., Ling X. I. A., Jie X. U. Study on the quality control of arc crater in laser welding girth weld. *Electric Welding Machine*. 2022. Vol. 52, no.5. P. 112-116. URL: <http://doi.org/10.7512/j.issn.1001-2303.2022.05.16> (date of access: 17.01.2026).

22. Lai W. J., Ganguly S., Suder W. Study of the effect of inter-pass temperature on weld overlap start-stop defects and mitigation by application of laser defocusing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 117–130. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06851-8> (date of access: 17.01.2026).

23. Zhang P., Jia Z., Yu Z., Shi H., Li S., Wu D., Tian Y. A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys. *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 140. 107094. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107094> (date of access: 17.01.2026).

24. Ramon J., Basu R., Voort G. V., Bolar G. A comprehensive study on solidification (hot) cracking in austenitic stainless steel welds from a microstructural approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021. Vol. 194. 104560. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104560> (date of access: 17.01.2026).

25. Gook S., Üstündag Ö., Gumenyuk A., Rethmeier M. Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00841-x> (date of access: 17.01.2026).

26. Mahajanam S., Heidersbach K. Corrosion studies of heat-tinted austenitic stainless steel. *Materials Performance*. 2021. Vol. 60, no. 5. P. 42–47. URL: https://doi.org/10.5006/mp2021_60_5-42 (date of access: 17.01.2026).

27. Kearns J. R. The corrosion of heat tinted austenitic stainless alloys. *Corrosion*. 1985. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.5006/c1985-85050> (date of access: 17.01.2026).
28. Zhang Z., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L., Zhou C. Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 404. P. 110–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.252> (date of access: 17.01.2026).
29. Hinds G., Wickström L., Turnbull A. Influence of weld preparation procedure and heat tinting on sulfide stress corrosion cracking of duplex stainless steel. *Corrosion*. 2015. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.5006/c2015-06084> (date of access: 17.01.2026).
30. Schricker K., Baumann A., Bergmann J. P. Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021. Vol. 5, no. 4. 139. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139> (date of access: 17.01.2026).
31. Chen K., Hu Z. H., Huang R., Li M. X., Xiao R. S. Outflow Forms of Shielding Gas in Laser Welding by Schlieren. *Journal of Beijing University of Technology*. 2007. Vol. 33, no. 12. P. 1340-1344. URL: <https://journal.bjut.edu.cn/bjgydxxb/en/article/pdf/preview/10.3969/j.issn.0254-0037.2007.12.020.pdf> (date of access: 17.01.2026).
32. Zou J., Xie S., Kong H., Liu T., Fang C., Wu Q. Active control effect of shielding gas flow on high-power fiber laser welding plume. *Journal of Laser Applications*. 2024. Vol. 36, no. 3. 032011. URL: <https://doi.org/10.2351/7.0001407> (date of access: 17.01.2026).
33. Tani G., Ascari A., Campana G., Fortunato A. A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys. *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 254, no. 4. P. 904–907. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.067> (date of access: 17.01.2026).
34. Wang S., Zhou Y., Alam M. M., Yang H. Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26, no. 11. 115107. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4901969> (date of access: 17.01.2026).
35. Blackburn J., Allen C., Hilton P., Li L. Nd:YAG laser welding of titanium alloys using a directed gas jet. *Journal of Laser Applications*. 2010. Vol. 22, no. 2. P. 71–78. URL: <https://doi.org/10.2351/1.3455825> (date of access: 17.01.2026).
36. Vyskoč M., Sahul M., Dománková M., Jurči P., Sahul M., Vyskočová M., Martinkovič M. The effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of AW5083 aluminum laser weld joints. *Metals*. 2020.

Vol. 10, no. 11. 1443. URL: <https://doi.org/10.3390/met10111443> (date of access: 17.01.2026).

37. Hamadou M., Fabbro R., Caillibotte G., Chouf K., Briand F. Study of assist gas flow behavior during laser welding. *ICALEO 2002: 21st International Congress on Laser Materials Processing and Laser Microfabrication*. October 14–17, 2002 Scottsdale, Arizona, USA. URL: <https://doi.org/10.2351/1.5066140> (date of access: 17.01.2026).

38. Campana G., Ascari A., Fortunato A., Tani G. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases. *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255, no. 10. P. 5588–5590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.169> (date of access: 17.01.2026).

39. Grevey D., Sallamand P., Cicala E., Ignat S. Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2004. Vol. 37, no.8. P. 647–651. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.08.015> (date of access: 17.01.2026).

40. Elshawesh F., Elhoud A. Role of heat tint on pitting corrosion of 304 austenitic stainless steel in chloride environment (No. INIS-FR--3844). Societe de Chimie Industrielle (SCI), 28 Rue Saint Dominique, F-75007 Paris (France). 2004. URL: <https://inis.iaea.org/records/016t7-4rr25> (date of access: 17.01.2026).

41. Tran N., Nguyen V., Nguyen V., Trung T., DO, Nguyen V., Nguyen V. Effects of heat input and backing gas on bead geometry and weld heat tint in sanitary tube welding. *Thermo*. 2025. Vol. 5, no. 4. 49. URL: <https://doi.org/10.3390/thermo5040049> (date of access: 17.01.2026).

42. Ciofu F., Nioata A., Luca L. Duplex stainless steel corrosion resistance. *Fascicle of Management of Technological Engineering*. 2010. Vol. 9. URL: <https://imt.uoradea.ro/auo.fmte/files-2010-v2/TCM/Ciofu%20Florin%20L2.pdf> (date of access: 17.01.2026).

43. Olsson C., Landolt D. Passive films on stainless steels—chemistry, structure and growth. *Electrochimica Acta*. 2003. Vol. 48, no. 9. P. 1093–1104. URL: [https://doi.org/10.1016/s0013-4686\(02\)00841-1](https://doi.org/10.1016/s0013-4686(02)00841-1) (date of access: 17.01.2026).

44. Morcillo M., Díaz I., Cano H., Chico B., De La Fuente D. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 213. P. 723–737. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334> (date of access: 17.01.2026).

45. Aljohani T. A., Alateyah A., El-Sanabary S., El-Garaihy W. Corrosion of weldments. *Welding of Metallic Materials: Methods, Metallurgy, and Performance*. 2023. P. 565–588. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00010-9> (date of access: 17.01.2026).

46. Zhu L., Cui Z., Cui H., Wang X., Li Y. The effect of applied stress on the crevice corrosion of 304 stainless steel in 3.5 wt% NaCl solution. *Corrosion Science*. 2022. Vol. 196. 110039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.110039> (date of access: 17.01.2026).
47. Wang X., Sun Y., He P., Tan X., Zhou Q., Wu W., Lv C., Li J., Jiang Y. Understanding the pitting behavior of laser welds in different austenitic stainless steels: From the perspective of pitting initiation. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 224, 111483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111483> (date of access: 17.01.2026).
48. Sun L., Chen S., Qiu J., Zhao T. Research on the mechanism and detection method of intergranular corrosion of AISI 304 stainless steel by electrochemical techniques in heat exchanger equipment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 32, no. 2. P. 534–543. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07132-5> (date of access: 17.01.2026).
49. Kappes M. A. Localized corrosion and stress corrosion cracking of stainless steels in halides other than chlorides solutions: a review. *Corrosion Reviews*. 2019. Vol. 38, no. 1. P. 1–24. URL: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0061> (date of access: 17.01.2026).
50. Aghuy A. A., Zakeri M., Moayed M., Mazinani M. Effect of grain size on pitting corrosion of 304L austenitic stainless steel. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 94. P. 368–376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.02.024> (date of access: 17.01.2026).
51. Srinivasan N. Sensitization of Austenitic Stainless steels: current developments, trends, and future directions. *Metallography Microstructure and Analysis*. (2021). Vol. 10, no. 2. P. 133–147. URL: <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00724-y> (date of access: 17.01.2026).
52. Shit G., Mariappan K., Ningshen S. Improvement of sensitization and intergranular corrosion of AISI type 304L stainless steel through thermo-mechanical treatment. *Corrosion Science*. 2023. Vol. 213. 110975. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.110975> (date of access: 17.01.2026).
53. Vakili M., Koutnik P., Kohout J., Gholami Z. Analysis, assessment, and mitigation of stress corrosion cracking in austenitic stainless steels in the oil and gas sector: a review. *Surfaces*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 589–642. URL: <https://doi.org/10.3390/surfaces7030040> (date of access: 17.01.2026).
54. Derakhshan E. D., Yazdian N., Craft B., Smith S., Kovacevic R. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 104. P. 170–182. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.02.026> (date of access: 17.01.2026).

55. Vykhart B., Lingner M., Richter A. M., Hoops F. Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 111. P. 532–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085> (date of access: 17.01.2026).
56. Huang H., Tsutsumi S., Wang J., Li L., Murakawa H. High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2017. Vol. 135. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.004> (date of access: 17.01.2026).
57. Murakawa H. Residual stress and distortion in laser welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 2013. P. 374–400. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374> (date of access: 17.01.2026).
58. Liu Z., Jin X., Li J., Hao Z., Zhang J. Numerical simulation and experimental analysis on the deformation and residual stress in trailing ultrasonic vibration assisted laser welding. *Advances in Engineering Software*. 2022. Vol. 172. 103200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103200> (date of access: 17.01.2026).
59. Tayebi M., Soltani H. M., Rajaei A. Laser welding. In *IntechOpen eBooks*. 2022. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102456> (date of access: 17.01.2026).
60. Kumar B., Bag S., Mahadevan S., Paul C., Das C., Bindra K. On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 158–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009> (date of access: 17.01.2026).
61. Chiocca A., Frenzo F., Bertini L. Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 38. P. 447–456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045> (date of access: 17.01.2026).
62. Hummelshøj T. S., Christiansen T. L., Somers M. A. Lattice expansion of carbon-stabilized expanded austenite. *Scripta Materialia*. 2010. Vol. 63, no. 7. P. 761–763. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.05.031> (date of access: 17.01.2026).
63. Lin Y., Chou C. A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995. Vol. 48, no. 1–4. P. 693–698. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01710-i](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01710-i) (date of access: 17.01.2026).
64. Mandal N.R. Welding Residual Stress and Distortion. *Ship Construction and Welding. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping*. 2017. Vol. 2. Springer URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2955-4_17 (date of access: 17.01.2026).

65. Mohammed M. S., Hamdey M. D., Kareem A. H., Majdi H. S. Investigation of copper backing plate effects in stainless steel welding distortion, heat distribution, and residual stress. *International Journal of Heat and Technology*. 2024. Vol. 42, no. 4. P. 1434–1446. URL: <https://doi.org/10.18280/ijht.420433> (date of access: 17.01.2026).

Information about the author:

Yurchenko Yurii Viktorovich,

Postgraduate Student,

Lead Engineer at the Department

of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding,

E. O. Paton Electric Welding Institute

of the National Academy of Sciences of Ukraine,

11, Kazymyra Malevycha str., Kyiv, 03680, Ukraine

03

SECTION



INDUSTRIAL ENGINEERING

ОБҐРУНТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ НАРАЛЬНИКОВОГО СОШНИКА ПРОСАПНОЇ СІВАЛКИ ІЗ ЗМЕНШЕНИМ ТЯГОВИМ ОПОРОМ

Артеменко Д. Ю.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-7>

ВСТУП

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва в Україні, характеризується підвищеними вимогами до енергоефективності та якості виконання технологічних операцій, зокрема сівби просапних культур. Посів є однією з найвідповідальніших операцій технологічного процесу, оскільки саме на цьому етапі закладаються передумови для формування рівномірних сходів, оптимального розвитку рослин і майбутньої врожайності. Вирішальну роль у забезпеченні відповідності агротехнічним вимогам відіграють робочі органи просапних сівалок, зокрема сошники, які безпосередньо формують борозну для укладання насіння та забезпечують його загортання ґрунтом.

Наральниковий сошник є одним із найбільш поширених типів сошників для просапних сівалок завдяки простоті конструкції та здатності формувати чітку борозну заданої глибини. Водночас традиційні конструкції наральників характеризуються підвищеним тяговим опором, інтенсивним деформуванням ґрунту та нестабільністю параметрів борозни, особливо за змінних ґрунтових умов. Це негативно впливає на якість насінневого ложа, рівномірність розміщення насіння, як по довжині так і глибині борозни, та енергетичні показники роботи посівного агрегату.

Удосконалення конструкції наральника, з урахуванням закономірностей взаємодії робочої поверхні з ґрунтом, дозволить оптимізувати процес різання та переміщення ґрунтового шару, знизити енерговитрати та забезпечити стабільне формування борозни з рівним, ущільненим і вологим насінневим ложем. Таким чином, обґрунтування раціональної конструкції наральникового сошника із зменшеним тяговим опором є важливим напрямом підвищення ефективності сівби та забезпечення виконання агротехнічних вимог до посіву просапних культур.

1. Постановка проблеми

Під час роботи наральникового сошника одним із визначальних експлуатаційних показників є величина його тягового опору, яка безпосередньо впливає, як на енергетичні витрати посівного агрегату, так і на якість формування посівної борозни. Підвищений тяговий опір наральника зумовлюється особливостями його геометрії, кутами атаки робочих поверхонь, площею контакту з ґрунтом та характером деформації ґрунтового середовища в зоні різання і переміщення¹.

Найбільш розповсюджені наральникові сошники мають тупий кут входження в ґрунт і працюють на зминання ґрунту від дії робочих поверхонь наральника, причому чим більш неоднорідний ґрунт тим більше навантаження потрібно прикласти на сошник для його сталого руху². Тому, однією із основних проблем при збільшенні навантаження на сошник є надмірне ущільнення ґрунту в зоні дна та бокових стінок борозни. При значному тяговому опорі наральник інтенсивно стискає ґрунт, що призводить до утворення переущільненого шару, який погіршує водноповітряний режим насінневого ложа та ускладнює проростання кореневої системи рослин. У результаті формується борозна з нестабільною структурою, що не відповідає агротехнічним вимогам до посіву просапних культур.

Іншою проблемою, при посіві в неоднорідний ґрунт, є порушення геометрії борозни, зокрема нерівномірність її глибини та ширини. Зростання тягового опору спричиняє коливання сошника у вертикальній і горизонтальній площинах, особливо на полях з поганою підготовкою ґрунту. Це призводить до формування борозни з хвилястим дном, що унеможливує рівномірне розміщення насіння на заданій глибині.

Підвищений тяговий опір також сприяє інтенсивному переміщенню та розкиданню ґрунту в боки від борозни. У таких умовах верхній, більш сухий шар ґрунту часто зміщується в зону насінневого ложа, що погіршує контакт насіння з вологим ґрунтом і знижує польову схожість. Крім того, надмірне руйнування ґрунтової структури може призводити до утворення грудок, які ускладнюють рівномірне загортання насіння. Також, при підвищенні навантаження на сошник, зростає зношування робочих поверхонь наральника. При збільшенні тягового опору збільшується сила

¹ Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Лузан О.Р., Ковбаса В.П. Обґрунтування конструкції комбінованого наральника сошника просапної сівалки. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / ЦНТУ, Вип. 55, 2025. С. 121 – 133. URL: <https://zbmiksgm.kntu.kr.ua/pdf/55/13.pdf>

² Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії і розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2005. С. 141 – 142. URL: <https://studfiles.net/preview/5063474/page:25/>

тертя між металом і ґрунтом, що призводить до швидкої втрати початкової геометрії робочої поверхні наральника та погіршує якість формування борозни, що може знижувати польову схожість насіння на 5-12%³.

Таким чином, підвищений тяговий опір наральникового сошника є комплексною проблемою, яка одночасно погіршує енергетичні показники роботи сівалки та знижує якість формування борозни. Це обумовлює необхідність конструктивного вдосконалення наральника сошника з метою зменшення тягового опору, стабілізації параметрів борозни та забезпечення виконання агротехнічних вимог до посіву просапних культур. Зниження тягового опору на 25% дозволить сівалкам працювати на підвищених швидкостях 8-10 км/год без втрати якості посіву, зменшуючи при цьому витрати пального на 15-20% та підвищуючи продуктивність на 1,5 га/год⁴.

2. Аналіз конструктивних особливостей сошників просапних сівалок

Основна функція сошника, яку повинні забезпечувати його конструктивні параметри, полягає у формуванні борозни з якісним насіннєвим ложем, точному укладанні насіння та рівномірному його загортанні ґрунтом, що є визначальним чинником для ефективного проростання та формування дружніх сходів. Як свідчать дослідження⁵, успішність виконання якісного процесу формування борозни значною мірою зумовлена конструкцією сошника та фізіологічними особливостями проростання насіння. Тому забезпечення оптимальної щільності ґрунту в зоні загортання насіння та мінімальний тяговий опір самого сошника має надзвичайно важливе значення.

Для можливості обґрунтування основних конструктивних параметрів нового сошника просапної сівалки необхідно розглянути вже існуючі конструкції сошників та їх елементів, які забезпечують процес борозноутворення. Основними закордонними виробниками посівних машин, що представлені в Україні є всесвітньо відомі фірми такі, як Kverneland, Monosem, Gaspardo, Amazon, Kuhn та інші. Вітчизняний сектор

³ Artemenko D., Onopa V. Experimental researches of a precision seed drills coulter equipped with a disk seedbed former. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / ЦНТУ, Вип. 49, 2019. С. 10-18. URL: http://zbitniksgm.kntu.kr.ua/eng/archive/49/49_Artemenko_eng.html

⁴ Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / В.Ю.Льченко, П.І.Карасьов; за ред. В.Ю. Льченко. К.: Урожай, 1993. 288 с.

⁵ Дмитро Артеменко. Дослідження конструкційних параметрів елементів сошника для посіву просапних культур. Науково-технічні дослідження у галузі механічної інженерії та транспорту: колективна монографія; за заг. ред. А.А. Кашканова. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ: Видавець Кущнір Г.М. 2023. С. 72-110. URL: https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/mech_transport.pdf

посівних машин займають Elvorti, Фаворит, Ремсинтез. Всі ці виробники пропонують посівну техніку для посіву просапних культур, тому спочатку необхідно розглянути конструктивні особливості заводських сошників (рис. 1).



**Рис. 1. Сошники просапних сівалок які представлені в Україні:
1 – Kverneland; 2 – Monosem; 3 – Gaspardo; 4 – Amazon; 5 – Kuhn;
6 – Elvorti**

З (рис. 1) видно, що сошники для посіву просапних культур набули свого остаточного вигляду і мають практично однакову конструкцію. Але для можливості з'ясування переваг і недоліків цих сошників проведемо аналіз їх конструкцій.

Сошник фірми Kverneland⁶ (рис. 1.1), вирізняється масивним, широким корпусом та відносно низьким наральником із майже вертикальною передньою кромкою та клиновою нижньою основою. Така конструкція характерна для всіх сошників ковзаючого типу, де основне навантаження припадає на передню грань, що розрізає ґрунт. П'ята сошника має витягнуту, клинову форму таке виконання направлено на стабілізацію ходу в горизонтальній площині, що забезпечує утворення борозни із щільними стінками. Перевагою даної конструкції є висока стабільність глибини на легких та середніх добре підготовлених ґрунтах завдяки широкій опорній поверхні. Однак, практично вертикальний кут входження наральника в ґрунт створює значний лобовий опір та сприяє його зминанню попереду, що може призводити до утворення передсошникового пагорба та

⁶ KVERNELAND. Monopill – Mechanische Einzelkornsämaschine. Präzise Vereinzelnung – nicht nur bei Rüben. Kverneland Group Deutschland GmbH, 2017. 16p. URL: <https://www.kverneland.de/Saetechnik/Einzelkornsaeemaschinen/Kverneland-Monopill-Monopill-e-drive-II>

переуцільнення стінок борозни. Це може негативно вплинути на розвиток кореневої системи в посушливі періоди.

Сошник фірми Monosem⁷ (рис. 1.2), має характерний прямолінійно-криволінійний наральник невеликої ширини в передній частині із практично вертикальним носком, що плавно переходить у розширювану частину де кріпляться щоки. Трапецієподібна форма профілю дозволяє не тільки розрізати, а й розсовувати ґрунт, формуючи чітке клиноподібне ложе. Компактні розміри наральника свідчать про його орієнтацію на роботу в складі секцій із значним притискним зусиллям. Перевагою такої конструкції є гарне копіювання мікрорельєфу та здатність розрізати невеликі рослинні рештки без їх затягування в борозну. Головним недоліком є схильність до залипання внутрішньої порожнини вологим ґрунтом через відсутність зон самоочищення в місці стику наральника та щік. Також при роботі на високих швидкостях такий сошник може не тримати задану глибину посіву за рахунок піднімання в вертикальній площині, що порушує рівномірність висіву по глибині.

Конструкція наральника сошника фірми Gaspardo⁸ (рис. 1.3), має параболічну форму робочої поверхні з поступовим збільшенням кута атаки в нижній частині. Значна висота сошника забезпечує плавне заглиблення та мінімальне порушення структури верхнього шару ґрунту. Сошник має клинову нижню частину, яка утворює п'яту і формує насінневе ложе, така конструкція мінімізує об'єм переміщуваного в боки ґрунту та сприяє утворенню ущільнених стінок борозни. Ключова перевага такої конструкції сошника низька енергомісткість процесу формування борозни та якісне ущільнення дна борозни самою вагою секції без додаткового навантаження. Недоліком є слабка захищеність борозни від осипання сухого верхнього шару ґрунту, оскільки сошник під час формування практично не відводить його в бік від борозни. На погано підготовлених ґрунтах такий наральник може працювати нестабільно, вібруючи в сошниковій групі та потребує додаткового навантаження.

Сошник фірми Amazone⁹ (рис. 1.4), має ступінчасту конструкцію наральника, де чітко виділений носок із тупим кутом входження в ґрунт і винесений вперед відносно п'яти, яка і формує насінневе ложе та стінки борозни. Це дозволяє розділити процеси відкриття та безпосереднього

⁷ MONOSEM. The precision Planter specialist. MECA V4. Ribouleau MONOSEM – FRANCE, 2018. 24p. URL: <https://www.monosem.com/Range/Planter-range/MECA-V4>

⁸ Prospect of the GASPARDO Company. 2017. SP Range. Pneumatic precision seed drills. Italy. URL: <https://www.maschio.com/assets/Uploads/Leaflet-SP-RANGE-17-2017-09-W00230043R-EN.pdf>

⁹ Operating manual. AMAZONE. Precision airplanter. AMAZONEN-WERKE H. DREYER GmbH & Co. KG. Germany, 2017. 224p. URL: <http://et.amazone.de/files/pdf/mg5226.pdf>

формування борозни. Корпус наральника має посилені ребра жорсткості, що вказує на можливість висівати просапні культури по всьому діапазону глибин. Перевагою такого сошника є висока якість підготовки насінневого ложа: носок розкриває борозну, а п'ята ущільнює, створюючи контакт насіння з її дном. Недоліком є складність конструкції та підвищений опір сошника в задній частині за рахунок збільшення його шири при переході від наральника до щік. Також такий сошник має значну вагу, що може зміщувати центр мас посівної секції.

Сошник фірми Kuhn¹⁰ (рис. 1.5), має агресивну форму наральника у вигляді клину, як в горизонтальній так і вертикальній площинах, з крутим вигином носка та широкою п'ятою, причому п'ята в задній частині піднята вгору. Така конструкція сошника розрахована на максимальне витіснення ґрунту із зони висіву, а формування насінневого ложа відбувається невеликою ділянкою наральника в місці переходу передньої його частини в п'яту. Поверхня наральника має спеціальну термічну обробку для підвищення зносостійкості в зонах найбільшого тертя. Головна перевага такої конструкції, це здатність формувати широку і чисту борозну навіть за несприятливих умов. Проте велика ширина наральника призводить до високої витрати палива через підвищений тяговий опір. Також при роботі на легких піщаних ґрунтах такий сошник занадто сильно розкидає ґрунт, що може призводити до нерівномірного загортання борозни.

Сошник, виробника посівної техніки Elvorti¹¹ (рис. 1.6), має класичну килевидну конструкцію з наральником великого радіуса кривизни. Це традиційна конструкція для сівалок, що працюють за класичною технологією обробітку ґрунту. Наральник має довгу ріжучу кромку, що розподіляє знос по всій довжині робочої поверхні, а перехід від носка до п'яти виконаний плавно. Щоки сошника врізані в поверхню наральника і не виступають за неї, що не утворює перепадів товщини сошника між робочими поверхнями. Перевагою є простота виготовлення, низька ціна та гарна пристосованість до вологих умов (менше схильний до залипання у порівнянні з іншими розглянутими моделями). Недоліком є велика висота і довжина сошника, що може погіршувати тягові характеристики сівалки та призводити до виносу вологого ґрунту на поверхню, що провокує його швидке висихання. Також такий сошник може погано тримати глибину на переущільнених ділянках.

¹⁰ Prospect of the Kuhn Company. 2015. Planter 3. Precision seed drills. Kuhn farm machinery (UK). URL: <http://www.kuhn.co.uk/uk/range/seeding/pneumatic-precision-seed-drills/planter-3-m-single-bar.html>

¹¹ Product Catalog. Technology in harmony with the nature. Elvorti – Chervona zirka. Ukraine, 2016. 20p. URL: https://www.elvorti.com/content/pdf/2016/KATALOG_2016_EN_SITE.pdf

Таким чином, якщо підсумувати розгляд конструкцій існуючих сошників то можна сказати, що:

більшість розглянутих моделей (зокрема Kverneland та Kuhn) мають суттєвий лобовий опір через конструкцію передньої частини наральника яка забезпечує початок формування борозни. Це призводить до надмірного зминання ґрунту попереду сошника, утворення передсошникового пагорба та переуцільнення стінок борозни, що може заважати нормальному розвитку кореневої системи рослин;

конструкції з короткими наральниками або складною внутрішньою геометрією (Monosem, Amazone) схильні до залипання вологим ґрунтом та забивання пожнивними рештками. Це порушує технологічний процес висіву та вимагає частих зупинок агрегату для очищення робочих органів;

моделі з великою довжиною (Elvorti) або параболічною формою без вираженого опорного носка (Gaspardo) демонструють незадовільну стабільність глибини на твердих або нерівномірно ущільнених ґрунтах. Виникає ефект підняття сошника на високих швидкостях, що призводить до нерівномірних сходів через різну глибину розміщення насіння;

в ряді конструкцій (зокрема Gaspardo) спостерігається недостатній захист борозни від осипання сухого верхнього шару ґрунту на її дно до моменту падіння насіння. Це перешкоджає контакту насіння з вологим шаром, що є критичним фактором у посушливих умовах посівної кампанії.

Роботи над вдосконаленням конструкцій класичних сошників просапних сівалок проводились сучасними дослідниками, тому необхідно також розглянути їх конструкції.

Так, в роботі¹² пропонується удосконалений сошник просапної сівалки (рис. 2), конструкція якого базується на використанні комбінованого наральника, що поєднує декілька функціональних зон: у передній частині розташований вертикальний носок із гострим кутом входження, середня частина має клиноподібну форму з гострим верхнім та тупим нижнім кутами, а задня частина завершується спеціальною п'ятою для ущільнення насінневого ложа. Верхня частина наральника в горизонтальній площині загострена під кутом, меншим за кут тертя ґрунту об сталь. Така багатоступенева архітектура забезпечує послідовне розрізання, розсування та формування борозни.

Головною перевагою технічного рішення є висока стабільність глибини ходу при роботі на нерівномірно ущільнених ґрунтах. Завдяки вертикальному носку сошник легко розрізає ґрунт, знижуючи тяговий

¹² Патент України № 136252. Д.Ю. Артеменко, В.А. Мажара, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов, В.Ю. Ахмадієва. Сошник. МПК А01С7/20 (2006.01). № u201902037/UA; Заявл. 28.02.2019; Опубл. 12.08.2019; Бюл. № 15. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1373323/>

опір, а клиновидна середня частина ефективно відводить верхні шари в обидва боки, усуваючи утворення передсошникового пагорба. П'ята з тупим кутом забезпечує якісне формування ложа для насіння, а нахил робочих поверхонь сприяє самоочищенню робочого органу від вологого ґрунту та рослинних решток.

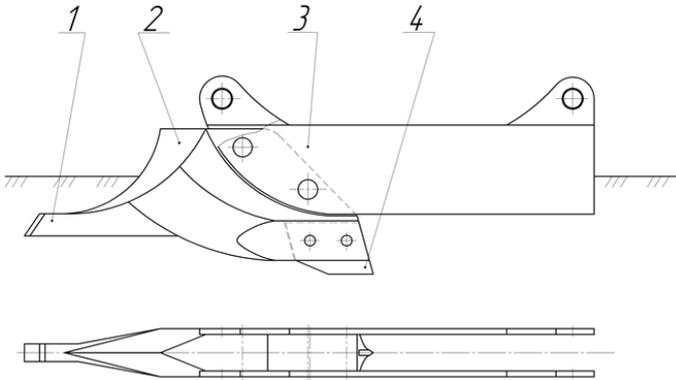


Рис. 2. Патент UA 136252: 1 – носок; 2 – поверхня відкидання; 3 – п'ята; 4 – шoki

Основним недоліком цієї конструкції є підвищена чутливість до точності кутів заточування робочих поверхонь, оскільки відхилення від кута тертя може призвести до залипання або надмірного змінання ґрунту. Складна геометрія середньої частини, де поєднуються гострі та тупі кути, створює додаткові труднощі при виготовленні та відновленні робочого органу в умовах ремонтних майстерень. Крім того, наявність вертикального носка може сприяти швидшому зносу передньої кромки при роботі на щільних ґрунтах.

Запропонована в¹³, конструкція сошника (рис. 3) оснащена комбінованим клиновим наральником, де верхня (більша) частина має гострий кут входження в ґрунт, а нижня частина та задня п'ята тупий. Особливістю є те, що в горизонтальній площині наральник загострений під кутом, меншим за кут тертя ґрунту об сталь. Така геометрична схема спрямована на активне розрізання шару ґрунту вертикальною кромкою та одночасне формування ущільненого дна борозни.

¹³ Патент України № 133540. Артеменко Д.Ю., Свірень М.О., Онопа В.А., Комар Я.М. Сошник. МПК А01С7/20 (2006.01). № u201811332/UA; Заявл. 19.11.2018; Опубл. 10.04.2019; Біол. № 7. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1344841/>

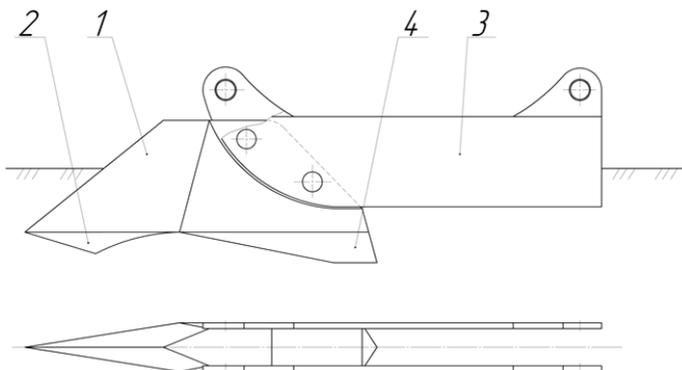


Рис. 3. Патент UA 133540: 1 – верхня робоча поверхня; 2 – нижня робоча поверхня; 3 – щоки; 4 – п’ята

Перевагою конструкції сошника є повне усунення ефекту передсошникового пагорба, оскільки загострена верхня частина відводить ґрунт безпосередньо в обидва боки від борозни. Використання гострого кута у верхній частині значно полегшує рух сошника, а тупий кут п’яти гарантує стабільне формування щільного насінневого ложа на заданій глибині. Сошник демонструє практичну здатність до самоочищення від забур’яненості та вологого ґрунту завдяки правильному підбору кутів атаки.

Основним недоліком такої конструкції може бути висока інтенсивність зносу нижньої частини з тупим кутом входження, оскільки вона сприймає найбільші навантаження при ущільненні дна борозни. Окрім того, відсутність плоского опорного носка (як у попередніх моделях) робить цей сошник більш залежним від стабільності копіювальних коліс секції сівалки для тримання заданої глибини на нерівному рельєфі. Також через гостру вертикальну кромку конструкція може бути чутливою до бічних відхилень при зустрічі з великим корінням або камінням.

В роботі¹⁴, автори пропонують конструкцію сошника (рис. 4), яка базується на використанні багатофункціонального наральника, розділеного на три ключові зони: передню клинову частину з тупим кутом входження, середню частину з плоскою основою в горизонтальній площині та задню нижню частину, що завершується клинковою п’ятою. Важливою особливістю є загострення верхньої частини наральника в горизонтальній

¹⁴ Патент України № 150808. Артеменко Д.Ю., Шепілова Т.П., Мажара В.А., Нестеренко О.В., Богатирьов Д.В., Онопа В.А.. Сошник. МПК А01С 5/06, А01С 7/20 (2006.01). № u202106879/UA; Заявл. 02.12.2021; Опубл. 20.04.2022; Бюл. № 16. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1686437/>

площині під кутом, що менший за кут тертя сталі об ґрунт. Така конструкція наральника сошника дозволяє послідовно виконувати розрізання пласта, його ущільнення та безпосереднє формування насінневого ложа.

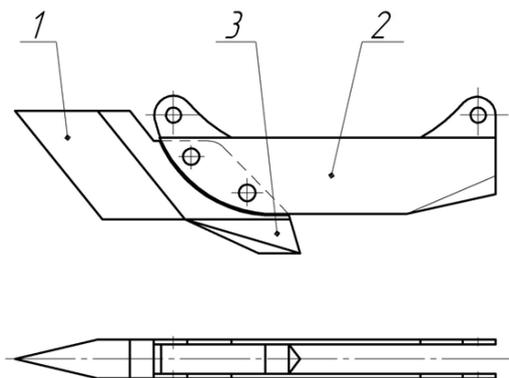


Рис. 4. Патент UA 150808: 1 – робоча поверхня; 2 – шокки; 3 – п’ята

Головною перевагою запропонованого технічного рішення є ефективне запобігання утворенню передсошникового пагорба за рахунок активного відведення ґрунту клиновою поверхнею в обидва боки. Плоска основа середньої частини сошника стабілізує рух по глибині та проводить попереднє ущільнення нижніх шарів, створюючи умови для рівномірного ходу п’яти. Комбінація цих елементів разом із властивістю самоочищення при підвищеній вологості забезпечує мінімальний тяговий опір та формування чітко окресленого клинового ложа для якісного контакту насіння з ґрунтом.

Основним недоліком конструкції у загальному випадку є використання тупого кута входження в передній частині, що на дуже переущільнених або сухих ґрунтах може призводити до підвищеного зминання ґрунту замість його чистого розрізання. Складна геометрія, що поєднує клинові та плоскі поверхні, ускладнює технологічний процес виготовлення та відновлення робочого органу при зносі. Крім того, плоска основа середньої частини може створювати додатковий опір при роботі на важких глинистих ґрунтах, потенційно виштовхуючи сошник на поверхню при високій швидкості посіву.

З метою усунення негативного впливу верхніх шарів ґрунту на процес посіву Цимбалом А.Г.¹⁵, запропонована конструкція сошника

¹⁵ Патент України № 159673. Цимбал А.Г., Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Онопа В.А., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Сошник. МПК А01С 7/20 (2006.01). № u202401264/UA; Заявл. 11.03.2024; Опубл. 26.06.2025, Бюл.№ 26. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1862713/>

з використанням комбінованого наральника (рис. 5), що поєднує в собі робочі поверхні з різною геометрією. Верхня частина виконана у вигляді двогранного похилого клину з гострим кутом входження в ґрунт, що доповнюється плоским носком у передній частині. Нижня частина плавно переходить у п'яту з тупим кутом входження, при цьому ширина основи верхнього клину перевищує ширину борозни.

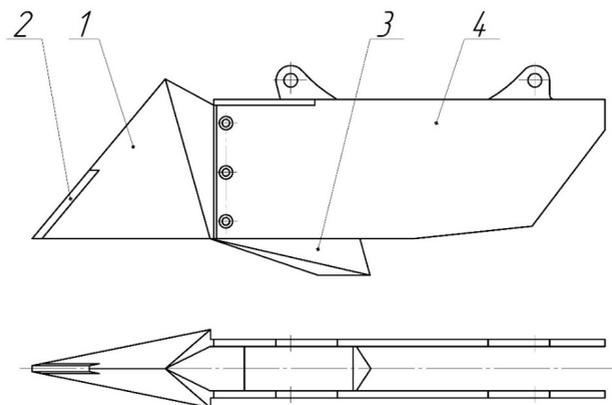


Рис. 5. Патент UA 159673: 1 – робоча поверхня; 2 – плоский носок; 3 – п'ята; 4 – шок

Головною перевагою такої схеми є якісне розділення ґрунтових шарів: гострий клин ефективно відкидає сухий верхній шар убік, запобігаючи його осипанню на дно борозни. Плоский носок разом із широкою основою забезпечують високу стабільність глибини ходу навіть на ущільнених ділянках, що гарантує рівномірність загортання насіння. Крім того, нахил робочих площин під кутом, меншим за кут тертя сталі об ґрунт, сприяє самоочищенню робочого органу та знижує загальний енергетичний опір під час посіву.

Основним недоліком даної конструкції є підвищена складність виготовлення комбінованого наральника порівняно з традиційними однорідними конструкціями. Складна геометрія з наявністю перехідних зон між плоским носком, двограним клином та п'ятою може призводити до нерівномірного зносу робочих поверхонь у зонах концентрації напружень при роботі на абразивних ґрунтах. Також збільшена ширина верхньої частини наральника може підвищувати чутливість сошника до великої кількості рослинних решток на поверхні поля.

В роботі¹⁶, пропонується удосконалена конструкція сошника (рис. 6), яка базується на використанні комбінованого наральника, що розділений на три функціональні зони: середню, верхню та задню нижню. Середня частина з носком має гострі кути входження в обох площинах, тоді як верхня частина (поверхня відкидання) характеризується подвоєним кутом атаки для інтенсивного відведення ґрунту. Задня частина завершується клинвою п'ятою з тупим кутом входження, причому товщина передніх сегментів у два рази менша за товщину п'яти, а за загостреним носком передбачена спеціальна порожнина.

Ключовою перевагою технічного рішення є ефективний пошаровий обробіток ґрунту, гострий носок розрізає пласт, а верхня поверхня відкидає сухий шар вбік, запобігаючи його просипанню на дно борозни. Наявність порожнини за носком суттєво знижує тяговий опір та перешкоджає налипанню вологого ґрунту на п'яту, що забезпечує стабільність глибини ходу та якісне ущільнення насінневого ложа. Крім того, нахил усіх робочих поверхонь під кутом, меншим за кут тертя сталі об ґрунт, гарантує високу здатність робочого органу до самоочищення.

Основним недоліком конструкції є її технологічна складність, зумовлена різною товщиною елементів та специфічною геометрією зон переходу, що здорожує процес виробництва.

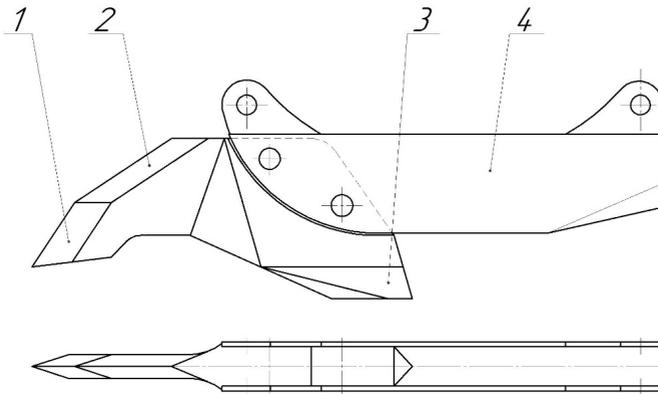


Рис. 6. Патент UA 161657: 1 – носок; 2 – поверхня відкидання; 3 – п'ята; 4 – щоки

¹⁶ Патент України № 161657. Артеменко Д.Ю., Онопа В.А., Лузан П.Г., Муленко К.А. Сошник. МПК А01С 7/20 (2006.01). № u202501031/UA; Заявл. 11.03.2024; Опубл. 25.12.2025, Біол.№ 52. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891976/>

Також наявність порожнини одразу за носком може стати місцем накопичення рослинних решток при роботі на полях з високим рівнем забур'яненості або після жнив, що потенційно призведе до забивання сошника. Змінна товщина наральника також може провокувати концентрацію напружень у металі, що знижує загальний ресурс деталі при роботі на важких або кам'янистих ґрунтах.

Узагальнюючи результати аналізу, як серійних зразків провідних світових брендів так і патентної документації на нові розробки, можна виділити системні недоліки наральникових сошників, які розподіляються за технологічними, агротехнічними та експлуатаційними ознаками. Основною проблемою більшості серійних конструкцій (Kverneland, Kuhn, Elvorti) залишається незадовільна якість формування борозни при поганій підготовці ґрунту. Через тупі кути входження в ґрунт відбувається його зминання та підгортання попереду сошника. Це спричиняє просипання сухого верхнього шару ґрунту на дно борозни ще до потрапляння туди насіння, що розриває контакт насінини з вологим насінневим ложем і знижує польову схожість. Крім того, конструкції без спеціалізованих ущільнювачів не забезпечують необхідної щільності дна борозни.

Розглянуті конструкції часто мають значний питомий тяговий опір. У серійних зразках це зумовлено великою площею лобового перерізу наральника. У запатентованих нових моделях, попри гострі кути входження, проблемою може бути «ефект присмоктування» або підвищене тертя у зонах переходу між різними функціональними гранями (наприклад, між плоским носком і клиновою основою). Також для моделей із великою довжиною наральника характерна нестабільність глибини ходу (піднімання) на високих швидкостях посіву.

Спільним недоліком вдосконалених патентних розробок є їхня висока технологічна складність. Виготовлення комбінованих наральників із трьома і більше робочими зонами, різною товщиною елементів та специфічними кутами заточування (меншими за кут тертя) вимагає високої точності виробництва та дорогого обладнання. Крім того, наявність технологічних порожнин або складних переходів геометрії сприяє накопиченню вологого ґрунту та рослинних решток. Через складну форму різні частини наральника зношуються з різною інтенсивністю (найбільше передній носок та задня п'ята), що швидко виводить із ладу весь дорогий робочий орган.

Для імпортних серійних сошників (Monosem, Amazone, Gaspardo) головним недоліком є висока вартість володіння самою сівалкою, складність налаштування електронних та механічних систем дозування в польових умовах, а також низька ремонтпридатність наральників, які

зазвичай є цільнолитими та не передбачають часткового відновлення. Вітчизняні аналоги, навпаки, часто мають недостатню зносостійкість матеріалів, що нівелює їх перевагу в ціні через часті заміни.

3. Вирішення проблеми

Для можливості конструктивного обґрунтування нової конструкції сошника з наральником який має зменшений тяговий опір були визначені основні технологічні операції які він повинен виконувати (рис. 2).



Рис. 7. Схема виконання технологічного процесу удосконаленим сошником просапної сівалки

З метою реалізації наведених на (рис. 7) технологічних операцій була розроблена удосконалена конструкція сошника просапної сівалки. Новий

сошник має комбінований наральник, який складається із двох робочих частин, верхня частина, клиновий носок, призначена для відкриття і відведення сухого ґрунту в бік від борозни та має в вертикальній і горизонтальній площині гострий кут входження в ґрунт, нижня частина, п'ята, із тупим кутом входження в ґрунт, призначена для формування ущільнених стінок борозни і насінневого ложа, причому верхня і нижня частини наральника в вертикальній площині однакові, а носок наральника має ширину на 10% більшу за товщину сошника, нижня кромка носка має підйом в горизонтальній площині, а всі робочі частини наральника нахилені під кутом меншим кута тертя ґрунту по сталі.

На (рис. 8) показана фронтальна і горизонтальна проекція удосконаленого сошника.

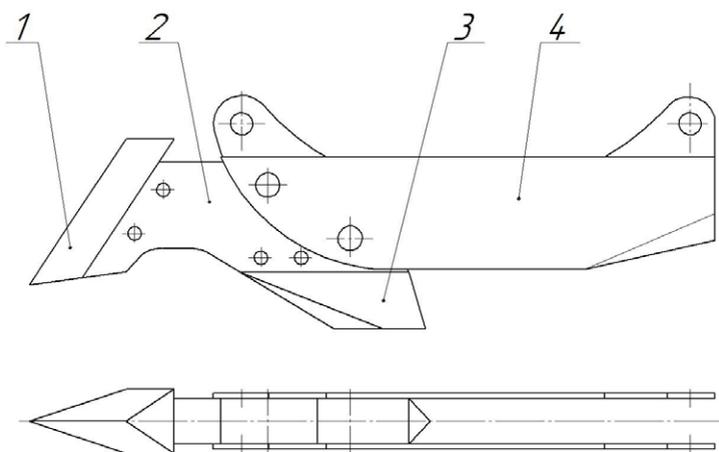


Рис. 8. Сошник із зменшеним тяговим опором: 1 – клиновий носок; 2 – наральник; 3 – п'ята; 4 – щок

Запропонований сошник працює наступним чином: рухаючись на глибині посіву верхня частина наральника у вигляді клинового носка 1, який має в вертикальній і горизонтальній площині гострий кут входження в ґрунт розрізає його і розсуває в боки, а частину піднімає і відводить в бік від рядка. Носок 1, за рахунок гострих кутів входження в ґрунт не тільки полегшує рух сошника, а і усуває перешкоди тримаючи задану глибину ходу. За рахунок підйому в нижній частині, взаємодія носка з ґрунтом відбувається по кромкам клинової поверхні. Оскільки ширина носка більша за ширину сошника то навантаження і опір ґрунту переважно

розподіляються на його поверхні. Під час руху в ґрунті носок також порушує бічні шари навколо сошника тим самим зменшує сили тертя по задній частині наральника 2 і щокам сошника 4. Рухаючись нижче, клинова п'ята 3, в задній частині утворює насінневе ложе для рівномірного розміщення насіння по глибині і довжині рядка. За рахунок того, що п'ята рухається у вже відкритій борозні зменшується її тяговий опір. Щоки сошника 4 утримують ґрунт поки насіння не потрапить на дно борозни, а потім закривають його шаром волого ґрунту.

Ефективність роботи сошника забезпечується такими факторами:

завдяки клиновому носку наральника з гострим кутом входження в ґрунт та збільшеній відносно самого сошника ширині опір сошника мінімальний, а рух в вертикальній площині рівномірний. Розміщена в задній частині наральника п'ята із тупим кутом входження ґрунт забезпечує формування насінневого ложа для рівномірного розміщення насіння по глибині;

за рахунок клинового носка з гострим кутом в ходження в ґрунт в горизонтальній площині, запропонований сошник забезпечує рівномірний рух по глибині рядка та відведення верхніх сухих шарів ґрунту в бік від борозни, а при потраплянні на перешкоди і ущільнені ділянки ґрунту руйнує їх. При цьому при підвищенні вологості ґрунту конструкція сошника сприяє його самоочищенню.

З метою визначення тягового опору удосконаленого наральника сошника, побудуємо математичну модель, яка базується на його геометричних параметрах та фізико-механічних властивостях ґрунту. Для складання математичної моделі взаємодії сошника з ґрунтом необхідно розглянути сумарний тяговий опір R_c , який дорівнює сумі сил опору, що виникають на кожному конструктивному елементі (носок, п'ята та щоки) під час виконання технологічної операції.

Введемо позначення для всіх параметрів, що характеризують конструктивні особливості нового наральника (рис. 9). Геометричні параметри удосконаленого наральника в метрах: H – глибина посіву (глибина розміщення насіння); h – глибина ходу носка; h_1 – глибина руху п'яти; L – довжина сошника; l – довжина наральника; l_1 – довжина контакту носка з ґрунтом; l_2 – довжина п'яти по якій формується насінневе ложе; l_3 – довжина п'яти; \square – товщина носка; b_1 – товщина сошника; b_2 – ширина наральника; α – кут атаки носка сошника; β – кут атаки п'яти сошника; γ – кут атаки носка в горизонтальній площині, δ – кут розхилу п'яти в вертикальній площині.

Фізико-механічні властивості ґрунту які впливають на умови роботи наральника: k – питомий опір ґрунту (опір різанню та деформації), [Па];

$q_{уц}$ – опір ґрунту ущільненню, [Па]; $p_{уц}$ – середній бічний тиск ґрунту на бічну поверхню сошника, [Па]; ϕ – кут тертя ґрунту по сталі, [град], коефіцієнт тертя $f = tg\phi$; ρ – щільність ґрунту, [г/см³]; V_c – швидкість руху сошника, [м/с]; g – прискорення вільного падіння, [м/с²].

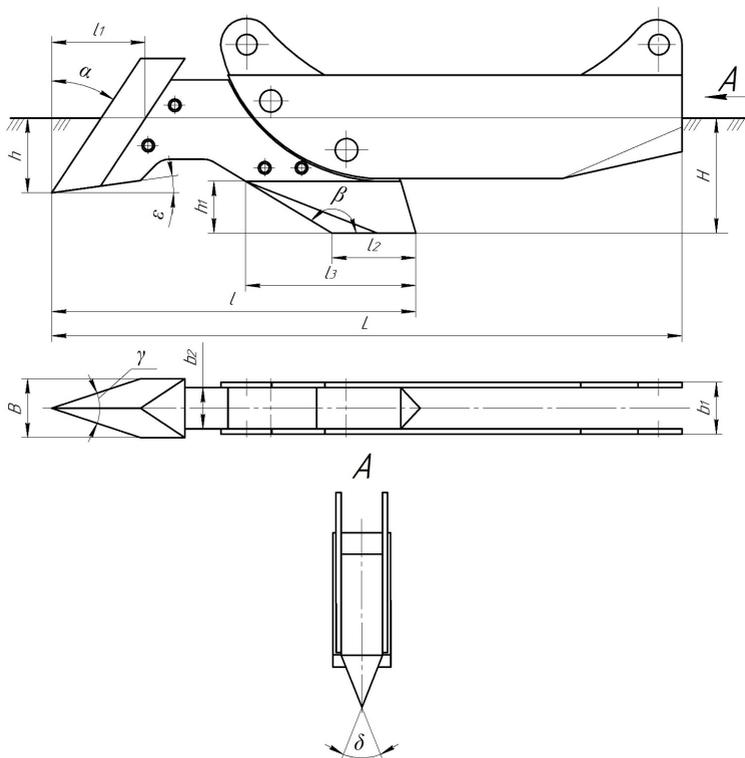


Рис. 9. Схема конструктивних параметрів сошника які впливають на тяговий опір

Загальний тяговий опір сошника R_z визначається, як сума чотирьох основних компонентів:

$$R_z = R_n + R_n + R_{уц} + R_v, \quad (1)$$

де: R_n – опір клинового носка (різання та розсування ґрунту);
 R_n – опір п'яти (ущільнення стінок і насінневого ложа);

$R_{ш}$ – опір тертя на бічних поверхнях (щоках);

R_v – динамічний опір відкидання ґрунту.

Визначаємо опір клинового носка наральника сошника. Носок виконує основну роботу з руйнування цілісності ґрунту, а оскільки ширина носка B на 10% більша за товщину сошника b_1 , основне навантаження зосереджується саме тут, полегшуючи рух наступних частин сошника. Носок має гострі кути входження в ґрунт α (вертикальний) та γ (горизонтальний), а його опір залежить від питомого опору ґрунту k :

$$R_{ш} = k \cdot B \cdot h \cdot \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\phi)} \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (2)$$

Питомий опір ґрунту k є інтегральним показником, який показує, яка сила потрібна для вирізання та деформації пласта ґрунту площею поперечного перерізу в 1м^2 в нашому випадку (1см^2). Для розрахунку k необхідно врахувати два основні аспекти: властивості самого ґрунту та геометрію носка наральника.

Питомий опір ґрунту k залежить від внутрішніх сил зчеплення ґрунту: опору розриву зв'язків між частинками, опору переміщенню часток одна відносно одної (кут внутрішнього тертя) та кута тертя ґрунту по сталі.

Геометрія робочого органу має вплив на зменшення величини k за рахунок: гострого кута атаки носка α , який забезпечує легке входження в ґрунт у вертикальній площині, гострого кута γ у горизонтальній площині, який забезпечує розрізання та розсування ґрунту в боки та ширини носка B , оскільки носок ширше за сошник і в процесі роботи основні сили зосереджені саме на ньому то, це знижує сумарний опір за рахунок зменшення тертя задніх частин поверхонь сошника.

Для клинового носка наральника, теоретичне значення k можна визначити через коефіцієнт об'ємного стиснення та кути нахилу поверхонь:

$$k = \sigma_0 \cdot \left(1 + \text{tg}(\alpha + \phi) \cdot \text{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right), \quad (3)$$

де σ_0 – гранична напруга руйнування ґрунту при прямому стисненні;

$\text{tg}(\alpha + \phi)$ – характеризує, як кут нахилу носка α та тертя ϕ збільшують необхідне зусилля, оскільки α гострий, значення тангенса буде мінімальним;

$\text{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)$ – враховує розхил носка в горизонтальній площині, чим гостріший кут γ , тим меншим є питомий опір k .

Питомий опір ґрунту k також залежить від швидкості руху сошника V_c і має властивість зростати в залежності від властивостей ґрунту:

$$k_o = k + c \cdot V_c^2, \quad (4)$$

де c – коефіцієнт, що враховує відкидання ґрунту та його щільність ρ .

Параметр σ_0 (гранична напруга руйнування ґрунту при прямому стисненні) є фундаментальною характеристикою в механіці ґрунтів¹⁷ і визначається через два основні параметри:

$$\sigma_0 = 2c \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\phi_1}{2} \right), \quad (5)$$

де c – питома зчеплення ґрунту;

ϕ_1 – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Залежність (5) показує максимальну вертикальну напругу, яку може витримати ґрунт без бічної підтримки (як це відбувається при роботі носка сошника, коли він врізається в масив). Якщо ґрунт піщаний (зчеплення $c \approx 0$), то σ_0 прямує до нуля. Якщо ґрунт глинистий (зчеплення високе), σ_0 стає основним фактором опору. Також потрібно враховувати, що σ_0 суттєво зменшується при збільшенні вологості ґрунту (значення може зменшуватись в 1,5-2 рази).

Опір п'яти R_n (ущільнення стінок і насінневого ложа) дещо знижений, оскільки вона рухається у вже частково відкритій носком борозні. Насінневе ложе формується шляхом ущільнення ґрунту. Використання в конструкції п'яти з тупим кутом β забезпечує необхідне питома навантаження для створення ущільнених стінок і ложа, що критично для контакту насіння з вологою. Тоді опір R_n залежить від параметра q_{yuc} (опір ущільненню) та кута β :

$$R_n = q_{yuc} \cdot b_2 \cdot h_1 \cdot \operatorname{tg}(\beta - \phi). \quad (6)$$

Визначення питомого опору ґрунту ущільненню q_{yuc} є ключовим для розрахунку параметрів п'яти сошника (поз. 3, рис. 8). На відміну від носка, який розрізає ґрунт, п'ята має тупий кут атаки β , що створює нормальний тиск на дно борозни для формування насінневого ложа. Теоретично

¹⁷ Костюченко М.М. Механіка ґрунтів: навчальний посібник / М.М. Костюченко. Інтернетресурс Київського університету. geol.univ@kiev.ua. 116с. [Електронний ресурс]. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/mehanika_gruntiv.pdf

$q_{\text{уц}}$ розраховується через модель об'ємного стиснення або через теорію граничної рівноваги ґрунту.

Тому, оскільки п'ята має тупий кут β то теоретичне значення $q_{\text{уц}}$ в робочій зоні також залежить від того, як сила тяги перерозподіляється у вертикальний тиск:

$$q_{\text{уц}} = \frac{F_T}{b_2 \cdot l_3 \cdot \text{ctg}\beta}, \quad (7)$$

де F_T – сила тяги, яка діє на п'яту;

b_2 – ширина п'яти;

l_3 – довжина п'яти, по якій формується ложе;

$\text{ctg}\beta$ – котангенс кута атаки. Оскільки β тупий ($> 90^\circ$), це створює значне вертикальне зусилля вниз, що і забезпечує ущільнення.

Згідно з агровимогами раціональним буде такий підбір параметра $q_{\text{уц}}$, при якому створюється тиск, що дорівнює 0,05 – 0,1 МПа, при таких значеннях забезпечується капілярний підйом вологи до насіння, але не створюється надмірного тягового опору R_n .

Сила тяги п'яти сошника F_T , є горизонтальною складовою реакції ґрунту, що виникає в процесі формування насінневого ложа. На відміну від носка, який розрізає ґрунт, п'ята працює в режимі змину та ущільнення. Оскільки п'ята рухається в борозні, вже відкритій носком, то її основне завдання, це ущільнити дно на глибину h_1 . Опір R_n виникає через необхідність подолати опір ґрунту стисненню $q_{\text{уц}}$ та сили тертя робочої поверхні об ґрунт. Для комбінованого наральника з тупим кутом атаки β , сила тяги п'яти F_T визначається наступним чином:

$$F_T = F_B \cdot \text{tg}(\beta - 90^\circ + \phi), \quad (8)$$

де F_B – вертикальне навантаження, яке діє на сошник (від пружини або ваги).

Таким чином, для зменшення значень тягового опору п'яти R_n необхідно:

дотримання умови ($\beta - 90^\circ < \phi$), що дозволяє уникнути нагортання ґрунту перед п'ятою (ефект валка) і забезпечує плавне ковзання з ущільненням;

дотримання високої якості робочих поверхонь оскільки зменшення ϕ безпосередньо знижує тяговий опір;

вибір правильної ширини п'яти наральника сошника, ширина п'яти b_2 повинна бути мінімально достатньою для розміщення насіння, щоб не створювати зайвого опору.

Розрахуємо складову опору тертя по щоках R_{μ} . Опір тертя виникає на бічних поверхнях щік сошника, які утримують стінки борозни від осипання ґрунту. Завдяки конструктивному рішенню ($B > b_1$), бічний тиск $p_{\gamma\mu}$ суттєво зменшується, тоді:

$$R_{\mu} = 2 \cdot f \cdot p_{\gamma\mu} \cdot S_{\mu}, \quad (9)$$

де S_{μ} – ефективна площа контакту щік з ґрунтом.

Для визначення динамічної складово тягового опору R_v , необхідно враховувати енергію, що витрачається на відкидання частинок ґрунту вбік при високих швидкостях руху V_c :

$$R_v = \rho \cdot B \cdot h \cdot V_c^2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (10)$$

Параметр ρ характеризує масу ґрунту, яку сошник змушений переміщувати щосекунди.

Об'єднавши всі складові, отримуємо залежність для визначення тягового опору удосконаленого сошника:

$$R_z = \left[k \cdot B \cdot h \cdot \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\phi)} \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right] + [q_{\gamma\mu} \cdot b_2 \cdot h_1 \cdot \text{tg}(\beta - \phi)] + [2 \cdot f \cdot p_{\gamma\mu} \cdot S_{\mu}] + \left[\rho \cdot B \cdot h \cdot V^2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right]. \quad (11)$$

На основі проведеного теоретичного аналізу та розробки математичної моделі взаємодії удосконаленого сошника з ґрунтом, можна сказати, що:

розділення функцій наральника на дві спеціалізовані зони гострий клиновий носок для розрізання та початку формування борозни та п'яту із тупим кутом входження в ґрунт для формування насінневого ложа дозволяє оптимізувати енерговитрати. Оскільки п'ята рухається у вже розпушеній борозні, загальний тяговий опір R_z знижується порівняно з суцільними конструкціями, при цьому забезпечується якісне формування насінневого ложа;

встановлено, що критично важливим параметром є перевищення ширини носка над товщиною сошника на 10%, це створює технологічний зазор між стінками борозни та щоками сошника, що суттєво мінімізує опір тертя R_{μ} і запобігає заклинюванню робочого органу в переущільнених або вологих шарах ґрунту;

для забезпечення ефекту самоочищення та стабільної глибини ходу, кути атаки носка α і γ повинні бути гострими і меншими за кут тертя ґрунту об сталь ($\phi \approx 28 - 30^\circ$). Водночас, використання тупого кута атаки п'яти β є раціональним для створення необхідного нормального тиску q_{ynt} на дно борозни, що гарантує капілярне підняття вологи до насіння;

запропонована математична модель (зал. 11) дає змогу теоретично розрахувати необхідне тягове зусилля залежно від типу ґрунту (через показники k та q_{ynt}) та швидкості руху V_c . Це дозволяє ще на етапі проектування підбирати параметри сошника так, щоб забезпечити мінімальну енергоємність посіву при дотриманні агротехнічних вимог до підготовки насінневого ложа.

З метою отримання раціональних параметрів робочих поверхонь удосконаленого наральника сошника просапної сівалки необхідно провести графічне дослідження отриманих залежностей.

На (рис. 10) наведена графічна залежність впливу кута атаки клинового носка на його тяговий опір. Як видно із графіка зі збільшенням кута атаки носка наральника сошника α його тяговий опір зростає нелінійно для всіх режимів швидкості на яких працює сошник. При цьому, підвищення швидкості призводить до паралельного зсуву кривих вгору, а при $\alpha > 35^\circ$ спостерігається різке зростання опору через збільшення нормального тиску ґрунту на поверхні носка.

Таким чином, можна сказати, що діапазон раціональних значень кута атаки носка наральника сошника α буде лежати в межах $\alpha = 20...30^\circ$, в цьому діапазоні значень кута атаки забезпечується мінімальний опір різанню при стабільній глибині ходу сошника, що збігається з дослідженням¹⁸.

Оскільки п'ята наральника сошника працює на ущільнення стінок і насінневого ложа то необхідно знати раціональні кути її атаки та діапазон навантажень, який буде сприяти забезпеченню якісного виконання утворення борозни.

На рис. 11 наведена залежність впливу кута атаки п'яти на її тяговий опір при різних навантаженнях. Аналіз наведеної залежності показав, що зі збільшенням величини кута атаки п'яти β тяговий опір п'яти лінійно зростає. Це пояснюється переходом режиму роботи від ущільнення з ковзанням до режиму нагортання. Раціональними параметрами для п'яти можна вважати поєднання кута атаки $\beta = 105...115^\circ$, та навантаження на сошник в діапазоні $Q = 350...450H$.

¹⁸ Artemenko, D., S. Leshchenko, V. Onopa, V. Majara, and V. Deikun. 2022. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 24(4): 57-71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>

Оскільки на тягові характеристики має вплив щільність ґрунту та швидкість руху сошника то необхідно визначити, яка швидкість буде найбільш прийнятною для роботи на всьому діапазоні щільності ґрунту, яка може зустрічатись під час посіву.

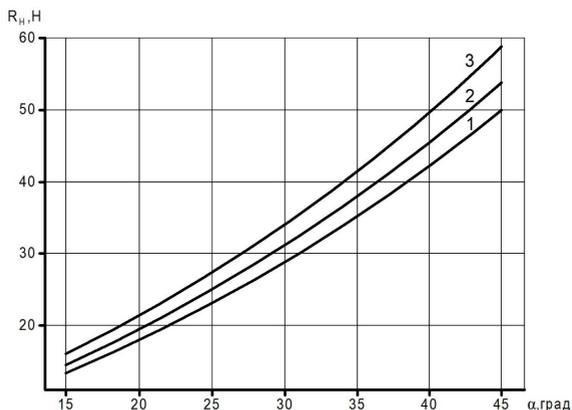


Рис. 10. Вплив кута атаки клинового носка на його тяговий опір при $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$ та $W = 20\%$: 1 – $V_c = 1,5 \text{ м/с}$; 2 – $V_c = 2,0 \text{ м/с}$; 3 – $V_c = 2,5 \text{ м/с}$

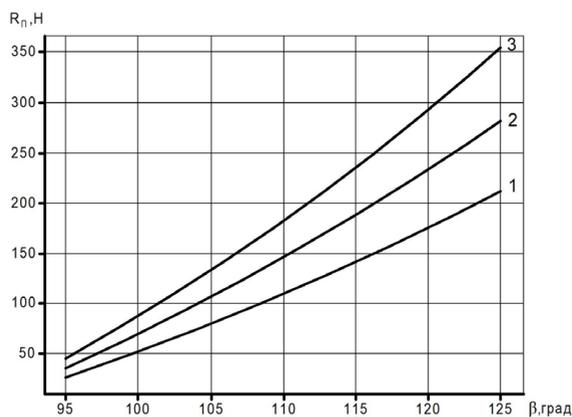


Рис. 11. Вплив кута атаки п'яти на її тяговий опір при навантаженні: 1 – $Q = 300 \text{ Н}$; 2 – $Q = 400 \text{ Н}$; 3 – $Q = 500 \text{ Н}$

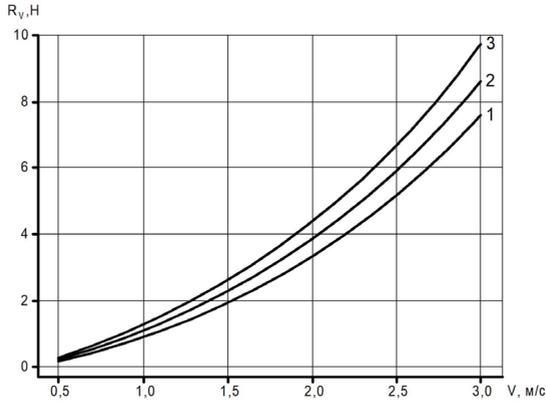


Рис. 12. Вплив швидкості руху сошника на його динамічний опір при щільності ґрунту: 1 – $\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$; 2 – $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$; 3 – $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$

На рис. 12 наведена залежність впливу швидкості руху сошника на його динамічний опір при зміні щільності ґрунту. Як видно, динамічний опір зростає квадратично зі швидкістю руху. При $V_c < 1,5 \text{ м/с}$ його частка незначна, а при $V_c > 2,5 \text{ м/с}$ динамічний опір стає співрозмірним з опором різанню. Тому раціональний діапазон швидкості бажано тримати в межах $V_c = 1,5 \dots 2,2 \text{ м/с}$.

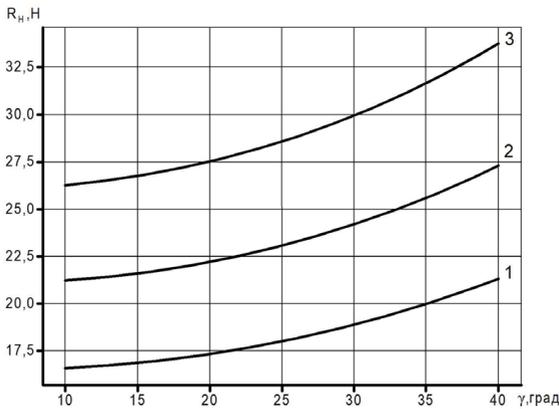


Рис. 13. Вплив кута розхилу носка наральника на його тяговий при: 1 – $\alpha = 20^\circ$; 2 – $\alpha = 25^\circ$; 3 – $\alpha = 30^\circ$

На рис. 13 наведена залежність впливу кута розхилу носка наральника γ на його тяговий опір. Аналіз наведених графіків показав, що зі збільшенням кута розхилу γ зростає площа контакту носка з ґрунтом та зменшується тертя щік за рахунок розсування ґрунту, але при $\gamma > 35^\circ$ приріст опору перевищує позитивний ефект розвантаження щік. Таким чином можна сказати, що раціональним діапазоном кута розхилу носка в горизонтальній площині буде значення $\gamma = 20...30^\circ$.

На рис. 14 наведена залежність зміни тягового опору від швидкості руху сошника у порівнянні із серійним сошником. Отримані залежності виконані з використанням раціональних параметрів робочих елементів удосконаленого наральника сошника, які були встановлені вище.

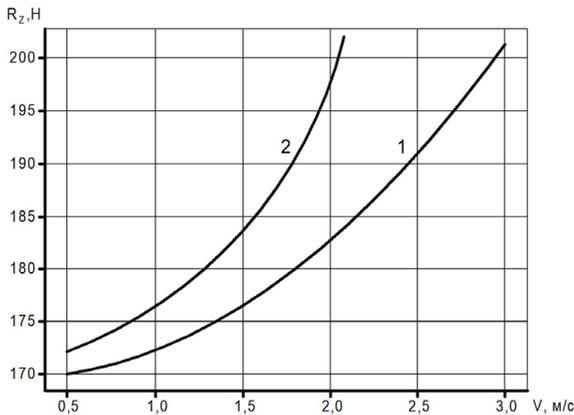


Рис. 14. Залежність зміни тягового опору від швидкості руху сошника у порівнянні із серійним сошником: 1 – удосконалений сошник; 2 – серійний сошник

При аналізі отриманих залежностей можна бачити, що обидві криві мають нелінійний зростаючий характер, що обумовлено підвищенням динамічної складової тягового опору зі збільшенням швидкості руху. На малих швидкостях $V_c \approx 0,5 \text{ м/с}$, різниця між експериментальним і серійним сошниками незначна та становить близько 5%, оскільки динамічні ефекти практично не проявляються. При діапазоні робочих швидкостей $V_c = 1,5...2,2 \text{ м/с}$ перевищення тягового опору серійного сошника зростає до 8 – 15%, що пов'язано з більшими силами тертя по бічних поверхнях сошника, відсутністю розвантаження щік та менш раціональною геометрією носка. При швидкості руху V_c понад

2,5 м/с, перевищення тягового опору серійного сошника досягає 18 %, що пояснюється різким зростанням динамічного опору та погіршенням умов самоочищення робочих поверхонь. Отриманий графік показує, що ефективність удосконаленої конструкції сошника зростає зі збільшенням швидкості руху, а зниження тягового опору у порівнянні з серійним сошником становить 5...15% в залежності від швидкості руху сошника. Це свідчить про те, що запропонована конструкція удосконаленого сошника є особливо ефективною в умовах інтенсивних режимів роботи, характерних для сучасних просапних сівалок. Однак, для визначення кінцевих, оптимальних параметрів запропонованого сошника необхідне проведення додаткових експериментальних лабораторно-польових досліджень за методикою повного факторного випробування.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз конструкції та умов роботи наральникового сошника просапної сівалки показав, що величина тягового опору суттєво залежить від геометричних параметрів його робочих частин, кутів їх встановлення, ширини робочих елементів та режимів роботи. Встановлено, що нераціональний вибір цих параметрів призводить до зростання опору різанню, тертя по бокових поверхнях та динамічної складової опору, що негативно впливає на енергоємність процесу сівки.

2. На основі розробленої математичної моделі сумарного тягового опору сошника, яка враховує опір різанню ґрунту, тертя по щоках, динамічний опір та вплив вертикального навантаження, встановлено нелінійний характер зміни тягового опору зі зростанням швидкості руху. При цьому, теоретично доведено, що ефективність удосконаленої конструкції сошника зростає зі збільшенням швидкості, що особливо важливо для сучасних умов посіву.

3. Аналіз впливу ширини носка наральника сошника показав, що зі збільшенням даного параметра сумарний тяговий опір буде зростати внаслідок збільшення площі контакту з ґрунтом та об'єму деформованого шару. Разом з тим встановлено, що прийнята при вихідному проектуванні конструкції носка наральника ширина яка склала $1,1b_1$, є раціональною та забезпечує компроміс між мінімізацією тягового опору, стійкістю ходу сошника та якістю формування борозни.

4. Дослідження впливу кутів атаки носка та п'яти сошника показали, що збільшення кута розхилу носка в горизонтальній площині сприяє покращенню умов самоочищення та стабілізації руху, однак його надмірне збільшення призводить до зростання бічних сил і як наслідок тягового опору. Встановлено, що зміна кута задньої частини носка безпосередньо

впливає на величину сил тертя та деформації ґрунту, а отже на загальний тяговий опір сошника.

5. Порівняльний аналіз експериментального та серійного сошників показав, що удосконалена конструкція може забезпечити зменшення сумарного тягового опору в середньому на 5 – 18 % залежно від швидкості руху. Це підтверджує доцільність запропонованих конструктивних рішень та свідчить про їх енергоефективність і перспективність для впровадження у серійні просапні сівалки, після додаткових експериментальних випробувань.

АНОТАЦІЯ

В даній роботі розглядається актуальна проблема зниження енергоємності процесу посіву шляхом удосконалення конструкції сошника просапної сівалки. Проведено аналіз конструктивних особливостей серійних сошників і встановлено основні фактори, які визначають величину їх тягового опору. Запропонований удосконалений сошник із зменшеним тяговим опором комбінованої конструкції. Розроблено математичну модель тягового опору удосконаленого сошника з урахуванням опору різанню, тертя, динамічних складових та впливу швидкості руху. На основі моделювання побудовано залежності тягового опору від геометричних параметрів робочих елементів. Обґрунтовані раціональні параметри наральника сошника, які забезпечують зниження енергетичних витрат при збереженні агротехнічної якості сівби. Виконано порівняльну оцінку серійної та удосконаленої конструкцій. Встановлено можливість зменшення тягового опору на 5 – 18% залежно від режимів роботи. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих конструктивних рішень та можуть бути використані при проектуванні та модернізації просапних сівалок.

Література

1. Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Лузан О.Р., Ковбаса В.П. Обґрунтування конструкції комбінованого наральника сошника просапної сівалки. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / ЦНТУ, Вип. 55, 2025. С. 121 – 133. URL: <https://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/55/13.pdf>
2. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії і розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2005. С. 141 – 142. URL: <https://studfiles.net/preview/5063474/page:25/>
3. Artemenko D., Onopa V. Experimental researches of a precision seed drills coulter equipped with a disk seedbed former. Загальнодержавний

міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / ЦНТУ, Вип. 49, 2019. С. 10-18. URL: http://zborniksgm.kntu.kr.ua/eng/archive/49/49_Artemenko_eng.html

4. Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / В.Ю. Ільченко, П.І. Карасьов; за ред. В.Ю. Ільченко. К.: Урожай, 1993. 288 с.

5. Дмитро Артеменко. Дослідження конструкційних параметрів елементів сошника для посіву просапних культур. Науково-технічні дослідження у галузі механічної інженерії та транспорту: колективна монографія; за заг. ред. А.А. Кашканова. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. 2023. С. 72-110. URL: https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/mech_transport.pdf

6. KVERNELAND. Monopill – Mechanische Einzelkornsämaschine. Präzise Vereinzlung – nicht nur bei Rüben. Kverneland Group Deutschland GmbH, 2017. 16p. URL: <https://www.kverneland.de/Saetechnik/Einzelkornsämaschinen/Kverneland-Monopill-Monopill-e-drive-II>

7. MONOSEM. The precision Planter specialist. MECA V4. Ribouleau MONOSEM – FRANCE, 2018. 24p. URL: <https://www.monosem.com/Range/Planter-range/MECA-V4>

8. Prospect of the GASPARDO Company. 2017. SP Range. Pneumatic precision seed drills. Italy. URL: <https://www.maschio.com/assets/Uploads/Leaflet-SP-RANGE-17-2017-09-W00230043R-EN.pdf>

9. Operating manual. AMAZONE. Precision airplanter. AMAZONENWERKE H. DREYER GmbH & Co. KG. Germany, 2017. 224p. URL: <http://et.amazone.de/files/pdf/mg5226.pdf>

10. Prospect of the Kuhn Company. 2015. Planter 3. Precision seed drills. Kuhn farm machinery (UK). URL: <http://www.kuhn.co.uk/uk/range/seeding/pneumatic-precision-seed-drills/planter-3-m-single-bar.html>

11. Product Catalog. Technology in harmony with the nature. Elvorti – Chervona zirka. Ukraine, 2016. 20p. URL: https://www.elvorti.com/content/pdf/2016/KATALOG_2016_EN_SITE.pdf

12. Патент України № 136252. Артеменко Д.Ю., Мажара В.А., Дарієнко В.В., Пукалов В.В., Ахмадієва В.Ю. Сошник. МПК А01С7/20 (2006.01). № u201902037/UA; Заявл. 28.02.2019; Опубл. 12.08.2019; Бюл. № 15. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1373323/>

13. Патент України № 133540. Артеменко Д.Ю., Свірєнь М.О., Онопа В.А., Комар Я.М. Сошник. МПК А01С7/20 (2006.01). № u201811332/UA; Заявл. 19.11.2018; Опубл. 10.04.2019; Бюл. № 7. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1344841/>

14. Патент України № 150808. Артеменко Д.Ю., Шепілова Т.П., Мажара В.А., Нестеренко О.В., Богатирьов Д.В., Онопа В.А.. Сошник. МПК А01С 5/06, А01С 7/20 (2006.01). № u202106879/UA; Заявл. 02.12.2021; Опубл. 20.04.2022; Бюл. № 16. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1686437/>

15. Патент України № 159673. Цимбал А.Г., Артеменко Д.Ю., Лузан П.Г., Онопа В.А., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Сошник. МПК А01С 7/20 (2006.01). № u202401264/UA; Заявл. 11.03.2024; Опубл. 26.06.2025, Бюл.№ 26. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1862713/>

16. Патент України № 161657. Артеменко Д.Ю., Онопа В.А., Лузан П.Г., Муленко К.А. Сошник. МПК А01С 7/20 (2006.01). № u202501031/UA; Заявл. 11.03.2024; Опубл. 25.12.2025, Бюл.№ 52. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891976/>

17. Костюченко М.М. Механіка ґрунтів: навчальний посібник/ М.М. Костюченко. Інтернетресурс Київського університету. geol.univ@kiev.ua. 116с. [Електронний ресурс]. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/mehanika_gruntiv.pdf

18. Artemenko, D., S. Leshchenko, V. Onopa, V. Majara, and V. Deikun. 2022. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4): 57-71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>

Information about the author:

Artemenko Dmytro Yuriiovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Agricultural Engineering Department,
Central Ukrainian National Technical University,
8, University ave., Kropyvnytskyi, 25030, Ukraine

04

SECTION



HEAT POWER ENGINEERING

ГАЗОГІДРАТНА ТЕХНОЛОГІЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ МОРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

Босий М. В.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-8>

ВСТУП

Важливим чинником енергетичної безпеки України є ефективне транспортування газу у вигляді газогідратів. На даний час для транспортування газу використовуються технології скрапленого газу і технологія LNG-танкери. LNG-технологія розглядається наразі як альтернатива трубопровідному транспорту. Альтернативна технологія для транспортування газу морськими суднами є перевезення газу у стисненому стані – це CNG-технологія¹.

Ринок європейського газу значно буде впливати на плани розробки альтернативних шляхів транспортування газу в Україну. Перспектива в майбутньому для України – це можливість імпорту газу з США, Канади, європейських країн, як Велика Британія, Норвегія, та країн близького сходу – Катару, ОАЕ, Іраку.

Отже ефективність альтернативних поставок природного газу морським транспортом буде залежати від технічних і економічних показників, наведених вище способів транспортування газу.

Так, наприклад, технологія LNG буде потребувати значної енерговитратної та високоартісної інфраструктури зі скраплення і регазифікації природного газу, яку треба будувати. Підприємства LNG-технології є довгостроковими інвестиційними проектами, для яких необхідно будівництво або оренда танкерного морського флоту. Наведені чинники будуть перешкоджати, по-перше, організації транспортування газу за допомогою LNG-технології з невеликих ізольованих родовищ, по-друге – це масштабність та неперервність виробництва технології-LNG,

¹ Economides M., Sun K., Subero G. Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations*. Volume 21, Number 2. SPE 92047. Society of Petroleum Engineers. 2006. P. 318-324.

які необхідні для підтримання термодинамічної ефективності, а також мінімізації витрат на виробництво даної технології².

Альтернативним морським способом для транспортування природного газу з родовищ, які ізольовані, є перевезення газу за допомогою CNG-технології. Природний газ при перевезенні та зберіганні в ємностях буде перебувати у стисненому стані під високим тиском 200–250 атм.

Технологія CNG складається з процесу стискання газу, транспортування його танкерами CNG, та наявності декомпресійного терміналу для зберігання газу. CNG-технологія має звісно нижчу вартість його виробництва та зберігання в порівнянні з LNG-технологією, тому що виробництво за CNG-технологією не буде включати процес охолодження, а також і криогенних резервуарів. На даний час танкери, якими перевозять газ за допомогою CNG-технології на великі відстані, знаходяться на стадії розробки і будуть розглядатися конкурентоспроможними для транспортування газу LNG-технологією.

Порівняння спроможності транспортування газу танкерами за технологією CNG з танкерами за LNG-технологією полягає в наступному: вони ефективні в різних за масштабами проектах при транспортуванні газу. Підприємства та морські суда LNG-технології при великих капітальних витратах будуть рентабельні, використовуючи їх в інноваційних проектах з великим запасом газу, а також ринками збуту високого обсягу³. Морські суда CNG-технології будуть більш мобільні, вони складаються з суден звісно меншого розміру, але більші за кількістю, це дає можливість транспортувати газ щодня безпосередньо аж до відповідно розподільчого трубопроводу. Проект CNG-технології можна побудувати за короткий термін і він буде мати значно більший дохід в порівнянні з проектом LNG-технології^{4, 5}.

Порівнюючи транспортування газу морськими судами LNG-технологією з CNG-технологією, відстань, за якою більш ефективно транспортування газу за CNG-технологією, змінюється в залежності від типу проекту, розмірів родовищ, ринку перевезення і других економічних умов. Загальні витрати з транспортування газу CNG-технологією в порівнянні з LNG-технологією є нижчими, наприклад, при відстані, менше 2500 км.

² Seungyong Chang. Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. Seungyong Chang // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Indonesia, Jakarta. 2001. 17-19 April. P. 24-32.

³ Gudmundsson J. Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M Parlaktuna, A. Khokhar // SPE Production and Facilities. 1994. February. P. 69 – 73.

⁴ Там само.

⁵ Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam. 2006. 11p.

Перспективною технологією транспортування газу є застосування NGH-технології в порівнянні з традиційними технологіями – це трубопровідний транспорт і LNG-технологія. NGH-технологія – технологія транспортування і зберігання природного газу, яка заснована на його перетворенні в твердий гідратний стан при відповідних термодинамічних параметрах тиску та температури. Вона буде економічно вигідною на відстані 1000 км. Перспективними напрямками транспортування газу для подальшого дослідження та впровадження є наступне: розробка новітніх енергоощадних технологій, відповідно, отримання метану з покладів газогідратів; також розробка звісно процесів та устаткування без трубопровідного постачання метану в гідратному стані за допомогою морського транспорту⁶.

Наразі інтерес до проблеми газогідратів у світі, а також в Україні значно виріс, розпочинається їх промислове освоєння. Морські газогідрати зараз визнані сучасним найперспективнішим та альтернативним паливом у багатьох країнах світу, розвідкою та освоєнням їх активно займаються у США, Канаді, Великій Британії, Франції, Німеччині і Японії. Так японська компанія (JOGMEC) перша в світі видобула газ з гідратів метану з дна океану. На сьогодні дослідження по перевезенню природного газу у вигляді гідратів набувають широкого розповсюдження.

Так міністерство енергетики США разом з приватною фірмою Chevron проводять дослідження у рамках проєкту Gas Hydrates JIP в Мексиканській затоці. Згідно оцінки відомої американської компанії Mineral Management Service, природні запаси газогідратного газу в Мексиканській затоці досягають 600 трлн м³.

Україна також вкрай зацікавлена в розвитку газогідратних технологій за NGH-технологією. Отже видобування метану з природних газогідратів дасть можливість замінити більшу частину імпортного природного газу, а в подальшому даже повністю відмовитися від нього. Тому транспортування природного газу за допомогою газогідратів є актуальним питанням, як альтернатива його перевезенню звісно у зрідженому стані. Інститутом геологічних наук НАН України у 1990-х роках були проведені дослідження у Чорному морі та виявлені три зони гідратоутворення. Їх запаси сягають біля 50–60 трлн м³ метану⁷.

Технології добування метану з його гідратів будуть ґрунтуватися на порушенні термодинамічної рівноваги звісно в системі «метан – вода –

⁶ Тарко Я.Б., Педченко Л.О., Педченко М.М. Перспективи газогідратної технології на ринку морських перевезень природного газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. Вип. 2 (43). С. 49 – 55.

⁷ Жук Г.В., П'ятничко О.І., Крушневич В.Т., Федоренко Д.С., Клименко В.В. Метаногідратні технології в Україні: дослідження і перспективи. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1(3). С. 3-10.

гідрат метану» відповідно шляхом локального підвищення температури, та зниження тиску, додавання також активного ще третього компонента (рідини або газу). При відсутності замкнутого простору звісно перші два шляхи будуть витратними, а різницю температури і тиску з довкіллям необхідно буде завжди підтримувати.

Наразі технологія з переведення природного газу в гідратний стан досконаліша, ніж технологія добування газу метану з природних гідратів. Успішно виконано дослідно-промислові випробування газогідратної технології отримання капсул (пелет), які складаються з гідратів метану та звісно води, організовано також виробництво гідратних капсул з продуктивністю 0,7 т/день (за метаном), ще здійснена оцінка вартості транспортування природного газу гідратним способом. Нині у світі існує кілька технологій, а також технологічних рішень, які пов'язані з газогідратним транспортуванням природного газу, вони знаходяться на різних стадіях розробки та впровадження^{8,9}.

Враховуючи екологічні умови України досить цікавою буде технологія норвезьких дослідників. Їх технологія по перетворенню природного газу в газогідрат дозволяє транспортувати газ як без використання трубопроводів, так і зберігання в наземних сховищах звісно при нормальному тиску. Тому практична цінність цієї технології полягає в тому, що вона буде забезпечувати можливість розробки, не тільки віддалених родовищ газу, а ще й утилізації попутного газу для окремих родовищ, які не входять звісно до складу великих нафтогазоносних зон, зокрема це стосується шельфів, для яких прокладення газопроводу нерентабельно. Суть цієї технології полягає в тому, що газ буде перетворюватися в заморожений гідрат, він змішується із охолодженою нафтою до консистенції відповідно рідкої глини і в такому стані буде перевозитися, наприклад, морськими судами до берега. При порівнянні з результатами попередніх досліджень в цьому напрямку дана технологія є технологічним проривом. Перевага в тому, що отримана звісно газонафтова суміш, при охолодженні до температури -10...-20 °С, буде зберігати стабільність при нормальному атмосферному тиску.

В Японії побудована напівпромислова установка з отримання також льодогазогідратних «пігулок», їх можна зберігати та транспортувати при низьких температурах. У Великій Британії вже створена

⁸ Педченко Л.О., Педченко М.М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. №1(3). С.100-113.

⁹ Trondheim Gudmundsson J.S. Gas-in-ice: Concept evaluation / J.S. Gudmundsson, M. Parlaktuna // Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology 1991.

дослідно-промислова установка, за допомогою якої відпрацьовують технологію отримання газогідратів на морських платформах з подальшим їх транспортуванням. Проте ефективної, тобто, (комерційно привабливої) промислової технології виробництва газогідратів поки ще не існує¹⁰.

Лідером по дослідженню та створенню установок для виробництва газогідратів є Японія. Відома компанія Mitsui Engineering & Shipbuilding Co разом з JOGMEC вже створили першу технологічну (напівпромислово) установку. На першому етапі утворюється гідратна пульпа методом барботажу. На другому етапі – газові гідрати будуть очищатися, далі їм надається сферична форма (діаметром 5-70 мм).

Вже подальше зберігання газових гідратів буде здійснюватися при атмосферному тиску і температурі біля -20 °С, тобто при термодинамічних умовах, при яких виявляється ефект самоконсервації. Продуктивність установки складає 600-800 кг/доб., але при необхідності вона може бути збільшена і до 5-6 т.

1. Аналіз відомих технологій транспортування природного газу у газогідратному стані

Зараз є проблеми з накопиченням, транспортуванням, а також і зберіганням природного газу. Разом з тим традиційні технології транспортування природного газу через трубопроводи або у вигляді скрапленого чи стисненого газу нерідко бувають не досить ефективними, наприклад, проблема забезпечення споживачів природним газом при відсутності трубопроводів або видобування газу з необлаштованих родовищ, тощо. Отже важливими стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, крім того, розробки низькорентабельних родовищ та дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, який видобувається з гідратів. Наслідком цього є важливі питання щодо створення установок з виробництва газових гідратів і транспортування природного газу в газогідратному стані.

Зараз Японією опрацьовуються можливості морського транспортування природного газу в газогідратному стані або NGH (natural gas hydrate). У зв'язку з тим що, необхідна для зберігання і транспортування газових гідратів температура, значно ближче до природної, а тиск при мінусових значеннях температури гідрату можна знизити до атмосферного, тому і устаткування для їх отримання та спеціальні транспортні засоби для його перевезення дешевші, наприклад, за транспортування зрідженого метану.

¹⁰ Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. Proceedings of the 25 th world gas conferences. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8. 2012. P. 367-375.

Аналіз літературних джерел щодо розробок, пов'язаних із транспортуванням газу в газогідратній формі, вказав на те, що найбільш досконалим і обґрунтованим є спосіб виробництва газових гідратів для транспортування і зберігання, який захищений патентом. Цей спосіб включає підготовку газу і води, гідратоутворення, сепарацію (відділення від газогідрату газу і води, що не увійшли до складу гідрату), потім охолодження і заморожування газогідрату, далі формування гідратних частинок (наприклад, гранул, діаметром 2-20 мм), також охолодження і заморожування утворених гранул, та їх оббризування водою і заморожування потоком охолодженого газу. Відповідно до відомого винаходу даний спосіб виконується за допомогою установки, яка складається з реактора гідратоутворення, що має пристрої для подачі газу і води та виведення звісно водогазогідратної суміші, також внутрішній теплообмінник та охолоджувальний кожух; відповідно системи підготовки і подачі газу (сепаратора, компресора, теплообмінника); насоса подачі води (підпитування і рециркуляції); також системи подачі рециркульованого газу (компресора і теплообмінника); трифазного сепаратора; та теплообмінника охолодження гідратної маси; пристрою для формування гідратних капсул; ще звісно пристрою для нанесення на гідратні капсули води та теплообмінника для заморожування газогідратних капсул¹¹.

Сьогодні розробка ефективних способів транспортування газу вважається однією з актуальних задач не тільки нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу в цілому. Наразі з'являються технології, які дозволять забезпечити можливість розробки як віддалених газових родовищ так і утилізації попутного газу окремих родовищ нафти, в т.ч. і на шельфі, для них прокладка газопроводу нерентабельна. Основою цих технологій є спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. Разом з тим, отримана «газо-буферна» суміш повинна охолоджуватися до температури, біля нуля градусів та буде зберігати стабільність при нормальному атмосферному тиску. Очевидно дана технологія дозволить передусім вирішити задачі транспортування газу, не використовуючи трубопровід та безпечно зберігання газогідратної суміші при нормальному тиску та температурі¹².

Тож значний науковий інтерес становить переведення газу в газогідратний стан та його транспортування. Водночас розширюється

¹¹ Gudmundsson J.S., US Patent No.5,536,893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage / J.S. Gudmundsson; inventor J.S. Gudmundsson. №195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7р.

¹² Павленко А.М., Педченко Л.О., Педченко М.М. Організація безперервного циклу виробництва газових гідратів. *Сбірник наукових праць SWorld*. 2012. Том 8. С. 98-106.

можливість експортного потенціалу газу власного видобутку, можливо реалізувати безтрубну газифікацію України.

Згідно тверджень американського професора Слоана біля 70 % природних родовищ газу є невеликих розмірів і до них збитково прокласти труби. Японською корпорацією Mitsui Engineering and Shipbuilding створено дослідний проект морського судна, який виробляє «сухий метан», перевозить його, і одночасно споживає частину для своїх потреб. Інший підхід практичного використання – це сухе паливо для автомобілів.

Трубопровідний транспорт вважають найдешевшим видом транспортування природного газу, але при збільшенні відстані його ефективність буде зменшуватися. Технологія зрідження природного газу звісно зменшує його початковий об'єм у 600 разів, що доцільно для транспортування газу на відстань, не менше 1800 км при річному об'ємі, не нижче 4 млрд м³. При цьому вартість одного танкера-газовоза, наприклад об'ємом 125 тис. м³, становить до 150 млн. \$. З рис. 1 видно, що газогідрати доцільно транспортувати все таки на середні відстані.



Рис. 1. Ефективність транспортування природного газу до споживачів за різними технологіями

Варто порівнювати технологію транспортування газу у газогідратній формі з технологією транспортування зрідженого газу. Порівняння ефективності цих технологій показало, що загальні витрати транспортування природного газу у твердому стані виявилися на 12 – 24 % нижчими. Перевагами газогідратних технологій також є простіші умови транспортування та зберігання. В той час, як зріджений природний газ необхідно транспортувати при температурі -162 °С та високому тиску, що є значною небезпекою для навколишнього середовища, природний газ

у газогідратній формі може перебувати під час зберігання чи переміщення при температурі $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В Україні більшість газових та газоконденсатних родовищ знаходяться на завершальній стадії розробки, багато родовищ мають невеликі запаси газу і знаходяться на чималій відстані від наявних комунікацій, причому споживачі газу часто бувають обмежені наявністю газопроводів та витратами на їх прокладання. Беручи до уваги вищенаведене, доцільно розглянути, як перспективний, адаптований до економічних умов України технологічний цикл, який включає видобування, транспортування, зберігання та споживання природного газу за газогідратною технологією спільно з іншими інноваційними рішеннями.

В Україні основним транспортним засобом для перевезення гідратів газу є морські судна. Транспортування гідратів газу до місця зберігання відбувається в замороженому вигляді морським транспортом (з теплоізованими бункерами для гранульованого гідрату газу і тентовані та теплоізовані для льодогазогідратних блоків). До того ж слід обов'язково передбачити можливість утилізації газу при частковій дисоціації застосовуючи його в якості компонента пального. Зберігання газогідрату відбувається на незначній відстані від споживача, що дозволяє проводити дисоціацію гідрату при мінімальному тиску (наприклад, $0,3\text{ МПа}$).

Одним із найважливіших процесів газогідратних технологій, які розробляються в світі, це утворення газогідратних капсул, гранул або блоків, придатних до транспортування і довгострокового зберігання. Щоб запобігти втратам під час транспортування і зберігання утворених газогідратних структур на їх поверхні варто утворювати льодяну кірку з метою їх примусової консервації. Для ефективного заповнення об'єму гідратосховищ запропоновано виготовляти блоки у формі кубів. Вдалим вибором вважається монолітний блок великих розмірів, проте, прийнятна технологія для промислового виробництва таких газогідратних блоків дотепер ще не розроблена.

Нині актуальними стають технології транспортування та зберігання природного газу в гідратному стані, та розробки низькорентабельних родовищ і також дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, який видобувається з гідратів. Це означає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газогідратів та транспортування їх у вигляді гранульованого газогідрату, на що вказують останні досягнення японських фахівців.

Важливо провести порівняльний аналіз технологій морського транспортування природного газу з обґрунтуванням перспективних технологій його транспортування в газогідратному стані.

2. Технологічний цикл та технологічна схема використання газогідратної технології для видобутку і підготовки до транспортування природного газу

Газогідрати – (тобто гідрати природних газів, клатрати) кристалічні сполуки, вони утворюються при певних термодинамічних умовах з води і газів. Процес утворення гідратів газу відбувається при високих тисках і низьких температурах, в подальшому це зберігання та плавлення дозволяє їх ефективно застосовувати в різних технологічних процесах, зокрема це стосується виробництва і акумулювання холоду, стискування різних газів, розділення також газових сумішей, ще опріснення солоних вод при транспортуванні природного газу у газогідратному стані (рис. 2)^{13, 14, 15}.

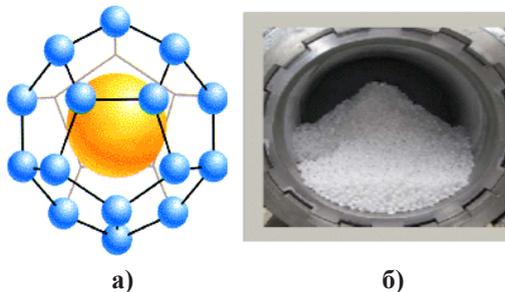


Рис. 2. Видгляд газогідратів: а) структура газогідрату метану; б) сферична форма гідрату метану

Газогідрати існують в природних умовах, за оцінками більшість покладів вуглеводневих газів відповідно знаходяться саме в газогідратному стані.

Газогідратна технологія по переведенню газу в гідратний стан розроблена та успішно здійснена при промисловому випробуванні отримання гідратних капсул тобто (пелет), які складаються відповідно з гідратів метану і води, та організовано виробництво даних гідратних капсул. Згідно з розробленою технологією, природний газ повинен очищатися від CO_2 та H_2S і у взаємодії з H_2O одержують газогідрати у вигляді гранул. Гранули повинні зберігатися у бункері, їх можна транспортувати морем в контейнерах при температурі -20 °C. Потім

¹³ Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. CRC Press. 2008. 752 p.

¹⁴ Sloan E. D., Jr., Koh C., Sum A. K. Natural Gas Hydrates in Flow Assurance. Colorado School of Mines, Summer workshop. June 10-12. 2009. Colorado. 75 p.

¹⁵ Босий М.В. Дослідження процесу утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ-рідина». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Том. 85. №4. С. 93-103.

газогідрати треба поступово перевантажувати у цистерни з високим тиском, які перевозять та подаються до газової магістралі. Щоб закачати газ до магістралі необхідно здійснити регазифікацію газогідратів шляхом їх дисоціації, тобто розкладання на воду і газ під впливом зовнішніх чинників нагрівання.

Для вивчення процесів утворення та дисоціації газогідратів вуглеводнів, які входять до складу природного газу, в Інституті газу НАН України було створено гідратний стенд СГ-16:100. На базі гігрометра ТОРОЗ-3-2ВИЗ (власна розробка Інституту газу НАН України) створено також експрес-метод визначення термодинамічних та звісно кінетичних параметрів газогідратів. Наприклад, для прискорення процесів утворення гідратів робочу камеру гігрометра обладнали барботером. При усередненні даних температури води і газів за відповідного тиску в камері барботера фіксували термодинамічні умови утворення газогідратів відповідно для даної технологічної схеми барботування.

Пропонується технологічний спосіб гідратоутворення при видобутку вуглеводневих газів з малодобітних родовищ при транспортуванні та регазифікації (рис. 3).

Умовно цей технологічний цикл розділяється на три складові:

– *утворення газогідратів і гідратних пелет* при стискуванні газу, який відбирається із свердловин, гідратоутворення, потім їх сепарація і далі пресування та гранулювання газогідратів (тобто утворення гідратних пелет), потім вони завантажуються в контейнери, де зберігаються, можна транспортувати і проводити регазифікацію; – *транспортування* гідратних пелет безпосередньо до споживача; – *регазифікація* гідратних пелет, при цьому відбувається виділення газу, який направляється до споживача¹⁶.

За схемним рішенням, наведеним на рис. 4, видобування і підготовка до транспортування вуглеводневих газів з малодобітних родовищ виконується за газогідратною технологією таким чином¹⁷.

Природний газ – суміш природного газу з іншими вуглеводнями з свердловини 1 при тиску $P = 0,1$ МПа та температурі $T = 293$ К надходить в сепаратор 2, тут він відокремлюється від крапель нафти, конденсату і води 3. Очищений газ буде стискатися в компресорі 4 та охолоджуватися в теплообміннику 5. Охолоджений та стиснутий газ далі через ежектор 6 та звісно барботаажний пристрій 11 поступає в кристалізатор 7, в нього також подається і вода. В кристалізаторі при $P = 2$ МПа і $T = 293$ К

¹⁶ Клименко В.В., Педченко М.М., Педченко Л.О. Моделювання адіабатного способу утворення льодогазогідратних капсул. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 6 (128). С. 41-45.

¹⁷ Босій М.В., Клименко В.В. Транспортування природного газу в газогідратному стані. *Розвиток транспорту*. 2022. Вип. 1(12). С. 129-142.

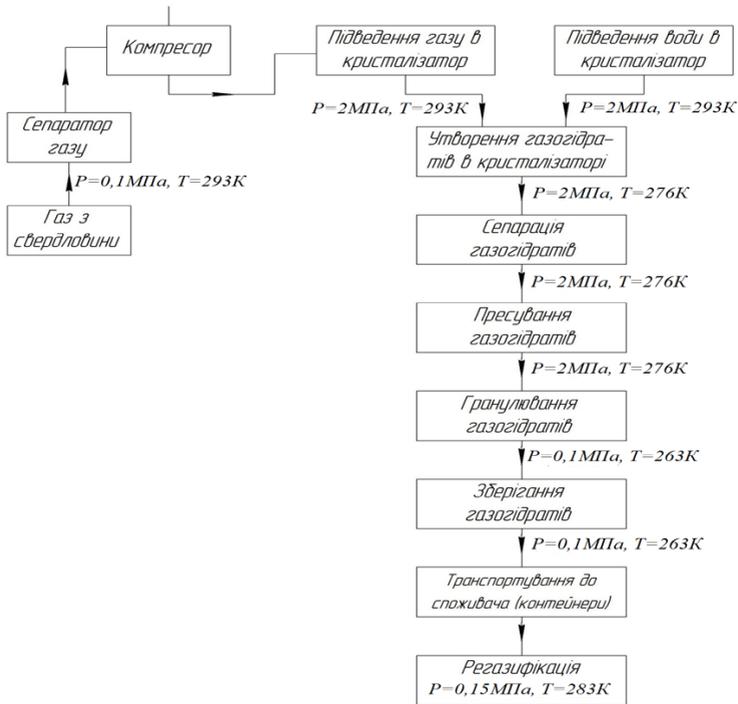


Рис. 3. Технологічний цикл гідратуутворення при видобутку вуглеводневих газів з малодебітних родовищ, зберігання, транспортування і регазифікації

будуть утворюватися газогідрати, а теплота гідратуутворення звідси відводиться агентом (пропаном), який кипить у випарнику 8. Тиск води не буде критичною величиною для процесу гідратуутворення та встановлюється на відповідному рівні, звідси більш високому, ніж тиск в самому кристалізаторі 7. Але все ж таки тиск води треба відрегулювати так, щоб забезпечувалося, достатнє за обсягом, введення води в кристалізатор 7. Швидкість гідратуутворення можна збільшувати за допомогою рециркулюючого непрореагованого газу, його можна подавати в кристалізатор також до основного потоку свіжого газу через ежектор 6, при цьому досягається ще краще перемішування води та газу (суспензії).

Водогазгидратна суспензія буде подаватися насосом 12 в сепаратор газогідратів 13, де гідрат відокремлюється від води, яку далі змішують з потоком свіжої води та направляють знову в кристалізатор 7. Далі після

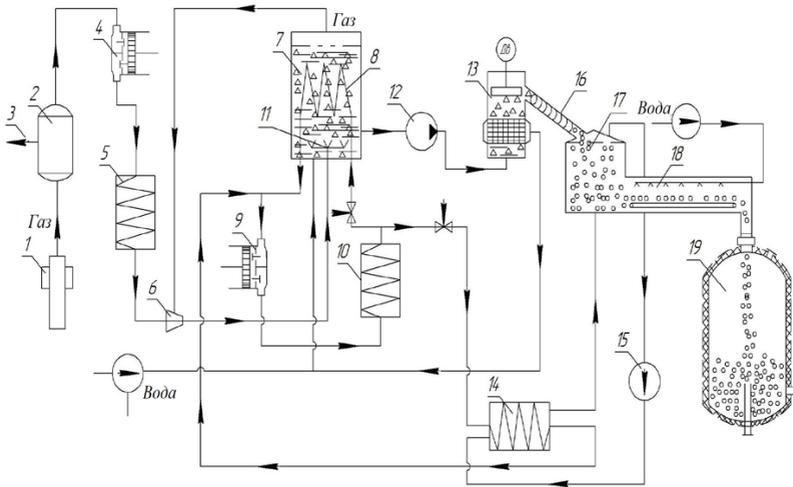


Рис. 4. Схемно-технологічне рішення використання гідратуотворення для видобутку і підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітних родовищ

сепарації водогідратної суспензії гідрати необхідно подавати в пристрій для гранулювання часток гідрату 16 (екструдер). Воду, яка виділилася в процесі екструдерування, направляють знову в кристалізатор (на рис. 4 не показано), а з газогідратів звісно будуть формувати газогідратні пелети, наприклад, можна у формі кульок діаметром 20 мм. Пелети в грануляторі 17 будуть охолоджуватися до температури $\approx -20\text{ }^\circ\text{C}$ та частково підморожуються газом, який подається з випарника 14, при цьому утворюються гранули. Гранули будуть надходити по транспортеру в пристрій для консервації гідратів 18, потім зверху на них буде розпилюватися охолоджена вода і гідрати покриються тонким шаром льоду, зберігаючи при цьому вміст газу всередині частинок. Діаметр стиснутих частинок гідрату буде залежати від способу їх гранулювання і ще від необхідного ступеня стиснення, діаметр гранульованих частинок гідрату природного газу повинен знаходитись в межах 10...20 мм. Щільність звісно гранульованих частинок гідрату газу повинна становити 850-950 кг/м³. Товщина крижаної оболонки може змінюватися за необхідності, крижана оболонка повинна мати товщину 0,5 – 1,5 мм. Крижана оболонка льоду буде мати вплив на стабільність самих частинок гідрату.

Насамперед, запобігається дифузія газу з середини в зовнішнє середовище, оскільки дифузія газу крізь лід мізерна і нею можна знехтувати, далі, крижана оболонка – це захисне покриття, яке втримує підвищений внутрішній тиск у частинці гідрату, який достатній для запобігання дисоціації типового гідрату природного газу за температури на декілька градусів нижче 0 °С і атмосферному тиску.

Одержані в такий спосіб гранульовані, охолоджені та покриті крижаною оболонкою (тобто тонким шаром льоду) частинки гідрату у вигляді пелет сферичної форми поступають в резервуар контейнер 19 для їх зберігання. Цей контейнер зручний для транспортування і надалі для проведення процесу регазифікації.

Для прикладу, згідно технічного завдання витрати вуглеводневих газів складають 1250м³ за добу і їх слід транспортувати на відстань в межах 100 км. Необхідно розробити схемні рішення для транспортування і регазифікації газогідратів вуглеводневих газів також малодобітних родовищ.

Як зазначалося раніше, утворені відповідним чином газогідратні пелети, які покриті крижаною плівкою невеликої товщини, можна тривалий час зберігати, а також транспортувати при атмосферному тиску та температурах -10...-20 °С, навіть при температурі -1,5 °С упродовж певного часу вони зберігають свою стійкість.

Елементарні обчислення показують, що наприклад, при витратах природного газу біля ~52 м³ за годину (1250 м³ за добу), для утворення 1м³ газогідратів необхідно ~ 3 год.

Газогідратні пелети, які підготовлені до транспортування, їх можна наповнювати в пластмасові термоізовані ємності-контейнери, наприклад, розміром $d \times h = 0,7 \times 1,2$ м. В одну ємність вміститься ~ 0,4...0,5 т газогідратів, а таких ємностей, враховуючи час на регазифікацію, достатньо буде 12 шт.

В разі необхідності накопичення звісно резервної маси газогідратів, наприклад, в результаті нерівномірного споживання природного газу, варто на місці споживання розміщувати ще додаткову стаціонарну ємність (або навіть кілька ємностей) для зберігання газогідратних пелет при атмосферному тиску та невеликих від'ємних температурах, в яку було б доцільно розвантажувати газогідрати з транспортних ємностей.

Регазифікація газогідратів здійснюється прямо в транспортних контейнерах, шляхом подачі в них теплої води температурою 30...40 °С, для її нагрівання можна використовувати тепловий насос (рис. 5).

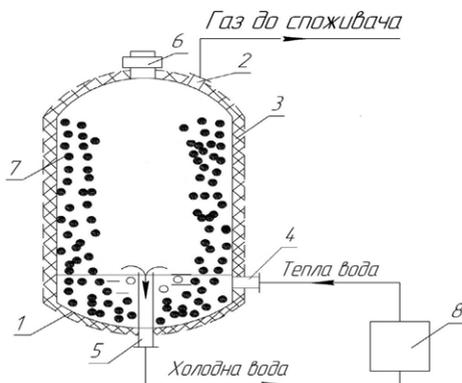


Рис. 5. Схемне рішення регазифікації гідратних пелет для їх транспортування в контейнері: 1 – корпус транспортної ємності; 2 – патрубок подачі газу споживачу; 3 – термоізоляція; 4, 5 – патрубок для підведення теплої води і відведення холодної; 6 – люк для наповнення газогідратними пелетами; 7 – газогідратні пелети; 8 – тепловий насос

Процес регазифікації в транспортній ємності наступний. В патрубок 4 буде подаватися тепла вода з теплового насосу 8. Контактуючи з теплою водою, пелети спочатку підігріваються до температури плавлення, а потім плавляться при тиску $P = 0,15$ МПа. Газ, що виділяється через патрубок 2, направляється до споживача, а холодна вода звисно через патрубок 5 повертається для підігріву до теплового насосу 8. Тиск газу після регазифікації повинен становити 0,15 МПа. Тож швидкість плавлення газогідратів і, звисно кількість виділеного газу, слід регулювати, погоджуючи їх з графіком споживання. В теплий період року регазифікатор доречно використовувати як охолоджувач для системи кондиціонування повітря.

Однією з актуальних задач не тільки газової і нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу в цілому, є розробка способів ефективного транспортування газу. Останнім часом з'являються технології, які дозволяють забезпечити можливість розробки, як віддалених газових родовищ та утилізації попутного газу окремих родовищ газу і нафти, також і на шельфі, для них прокладка газопроводу буде нерентабельно. Основою цих технологій є новий спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. Разом з тим, отримана «газо-буферна» суміш

буде охолоджуватися до температури, близької до 0°C і зберігає сталість при нормальному атмосферному тиску. Безперечно дана технологія дозволить, насамперед, вирішити задачі транспортування газу звісно без використання трубопроводу та безпечного зберігання газогідратної суміші при нормальному тиску і температурі.

Отже велике зацікавлення представляє переведення газу в газогідратну форму і транспортування його в такому вигляді. Водночас розширюється також можливість експортного потенціалу вуглеводневих газів, тобто можливо реалізувати безтрубну газифікацію України.

До пріоритету газогідратних технологій можна віднести простіші умови транспортування та відповідно зберігання. Природний газ в газогідратній формі може знаходитися під час зберігання або переміщення за температури -15 °С. Варто зазначити, що для транспортування газу у вигляді газогідратів необхідні спеціальні герметичні ємності. Транспортуючи гідрати, слід контролювати тиск і температуру всередині ємності, щоб не розтавала крижана кірка на поверхні гідратів. Як згадувалося вище, процес транспортування гідратів можна реалізувати навіть при атмосферному тиску і температурі нижче 0°C. Відтак необхідно використовувати активне охолодження простору, в якому будуть знаходитися газогідрати, для підтримки необхідної їх температури при перевезенні.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз стану наукових та практичних досліджень газогідратних технологій. Розглянуто питання використання газогідратної технології для транспортування вуглеводневих газів у газогідратній формі.

2. Запропоновано і описано схемне рішення технологічного циклу утворення газогідратів при видобутку природного газу з малодобітних родовищ, його транспортування та використання.

3. На основі літературних даних виконані порівняння основних техніко-економічних показників транспортування газу від малодобітних родовищ, використовуючи різні технології, та показано переваги перспективної газогідратної технології транспортування вуглеводневих газів на відстані ~ 100 км.

4. З'ясовано, що технологія транспортування природного газу в газогідратній формі морськими судами має ряд переваг над технологіями LNG і CNG. LNG-технологія відпрацьована на світовому ринку. Звісно NGH-технологія перспективно підходить для вирішення проблеми диверсифікації поставок природного газу в Україну, а також вуглеводнів при розробці морських родовищ газу і нафти.

5. Показано, що транспортування як природного, так і попутного газу у газогідратному стані є перспективним при розробці невеликих та відповідно віддалених від інфраструктури родовищ, тому що недоцільно будувати трубопроводи або інфраструктуру технології LNG.

6. При порівнянні вартості традиційних і газогідратних технологій транспортування та зберігання вуглеводневих газів маємо наступне, вони наразі знаходяться на одному рівні. При використанні переваг технології на основі газових гідратів, вони стають серйозною альтернативою всім традиційним технологіям.

АНОТАЦІЯ

Споживання природного газу в Україні та світі наразі постійно зростає. Традиційні технології транспортування вуглеводневих газів є менш ефективними, ніж газогідратні технології. Існуючі технології не сприяють розробці невеликих родовищ. На сьогодні природний газ транспортується у зрідженому вигляді за LNG технологією морськими судами. Також існують альтернативні технології, до них відносяться CNG-технології – стиснений газ та перспективна технологія NGH – газ у газогідратній формі. Проведено порівняльний аналіз CNG -, LNG – і NGH-технологій транспортування природного газу морськими судами. Обґрунтовано перспективи та наукові основи впровадження NGH- технології транспортування газу в газогідратному стані. Наведені переваги NGH-технології. Згідно з відомою наразі NGH- технологією передбачено гідратоутворення та формування гідратних гранул. Запропоновано проводити формування газогідратів у вигляді гідратних пелет, які покриваються тонким шаром льоду. Вибір форми та послідовність виготовлення пелетів спрямовані на оптимізацію процесів технології NGH. Технологія NGH дозволяє з мінімальними енерговитратами одержувати пелети відповідних розмірів. Транспортування природного газу у вигляді газогідратів у формі пелетів дозволяє значно знизити вартість спеціалізованих морських танкерів.

Література

1. Economides M., Sun K., Subero G. Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations* Volume 21, Number 2. SPE 92047. Society of Petroleum Engineers. 2006. P. 318-324.
2. Seungyong Chang. Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. Seungyong Chang // *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Indonesia, Jakarta*. 2001. 17-19 April. P. 24-32.

3. Gudmundsson J. Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M Parlaktuna, A. Khokhar // SPE Production and Facilities. 1994. February. P. 69 – 73
4. Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam. 2006. 11p.
5. Тарко Я.Б., Педченко Л.О., Педченко М.М. Перспективи газогідратної технології на ринку морських перевезень природного газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. Вип. 2 (43). С. 49 – 55.
6. Жук Г.В., П'ятничко О.І., Крушневич В.Т., Федоренко Д.С, Клименко В.В. Метаногідратні технології в Україні: дослідження і перспективи. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1(3). С. 3-10.
7. Педченко Л.О., Педченко М.М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. №1(3). С.100-113.
8. Trondheim Gudmundsson J.S. Gas-in-ice: Concept evaluation / J.S. Gudmundsson, M. Parlaktuna // Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology 1991.
9. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. Proceedings of the 25 th world gas conferences. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8. 2012. P. 367-375.
10. Gudmundsson J.S., US Patent No.5,536,893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage / J.S. Gudmundsson; inventor J.S. Gudmundsson. №195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7p.
11. Павленко А.М., Педченко Л.О., Педченко М.М. Організація безперервного циклу виробництва газових гідратів. *Сбірник наукових праць SWorld*. 2012. Том 8. С. 98-106.
12. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. CRC Press. 2008. 752 p.
13. Sloan E. D., Jr, Koh C., Sum A. K. Natural Gas Hydrates in Flow Assurance. Colorado School of Mines, Summer workshop. June 10-12. 2009. Colorado. 75 p.
14. Босий М.В. Дослідження процесу утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ-рідина». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Том 85. №4. С. 93-103.
15. Клименко В.В., Педченко М.М., Педченко Л.О. Модельовання адіабатного способу утворення льодогазогідратних капсул. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 6 (128). С. 41-45.

16. Босий М.В., Клименко В.В. Транспортування природного газу в газогідратному стані. Одеський національний морський університет. *Розвиток транспорту*. 2022. Вип. 1(12). С. 129-142.

Information about the author:

Bosyi Mykola Viktorovich,

Senior Lecturer at the Department of Materials and foundry engineering,
Central Ukrainian National Technical University,
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

05

SECTION



ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАТРИМОК У FANET З ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИМИ ПОВІТРЯНИМИ ВУЗЛАМИ

Сайко В. Г., Комаров В. О., Медведь Ю. Г.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-9>

ВСТУП

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів та бездротових технологій зв'язку зумовив формування нового класу розподілених мереж – Flying Ad Hoc Networks (FANET), у яких повітряні вузли виконують функції джерел, приймачів і ретрансляторів інформації^{1,2}. На відміну від класичних мобільних ad hoc мереж, FANET характеризуються тривимірною просторовою організацією, високою мобільністю вузлів, динамічною топологією та повною або частковою відсутністю фіксованої інфраструктури зв'язку. Зазначені особливості зумовлюють принципово нові вимоги до часових характеристик передавання даних і істотно ускладнюють забезпечення стабільних параметрів якості обслуговування в повітряних мережах³.

Однією з ключових проблем функціонування FANET є формування часових затримок під час багатохопової передачі інформації між просторово-розподіленими повітряними вузлами⁴. У таких мережах затримка передавання IP-пакетів визначається не лише параметрами фізичного каналу, але й сукупною дією механізмів доступу до середовища, процедур маршрутизації, обробки пакетів на проміжних повітряних вузлах, а також процесів буферизації та чергування. Просторовий розподіл повітряних платформ і їхня інтенсивна мобільність призводять

¹ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

³ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁴ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

до постійної перебудови топології мережі, змін кількості хопів та суттєвої варіативності end-to-end затримки, що є критичним для систем управління, координації та передавання даних у реальному часі⁵.

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що більшість існуючих підходів до оцінювання часових затримок у бездротових мережах орієнтовані на стаціонарні або слабкомобільні MANET та ґрунтуються на припущеннях відносної стабільності топології і часових характеристик каналів зв'язку⁶. У випадку FANET такі припущення є методологічно некоректними, оскільки не враховують тривимірної геометрії мережі, високих швидкостей руху повітряних вузлів, динамічних змін умов поширення радіосигналів та специфічної ролі БПЛА як активних багатофункціональних ретрансляторів^{7,8}. Унаслідок цього класичні моделі часової затримки не забезпечують адекватного опису часової поведінки багатохопових повітряних мереж і не дозволяють коректно ідентифікувати домінуючі чинники її формування.

Особливої уваги в FANET потребує аналіз впливу багатохопової архітектури на часові характеристики передавання даних. Кожен проміжний повітряний вузол додає до end-to-end затримки власні складові, пов'язані з доступом до середовища, обробкою пакетів і чергуванням, а динаміка маршрутів зумовлює їхню часову нестабільність⁹. За таких умов часова затримка набуває характеру випадкової величини, що ускладнює забезпечення детермінованих параметрів якості обслуговування та потребує глибшого аналітичного осмислення механізмів її формування.

У зв'язку з цим актуальним є аналітичне дослідження формування часових затримок у FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами, спрямоване не на розроблення конкретних методів оптимізації, а на системний розклад end-to-end затримки на складові та визначення їхньої ієрархії залежно від архітектури мережі, кількості хопів і динаміки

⁵ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁶ Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.

⁷ Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О. Спосіб та інтегрований комплекс визначення місцезнаходження наземних джерел радіовипромінювання на базі БПЛА спеціального призначення // *Збірник наукових праць ВІПІ: системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2025. Вип. 7. С. 165–176.

⁸ Патент України на корисну модель № 160108. Безпілотний літальний апарат мультикоптерного типу / Колонійцев О. В., Радзівілов Г. Д., Сайко В. Г., Комаров В. О. Опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.

⁹ Royer E. M., Toh C. K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks // *IEEE Personal Communications*. 1999. Vol. 6, no. 2. P. 46–55.

повітряних платформ¹⁰. Такий підхід створює методологічне підґрунтя для подальшого обґрунтованого вибору технічних і протокольних рішень у повітряних ad hoc мережах.

Метою розділу є аналіз формування часових затримок у FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами шляхом декомпозиції end-to-end затримки та виявлення ключових мережевих і архітектурних чинників, що визначають її величину та варіативність. Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто особливості FANET як класу ad hoc мереж, проаналізовано складові часової затримки на різних рівнях протоколів, а також досліджено вплив багатохлопової архітектури та мобільності повітряних вузлів на часові характеристики передавання даних¹¹.

1. FANET як клас просторово-розподілених ad hoc мереж

Flying Ad Hoc Networks (FANET) розглядаються як спеціалізований підклас мобільних ad hoc мереж, у якому вузлами мережі є безпілотні літальні апарати, здатні динамічно змінювати своє просторове положення та виконувати функції передачі, ретрансляції й обробки інформації¹². На відміну від традиційних MANET, де мобільність вузлів зазвичай обмежена двовимірною площиною та порівняно невеликими швидкостями, FANET функціонують у тривимірному просторі та характеризуються значно вищою динамікою топології, що принципово змінює часову поведінку мережі.

Просторовий розподіл повітряних вузлів у FANET формується не лише випадковими переміщеннями, а й цілеспрямованим рухом БПЛА відповідно до виконуваних завдань, що призводить до нерівномірної щільності мережі та постійної зміни відстаней між сусідніми вузлами¹³. У таких умовах кожен повітряний вузол водночас є фізично мобільним об'єктом і логічним елементом мережевої інфраструктури, що ускладнює застосування класичних моделей аналізу мережевих затримок.

Важливою особливістю FANET є багатохлопова архітектура передачі даних, яка виникає внаслідок обмеженої дальності радіоканалу,

¹⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

¹¹ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

¹² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

¹³ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

необхідності обходу зон радіотіней або розширення зони покриття за рахунок повітряних ретрансляторів¹⁴. У багатохопових FANET кожен БПЛА може виступати як проміжний вузол маршруту, додаючи до загальної часової затримки власні складові, пов'язані з доступом до середовища, обробкою пакетів і буферизацією.

На відміну від стаціонарних або слабкомобільних мереж, багатохоповість у FANET має динамічний характер: кількість хопів між джерелом і приймачем змінюється в часі залежно від просторової конфігурації повітряних вузлів і їхньої мобільності. Це призводить до того, що end-to-end затримка в FANET не може розглядатися як стаціонарна величина, а набуває властивостей випадкового процесу з істотною варіативністю.

Ще однією визначальною рисою FANET є специфічна роль повітряних вузлів як активних мережевих елементів, які поєднують функції фізичного носія, радіотерміналу та маршрутизатора¹⁵. Обмежені енергетичні ресурси, масогабаритні характеристики та обчислювальні можливості БПЛА накладають додаткові обмеження на реалізацію протокольних стеків і безпосередньо впливають на затримки обробки пакетів на кожному хопі.

У порівнянні з MANET, FANET характеризуються також іншими умовами поширення радіосигналів. Переважна наявність прямої видимості між повітряними вузлами зменшує вплив багатопрореневості, однак висока швидкість руху БПЛА спричиняє доплерівські зсуви та швидкі зміни параметрів каналу, що відбивається на стабільності передавання даних і частоті повторних передач¹⁶. У контексті формування часових затримок це означає, що фізичний рівень впливає на часові характеристики опосередковано через механізми доступу до середовища та керування передаванням.

Таким чином, FANET доцільно розглядати не просто як бездротову мережу з рухомими вузлами, а як просторово-розподілену динамічну систему, у якій часові затримки формуються внаслідок взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників¹⁷. Такий підхід створює основу для подальшої декомпозиції end-to-end затримки та аналізу її складових з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж.

¹⁴ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

¹⁵ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

¹⁶ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

¹⁷ Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.

2. Декомпозиція часової затримки в FANET

У багатохопових FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами часова затримка передавання даних між джерелом і приймачем формується як результат послідовного накопичення затримок на кожному проміжному хопі маршруту. На відміну від інфраструктурних мереж зі стаціонарними вузлами, у FANET кількість хопів, їхній склад та параметри каналів змінюються в часі, що зумовлює необхідність формального розкладу end-to-end затримки на складові з урахуванням багаторівневої протокольної архітектури¹⁸.

Загальну end-to-end затримку передавання пакета в FANET доцільно подати у вигляді суми затримок на всіх хопах маршруту:

$$T = \sum_{h=1}^H T_h \quad (1)$$

де:

T – кількість хопів між джерелом і приймачем;

T_h – сукупна затримка на h -му повітряному вузлі;

H – загальна кількість хопів.

Такий підхід є принциповим для FANET, оскільки кожен БПЛА виконує роль активного мережевого елемента і додає власний вклад у часову поведінку маршруту.

Затримка на окремому хопі може бути декомпозована на складові, пов'язані з різними рівнями протокового стеку:

$$T_h = T_{prop}(h) + T_{tx}(h) + T_{MAC}(h) + T_{proc}(h) + T_{queue}(h) \quad (2)$$

де:

T_{prop} – затримка поширення сигналу;

T_{tx} – затримка передавання кадру;

T_{MAC} – затримка доступу до середовища;

T_{proc} – затримка обробки кадру (пакету);

T_{queue} – перебування кадру в буфері;

Затримка поширення T_{prop} визначається відстанню між повітряними вузлами та швидкістю поширення електромагнітної хвилі:

$$T_{prop}(h) = \frac{d}{c} \quad (3)$$

¹⁸ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

де:

d – відстань між передавачем і приймачем;

c – швидкість світла у вільному просторі.

Для тактичних FANET, де відстані між БПЛА зазвичай становлять одиниці або десятки кілометрів, ця складова має порядок мікросекунд і, як правило, не є домінуючою. Проте зі збільшенням просторового рознесення або висоти платформи її внесок може зростати та накопичуватися при багатохоповій ретрансляції.

Затримка передавання T_{tx} визначається розміром кадру та швидкістю фізичного каналу:

$$T_{prop}(h) = \frac{L}{R} \quad (4)$$

де:

L – довжина кадру;

R – швидкість передавання даних.

У FANET ця складова істотно залежить від умов каналу, адаптивних схем модуляції та кодування, а також від обмежень пропускної здатності радіоінтерфейсу БПЛА.

Однією з ключових складових часої затримки в FANET є затримка доступу до середовища T_{MAC} , яка формується на каналному рівні. У мережах з випадковим доступом вона включає час очікування звільнення каналу, випадкові затримки відкладеного передавання та повторні передачі у разі колізій¹⁹. В умовах високої мобільності FANET ця складова може перевищувати всі інші та бути основним джерелом як середньої затримки, так і її варіативності.

Затримка обробки T_{proc} пов'язана з виконанням мережевих функцій на борту повітряного вузла, зокрема аналізом заголовків, прийняттям маршрутизаційних рішень, шифруванням і формуванням нових кадрів²⁰. Обмежені обчислювальні ресурси БПЛА зумовлюють те, що навіть порівняно прості операції можуть вносити відчутний вклад у загальну затримку, особливо при високій інтенсивності трафіку.

Окремо слід виділити затримку передування кадру в буфері T_{queue} , яка виникає внаслідок тимчасового накопичення пакетів у буферах повітряного вузла. У FANET ця складова є найбільш нестабільною, оскільки залежить

¹⁹ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

²⁰ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

від миттєвого навантаження, зміни маршрутів та параметрів доступу до середовища. Саме затримка *T_{queue}* часто визначає величину jitter та укладне підтримання детермінованих часових характеристик.

Таким чином, end-to-end затримка в FANET формується як багаторівнева сукупність детермінованих і випадкових складових, причому їхній відносний внесок істотно залежить від кількості хопів, архітектури доступу до середовища та динаміки просторового розподілу повітряних вузлів. Така декомпозиція створює формальну основу для подальшого аналізу впливу мобільності та топологічних змін на часові характеристики багатохопових FANET.

3. Вплив просторового розподілу та мобільності повітряних вузлів на часові затримки

Просторовий розподіл повітряних вузлів у FANET є одним з визначальних чинників формування часових затримок, оскільки безпосередньо впливає на топологію мережі, кількість хопів між джерелом і приймачем та стабільність маршрутів передавання даних. На відміну від наземних MANET, у яких вузли зазвичай обмежені двовимірним простором і відносно невеликими швидкостями переміщення, FANET функціонують у тривимірному середовищі з високою динамікою змін просторової конфігурації²¹.

Геометрія просторового розподілу повітряних вузлів визначає середню довжину маршрутів у мережі та кількість проміжних ретрансляцій, необхідних для передавання інформації. Зі збільшенням відстані між вузлами або зменшенням щільності FANET зростає імовірність багатохопової передачі, що призводить до лінійного зростання end-to-end затримки відповідно до кількості хопів²². У цьому контексті просторовий розподіл виступає не лише геометричним параметром, а й ключовою мережевою характеристикою, яка визначає часову поведінку FANET.

Висока мобільність повітряних вузлів зумовлює постійні зміни топології мережі, що призводить до частих перебудов маршрутів передавання даних. У таких умовах затримка формується не лише як сума затримок на окремих хобах, але й як результат процесів виявлення, підтримання та відновлення маршрутів²³. Часті розриви маршрутів у FANET спричиняють

²¹ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

²² Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

²³ Perkins C. E., Royer E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing // Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. 1999. P. 90–100.

додаткові затримки, пов'язані з повторною маршрутизацією, буферизацією пакетів та можливими втратами даних.

Особливістю FANET є те, що мобільність вузлів часто має цілеспрямований характер, зумовлений виконанням місій або тактичних завдань. Це призводить до нерівномірних змін щільності мережі в різних просторових зонах та появи тимчасових вузьких місць, у яких затримки різко зростають через перевантаження проміжних повітряних ретрансляторів²⁴. У таких сценаріях затримка чергування на окремих вузлах може стати домінуючою складовою end-to-end затримки.

Мобільність повітряних вузлів також впливає на стабільність радіоканалів між ними. Зміни відстані, кута взаємної орієнтації антен і швидкості руху призводять до флуктуацій рівня сигналу, доплерівських зсувів і змін ефективної швидкості передавання даних. У результаті це спричиняє збільшення кількості повторних передач на каналному рівні, що опосередковано підвищує часові затримки та їхню варіативність.

Суттєвим фактором є також просторово-часова кореляція руху повітряних вузлів. У випадку групового або ройового руху БПЛА зміни топології можуть мати квазідетермінований характер, що знижує варіативність затримки порівняно з випадковими моделями мобільності²⁵. Водночас при хаотичному русі або частих маневрах стабільність маршрутів різко зменшується, що негативно впливає на часові характеристики мережі.

У багатохопових FANET із просторово-розподіленими повітряними вузлами особливої уваги потребує взаємозв'язок між мобільністю та механізмами керування доступом до середовища. Зміна просторової конфігурації мережі впливає на кількість активних вузлів у зоні взаємного радіопокриття, що безпосередньо позначається на рівні конкуренції за доступ до каналу та величині затримки доступу²⁶. Унаслідок цього просторовий розподіл і мобільність повітряних вузлів формують кросрівневий вплив на часові затримки, поєднуючи фізичні, каналні та мережеві аспекти.

Таким чином, просторовий розподіл і мобільність повітряних вузлів є фундаментальними чинниками формування часових затримок у FANET. Вони визначають кількість хопів, стабільність маршрутів, умови доступу до середовища та характер чергування пакетів, що в сукупності формує

²⁴ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

²⁵ Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2002. Vol. 2, no. 5. P. 483–502.

²⁶ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

складну, нестационарну часову поведінку мережі. Усвідомлення цієї взаємодії є необхідною передумовою для подальшого аналізу механізмів детермінізації затримок у багатохопових FANET.

4. Роль механізмів доступу до середовища та часової синхронізації у формуванні затримок

Механізми доступу до спільного середовища передачі є одним з ключових чинників формування часових затримок у FANET, оскільки саме на канальному рівні виникають як детерміновані, так і випадкові складові затримки, пов'язані з конкуренцією вузлів за радіоресурс. У багатохопових повітряних мережах вплив механізмів доступу до середовища посилюється через високу мобільність вузлів, змінну щільність мережі та динамічний склад активних передавачів²⁷.

У FANET широкого поширення набули механізми доступу з випадковим принципом, зокрема протоколи на основі CSMA, які забезпечують простоту реалізації та гнучкість в умовах динамічної топології²⁸. Проте в багатохопових сценаріях такі механізми призводять до значної варіативності затримок, оскільки час доступу до каналу залежить від випадкових інтервалів відкладеного передавання, кількості колізій та повторних передач. За високої мобільності повітряних вузлів ці чинники формують істотний jitter, який накопичується при проходженні пакета через декілька хопів.

Альтернативою випадковому доступу є детерміновані механізми, засновані на часовому розподілі ресурсу, зокрема TDMA-подібні схеми. У таких системах кожному вузлу або групі вузлів заздалегідь призначається часовий інтервал для передачі, що дозволяє усунути колізії та обмежити максимальний час очікування доступу до середовища. Для FANET застосування часово-розділеного доступу є особливо актуальним з огляду на необхідність прогнозованих часових характеристик передавання даних.

Ключовою передумовою реалізації детермінованих механізмів доступу в FANET є наявність узгодженої часової шкали між просторово-розподіленими повітряними вузлами. За відсутності фіксованої інфраструктури синхронізація внутрішніх годинників вузлів стає складним завданням, оскільки класичні протоколи мережевої синхронізації в умовах високої мобільності та змінної затримки каналів не забезпечують достатньої точності.

²⁷ Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.

²⁸ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

У цьому контексті особливу роль відіграє використання глобальних навігаційних супутникових систем як джерела опорного часу. GNSS-синхронізація забезпечує єдину часову шкалу для всіх повітряних вузлів з точністю, достатньою для реалізації часово-детермінованого доступу до середовища. Завдяки цьому механізми доступу можуть бути організовані таким чином, що момент передачі пакета визначається не станом каналу, а глобально узгодженим часовим слотом.

Використання часово-синхронізованого доступу принципово змінює характер формування затримок у FANET. Час очікування доступу до середовища стає обмеженим зверху тривалістю кадру або фрейму, а колізії практично усуваються. У результаті затримка доступу до середовища набуває квазідетермінованого характеру, а її варіативність істотно зменшується. У багатохопових сценаріях це призводить до лінійного, передбачуваного накопичення затримок замість випадкового, характерного для CSMA-подібних протоколів.

Водночас застосування детермінованих механізмів доступу та часової синхронізації в FANET пов'язане з певними обмеженнями. Динамічна топологія мережі потребує адаптації розкладів доступу, а помилки синхронізації або втрата GNSS-сигналу можуть призводити до порушення часової узгодженості між вузлами. Тому в реальних FANET часто застосовуються гібридні підходи, які поєднують елементи детермінованого та випадкового доступу до середовища.

Таким чином, механізми доступу до середовища та часової синхронізації відіграють визначальну роль у формуванні часових затримок у FANET. Випадкові схеми доступу зумовлюють високу варіативність затримок, тоді як часово-синхронізовані механізми створюють передумови для їх детермінізації. Усвідомлення цього взаємозв'язку є важливим етапом аналітичного дослідження часової поведінки багатохопових FANET з просторово-розподіленими повітряними вузлами та формує основу для подальшого узагальнення отриманих результатів.

На відміну від інфраструктурних або слабкомобільних бездротових мереж, FANET характеризуються тривимірною динамічною топологією, високою мобільністю вузлів і відсутністю централізованого керування, що принципово впливає на механізми формування end-to-end затримок²⁹.

Часова затримка в FANET формується як сукупність складових різної природи, які накопичуються на кожному хопі маршруту. Запропонована декомпозиція end-to-end затримки дозволяє виокремити внесок затримок

²⁹ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

поширення, передавання, доступу до середовища, обробки та чергування пакетів, а також проаналізувати їхню відносну значущість залежно від архітектури мережі та умов функціонування³⁰.

Для тактичних і оперативних сценаріїв FANET затримка поширення сигналу, як правило, не є домінуючою складовою, тоді як вирішальний вплив на часові характеристики мають затримки каналного та мережевого рівнів, зокрема затримка доступу до середовища та затримка чергування. Їхня варіативність значною мірою визначається просторовим розподілом повітряних вузлів, кількістю хопів і динамікою топологічних змін³¹.

Аналіз впливу просторового розподілу та мобільності показав, що ці фактори безпосередньо формують нестационарний характер часових затримок у FANET. Зміни щільності мережі, перебудова маршрутів і нестабільність радіоканалів призводять до накопичення затримок та зростання jitter, що ускладнює забезпечення детермінованих часових характеристик при багатохоповій передачі даних³². Випадкові схеми доступу, характерні для класичних MANET, у FANET призводять до значної варіативності затримок, яка накопичується з кожним додатковим хопом. Натомість застосування часо-синхронізованих механізмів доступу створює передумови для обмеження та часткової детермінізації затримок, хоча їх реалізація в умовах динамічної топології пов'язана з низкою практичних обмежень.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що FANET доцільно розглядати як динамічну просторово-розподілену систему, у якій часова затримка є не статичним параметром, а результатом взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників. Такий підхід дозволяє коректно інтерпретувати часову поведінку багатохопових повітряних мереж і формує методологічну основу для подальших досліджень, спрямованих на підвищення передбачуваності та керованості часових характеристик FANET.

5. Методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення затримок у FANET

Розвиток FANET як основи для побудови розподілених повітряних систем зв'язку зумовив зростання вимог до часових характеристик передавання даних, особливо в багатохопових сценаріях. У таких мережах

³⁰ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

³¹ Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

³² Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

безпілотні літальні апарати одночасно виконують функції джерел, приймачів і ретрансляторів інформації, що призводить до накопичення часових затримок та зростання їх варіативності при проходженні пакетів через декілька повітряних вузлів³³.

У сучасних дослідженнях FANET основна увага традиційно приділяється мережевим і каналним механізмам керування затримками, зокрема маршрутизації та доступу до середовища. Водночас фізичний рівень і антенні системи часто розглядаються переважно з позицій підвищення пропускної здатності або енергетичної ефективності, тоді як їхній вплив на часові характеристики мережі залишається недостатньо систематизованим³⁴.

Разом з тим у FANET фізичний рівень має істотний непрямий вплив на формування часових затримок. Нестабільність радіоканалу, зміни умов поширення сигналу, доплерівські зсуви та флуктуації рівня сигналу призводять до зростання імовірності повторних передач, що, у свою чергу, безпосередньо відбивається на затримках доступу до середовища та процесах чергування на каналному рівні. У багатохопових FANET такі ефекти накопичуються, формуючи значну варіативність end-to-end затримок навіть за відносно стабільної топології.

Антенні системи відіграють у цьому контексті особливу роль, оскільки саме вони визначають просторові властивості радіолінків між повітряними вузлами. Використання спрямованих антен, просторової диверсифікації, MIMO та технологій формування променя впливає не лише на рівень сигналу, але й на стабільність каналу, імовірність розривів з'єднань та частоту повторних передач. Проте в більшості робіт ці механізми аналізуються ізольовано від часової поведінки мережі, без явного зв'язку з формуванням затримок і їх варіативності.

Особливості FANET, зокрема тривимірна мобільність, змінна геометрія мережі та обмежені ресурси повітряних платформ, ускладнюють пряме перенесення результатів, отриманих для наземних бездротових мереж, на повітряні сценарії³⁵. Це зумовлює необхідність окремого методичного осмислення антенних і фізичних методів саме в контексті зменшення часових затримок у FANET, а не лише покращення енергетичних або спектральних показників.

³³ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

³⁴ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

³⁵ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

У попередніх роботах показано, що для багатохопових FANET домінуючими з точки зору часової нестабільності є затримки, пов'язані з каналним рівнем і доступом до середовища. Водночас фізичний рівень формує вихідні умови для їх виникнення, визначаючи стабільність радіолінків і характер повторних передач. Це свідчить про доцільність розгляду антенних і РНУ-методів як базового рівня стабілізації часових характеристик, який доповнює мережеві та каналні механізми керування затримками.

У зв'язку з цим актуальним є методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення затримок у FANET, спрямований на систематизацію їхнього впливу на часові характеристики мережі без переходу до конкретних алгоритмічних реалізацій. Такий підхід дозволяє визначити роль фізичного рівня в загальній архітектурі керування затримками та створює підґрунтя для подальших інтеграційних досліджень, що поєднують РНУ-, MAC- та мережеві механізми.

Метою розділу є методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення часових затримок у FANET з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж. Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто роль фізичного рівня у формуванні часових характеристик, проаналізовано вплив антенних систем, просторової диверсифікації, МІМО та технологій формування променя на стабільність радіолінків, а також визначено обмеження застосування антенних і РНУ-підходів у FANET.

5.1. Роль фізичного рівня у формуванні часових затримок у FANET

Фізичний рівень у Flying Ad Hoc Networks (FANET) традиційно розглядається як підсистема, що визначає пропускну здатність, дальність зв'язку та енергетичну ефективність передавання даних. Водночас у багатохопових повітряних мережах фізичний рівень має істотний опосередкований вплив на часові характеристики передавання, формуючи вихідні умови для роботи каналного та мережевого рівнів³⁶.

У FANET затримка поширення сигналу зазвичай не є домінуючою складовою end-to-end затримки, однак фізичні властивості радіоканалу безпосередньо впливають на імовірність помилок, повторних передач і розривів з'єднань. Погіршення якості каналу призводить до зростання кількості повторних передач на каналному рівні, що викликає збільшення затримки доступу до середовища та накопичення jitter у багатохопових маршрутах³⁷.

³⁶ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

³⁷ Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

Особливістю FANET є динамічний характер радіоканалу, зумовлений тривимірною мобільністю повітряних вузлів, зміною їх взаємного просторового положення та швидкостей руху. Доплерівські зсуви, флуктуації рівня сигналу та швидка зміна умов прямої видимості призводять до нестаціонарності каналу навіть у межах одного сеансу передавання³⁸. У таких умовах фізичний рівень стає джерелом часової нестабільності, яка далі транслюється у вигляді варіативності затримок на вищих рівнях протокольного стеку.

У багатохопових FANET фізичний рівень впливає на часові характеристики не ізольовано, а через ланцюг причинно-наслідкових зв'язків: нестабільність каналу → зростання BER → повторні передачі → збільшення MAC-затримки → накопичення jitter. Такий механізм зумовлює те, що навіть незначні покращення стабільності фізичного каналу можуть мати непропорційно великий ефект щодо зменшення варіативності end-to-end затримки³⁹.

Для FANET характерна також залежність часових характеристик від умов прямої та непрямой видимості між повітряними вузлами. Хоча повітряні платформи часто забезпечують сприятливі умови LoS-зв'язку, маневри БПЛА, зміна висоти та орієнтації антен можуть призводити до короткочасних погіршень каналу або переходів у NLoS-режими. Такі події супроводжуються різкими змінами ефективної швидкості передавання та затримок, що особливо критично для багатохопових маршрутів⁴⁰.

Антенні системи та РНУ-рішення визначають просторові та спектральні властивості радіолінків у FANET, а отже – і ступінь стабільності фізичного каналу. На відміну від мережевих і каналних механізмів, які реагують на вже наявні порушення зв'язку, фізичний рівень формує первинні умови для їх виникнення або запобігання. У цьому сенсі РНУ може розглядатися як базовий рівень стабілізації часових характеристик, що зменшує навантаження на MAC і мережеві механізми керування затримками⁴¹.

Таким чином, фізичний рівень у FANET слід розглядати не лише як засіб забезпечення зв'язку, але і як непрямий інструмент керування часовими затримками. Методичний аналіз РНУ-рішень у контексті часових

³⁸ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

³⁹ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁴⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁴¹ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

характеристик дозволяє переосмислити роль антенних систем і фізичних методів як складової комплексного підходу до зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах. Це створює основу для подальшого розгляду антенних механізмів стабілізації часових характеристик у FANET.

5.2. Антенні системи як засіб стабілізації часових характеристик у FANET

Антенні системи є одним із ключових елементів фізичного рівня FANET, які визначають просторові властивості радіолінків між повітряними вузлами та безпосередньо впливають на стабільність передавання даних. У контексті часових характеристик антенні рішення мають розглядатися не лише як засіб підвищення рівня сигналу або пропускної здатності, а як інструмент зменшення варіативності затримок шляхом стабілізації фізичного каналу⁴².

У FANET традиційно застосовуються всеспрямовані антени, що забезпечують простоту реалізації та нечутливість до орієнтації повітряної платформи. Проте такі антени формують радіолінки з високою чутливістю до завад, багатопроменевого поширення та взаємних перешкод між сусідніми вузлами. У багатохопових сценаріях це призводить до зростання імовірності помилок і повторних передач, що транслюється у вигляді збільшення затримки доступу до середовища та накопичення jitter⁴³.

Застосування спрямованих антен у FANET дозволяє зосередити енергію випромінювання в напрямку цільового вузла, зменшуючи рівень завад і підвищуючи стабільність радіолінку. У часовому аспекті це означає зменшення кількості повторних передач і більш передбачувану поведінку каналного рівня, що безпосередньо впливає на варіативність затримок⁴⁴. Таким чином, спрямовані антени можуть розглядатися як механізм непрямого керування часовими характеристиками мережі.

Особливе значення антенні системи набувають у FANET з високою щільністю вузлів або в сценаріях інтенсивного багатохопового ретранслявання. Обмеження просторового випромінювання дозволяє зменшити кількість конкурентних передавачів у зоні взаємного впливу, що знижує рівень колізій і флуктуацій затримки доступу до середовища. У результаті end-to-end затримка стає менш варіативною навіть за збереження випадкових механізмів доступу на каналному рівні⁴⁵.

⁴² Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

⁴³ Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

⁴⁴ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁴⁵ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

Умови експлуатації FANET накладають специфічні вимоги на антенні системи. Тривимірна мобільність повітряних вузлів і постійна зміна їх взаємної орієнтації ускладнюють використання жорстко фіксованих спрямованих антен. Проте навіть помірна спрямованість або адаптивна перебудова діаграми випромінювання може істотно зменшити флуктуації якості каналу та пов'язані з ними часові нестабільності⁴⁶.

Антенні системи також впливають на часові характеристики FANET через зміну просторової структури мережі. Формування більш стабільних і довготривалих лінків між окремими парами вузлів сприяє зменшенню частоти перебудови маршрутів і, відповідно, зниженню варіативності затримок, пов'язаних з маршрутизаційними подіями. У цьому сенсі антенні рішення мають міжрівневий вплив, поєднуючи фізичні та мережеві аспекти формування часових характеристик.

Таким чином, антенні системи у FANET доцільно розглядати як базовий засіб стабілізації часових характеристик, який діє на фізичному рівні та зменшує джерела варіативності затримок ще до їх прояву на каналному та мережевому рівнях. Методичний аналіз антенних рішень створює основу для подальшого розгляду просторової диверсифікації, MIMO та технологій формування променя як інструментів зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.3. Просторова диверсифікація та MIMO у контексті часових затримок у FANET

Просторова диверсифікація та багатоканальні технології MIMO традиційно розглядаються як засоби підвищення пропускної здатності та надійності бездротових систем зв'язку. Однак у контексті Flying Ad Hoc Networks (FANET) їх доцільно аналізувати також з позицій впливу на часові характеристики передавання, зокрема на стабільність затримок у багатохопових сценаріях⁴⁷. Просторова диверсифікація ґрунтується на використанні декількох антенних елементів для формування незалежних або частково корельованих каналів передавання. У FANET, де радіоканал зазнає швидких флуктуацій унаслідок мобільності повітряних вузлів і змін геометрії мережі, диверсифікація дозволяє зменшити імовірність глибоких завмирань та короточасних розривів зв'язку. У часовому вимірі це означає зниження кількості повторних передач і більш стабільну поведінку каналного рівня⁴⁸.

⁴⁶ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁴⁷ Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.

⁴⁸ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

У багатохопових FANET ефект просторової диверсифікації має властивість накопичуватися. Стабілізація кожного окремого радіолінку зменшує варіативність затримок на відповідному хопі, що у сукупності призводить до зниження jitter на end-to-end рівні. Таким чином, навіть помірне підвищення надійності фізичного каналу може мати непропорційно великий вплив на часові характеристики багатохопового маршруту⁴⁹.

Технології MIMO у FANET можуть реалізовуватися як у режимі просторової диверсифікації, так і у вигляді просторового мультиплексування. У контексті зменшення затримок і їх варіативності пріоритетним є саме диверсифікаційний режим, оскільки він спрямований на підвищення стабільності каналу, а не на збільшення пікової швидкості передавання. Використання MIMO як інструмента стабілізації знижує ймовірність повторних передач і, відповідно, зменшує затримки доступу до середовища та чергування пакетів⁵⁰.

Особливістю FANET є те, що ефективність просторової диверсифікації та MIMO суттєво залежить від геометрії розміщення антен на повітряній платформі, її орієнтації в просторі та взаємного розташування вузлів. Тривимірна мобільність може як підвищувати ефективність диверсифікації за рахунок зміни просторових кореляцій, так і знижувати її через обмеження масо-габаритних характеристик БПЛА та нестабільність орієнтації антен⁵¹.

З методичної точки зору важливо підкреслити, що застосування MIMO у FANET не повинно розглядатися ізольовано від механізмів доступу до середовища. Стабілізація фізичного каналу зменшує варіативність часу передавання кадрів і повторних передач, що створює більш сприятливі умови для прогнозованої роботи MAC-рівня навіть у випадку використання гібридних або частково випадкових схем доступу⁵².

Водночас використання просторової диверсифікації та MIMO у FANET супроводжується низкою обмежень, пов'язаних з енергоспоживанням, обчислювальною складністю та вимогами до апаратної реалізації. Ці фактори можуть опосередковано впливати на затримки обробки пакетів

⁴⁹ Kurose J. F., Ross K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁵⁰ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁵¹ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁵² Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

і повинні враховуватися при методичному аналізі їх доцільності для конкретних сценаріїв застосування⁵³.

Таким чином, просторова диверсифікація та MIMO у FANET доцільно розглядати як фізичні механізми стабілізації часових характеристик, які зменшують джерела варіативності затримок на рівні радіоканалу та опосередковано впливають на роботу каналного і мережевого рівнів. Це створює методичне підґрунтя для подальшого аналізу технологій формування променя та multi-beam підходів як засобів зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.4. Технології формування променя та multi-beam підходи як чинники зменшення затримок у FANET

Технології формування променя (beamforming) та multi-beam підходи є логічним розвитком антенних і MIMO-рішень та набувають особливого значення в Flying Ad Hoc Networks (FANET) з огляду на тривимірну мобільність вузлів і динамічну зміну просторової конфігурації мережі. У часовому контексті ці технології доцільно розглядати не лише як засіб просторового фокусування енергії, а як механізм стабілізації радіолінків, що опосередковано зменшує варіативність затримок у багатохопових сценаріях.

Beamforming дозволяє адаптивно змінювати діаграму випромінювання антенної системи відповідно до просторового положення цільового вузла. У FANET це сприяє зменшенню флуктуацій рівня сигналу, викликаних маневрами повітряних платформ, та зниженню впливу сторонніх завад. У часовому вимірі стабілізація радіолінку призводить до зменшення імовірності повторних передач і більш передбачуваної роботи каналного рівня, що знижує варіативність затримок доступу до середовища⁵⁴.

У багатохопових FANET переваги beamforming проявляються кумулятивно. Кожен стабілізований лінк зменшує локальну варіативність затримок, яка в іншому випадку накопичувалася б уздовж маршруту. Таким чином, навіть часткове застосування формування променя на окремих хопах може позитивно впливати на end-to-end часові характеристики мережі⁵⁵.

Multi-beam підходи, що передбачають одночасне формування декількох просторово розділених променів, відкривають додаткові можливості зменшення затримок у FANET. З методичної точки зору їх значення полягає

⁵³ Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

⁵⁴ Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.

⁵⁵ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

у паралелізації радіолінків, яка дозволяє зменшити ефект послідовного store-and-forward передавання на проміжних вузлах. За наявності декількох стабільних променів повітряний вузол може підтримувати одночасні з'єднання з кількома сусідами, що знижує черги на каналному рівні та обмежує накопичення jitter ⁵⁶.

У FANET застосування beamforming і multi-beam технологій ускладнюється динамічною зміною взаємної орієнтації повітряних платформ і швидкою перебудовою топології. Помилки наведення променя або затримки його адаптації можуть тимчасово погіршувати якість каналу, що в часовому вимірі проявляється як короткочасні сплески затримок. Тому з методичної точки зору важливо розглядати формування променя не як ідеалізований механізм, а як інструмент із певними обмеженнями та компромісами між стабільністю каналу й складністю реалізації⁵⁷.

Важливим аспектом є також взаємодія beamforming-рішень із механізмами доступу до середовища. Стабілізація фізичного каналу та зменшення рівня міжвузлових завад створюють передумови для більш прогнозованої роботи MAC-рівня, навіть у випадку використання гібридних або частково випадкових схем доступу. Таким чином, технології формування променя виступають підсилювачем ефективності каналних механізмів керування затримками, а не їх заміною⁵⁸.

З методичної точки зору beamforming і multi-beam підходи в FANET доцільно розглядати як фізичні механізми обмеження джерел варіативності затримок, що виникають через нестабільність радіолінків і конкуренцію за доступ до середовища. Їх застосування створює більш стабільне фізичне підґрунтя для роботи каналного та мережевого рівнів і знижує ймовірність різких флуктуацій часових характеристик у багатопопових повітряних мережах.

Розглянуті антенні та фізичні методи зменшення часових затримок у FANET мають спільну методичну основу, яка полягає у стабілізації радіолінків як первинного джерела часової нестабільності. Незважаючи на відмінності у принципах реалізації, спрямовані антени, просторова диверсифікація, MIMO та технології формування променя впливають на часові характеристики мережі через подібні причинно-наслідкові механізми.

⁵⁶ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁵⁷ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁵⁸ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

Антенні системи забезпечують просторову селекцію передавання, зменшуючи рівень завад і флуктуації якості каналу. Просторова диверсифікація та МІМО підвищують надійність фізичного каналу за рахунок використання декількох просторових ступенів свободи, зменшуючи імовірність глибоких завмирань і короткочасних розривів з'єднання. Технології формування променя та multi-beam підходи, у свою чергу, дозволяють адаптивно підтримувати стабільні лінки та обмежувати взаємний вплив сусідніх вузлів у щільних або багатохопових конфігураціях.

У часовому вимірі всі ці механізми зменшують кількість повторних передач, флуктуації часу доступу до середовища та нестабільність чергування пакетів, які є основними джерелами варіативності затримок у FANET. Таким чином, антенні та РНУ-підходи виконують роль базового рівня стабілізації часових характеристик, формуючи сприятливі умови для роботи каналного та мережевого рівнів без необхідності їх жорсткої детермінізації.

Водночас спільною рисою розглянутих методів є їх непрямий характер впливу на часові затримки. Антенні та фізичні рішення не керують затримками безпосередньо, а зменшують варіативність радіоканалу, яка транслюється у часову нестабільність на вищих рівнях протокольного стеку. Це зумовлює необхідність розглядати антенні, МІМО та beamforming-підходи не ізольовано, а у взаємодії з механізмами доступу до середовища, маршрутизації та часової синхронізації.

Таким чином, антенні та РНУ-методи у FANET доцільно інтерпретувати як фундаментальний компонент комплексного підходу до зменшення часових затримок, який доповнює мережеві та каналні механізми та створює методичне підґрунтя для подальшого аналізу їх обмежень і практичної застосовності в умовах реальних повітряних мереж.

5.5. РНУ-методи адаптації та їх вплив на часові затримки у FANET

Методи адаптації на фізичному рівні є невід'ємною складовою сучасних бездротових систем зв'язку та широко застосовуються для підтримання стійкості каналу в умовах змінного радіосередовища. У Flying Ad Hoc Networks (FANET) РНУ-адаптація набуває особливого значення з огляду на тривимірну мобільність повітряних вузлів, швидкі флуктуації якості каналу та обмежені ресурси повітряних платформ. У часовому контексті такі методи доцільно розглядати як механізми опосередкованого впливу на затримки, які формують передумови для стабільної роботи каналного рівня.

Одним із базових інструментів РНУ-адаптації є адаптивна модуляція та кодування (АМС), що дозволяє змінювати параметри передавання залежно від поточного стану каналу. У FANET застосування АМС спрямоване не

лише на підвищення середньої швидкості передавання, але й на зменшення імовірності помилок у несприятливих умовах. У часовому вимірі це означає скорочення кількості повторних передач і, відповідно, зменшення варіативності затримок доступу до середовища та чергування пакетів.

Разом з тим, часті зміни режимів модуляції та кодування можуть самі по собі стати джерелом часової нестабільності, особливо в умовах швидких флуктуацій каналу. Запізніла або неточна оцінка стану каналу призводить до неузгодженості параметрів передавання та короткочасного погіршення якості зв'язку, що у багатохопових FANET проявляється у вигляді сплесків затримок. Це вимагає методичного балансу між швидкістю адаптації та стабільністю часових характеристик⁵⁹.

Іншим важливим аспектом РНУ-адаптації є вибір структури кадру та тривалості фізичних інтервалів передавання. Зменшення довжини кадрів і використання режимів із низькою затримкою дозволяє обмежити час, необхідний для повторної передачі у разі помилки, що знижує пікові значення затримок. Водночас короткі кадри збільшують накладні витрати та можуть призводити до зростання навантаження на каналний рівень, що повинно враховуватися при методичному аналізі їх доцільності⁶⁰.

РНУ-методи адаптації також пов'язані з керуванням потужністю передавання, яке впливає на стабільність радіолінку та рівень міжвузлових завад. У FANET надмірні флуктуації потужності можуть призводити до нестабільної якості каналу та зростання варіативності затримок, тоді як помірні та прогнозовані адаптації сприяє стабілізації часових характеристик. У цьому сенсі керування потужністю слід розглядати не лише як енергетичний, а і як часовий механізм⁶¹.

У багатохопових FANET важливо враховувати кумулятивний ефект РНУ-адаптації. Навіть незначна нестабільність параметрів фізичного рівня на окремому хопі може накопичуватися вздовж маршруту, формуючи істотну варіативність end-to-end затримок. Тому РНУ-адаптація має розглядатися з позицій узгодженості її часової поведінки з механізмами доступу до середовища та маршрутизації, а не як автономний процес⁶².

Таким чином, РНУ-методи адаптації у FANET виконують подвійну роль щодо часових характеристик: з одного боку, вони зменшують

⁵⁹ Kurose J. F., Ross K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

⁶⁰ Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. *Computer Networks*. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.

⁶¹ Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.

⁶² Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.

джерела варіативності затримок шляхом стабілізації каналу, а з іншого – за невдалого або надмірно агресивного застосування можуть самі стати джерелом часової нестабільності. Методичний аналіз цих компромісів дозволяє коректно визначити місце РНУ-адаптації у загальній архітектурі зменшення затримок у багатохопових повітряних мережах.

5.6. Обмеження антенних і РНУ-підходів у FANET

Незважаючи на потенціал антенних і фізичних методів щодо зменшення часових затримок у Flying Ad Hoc Networks (FANET), їх практичне застосування супроводжується низкою обмежень, зумовлених специфікою повітряних платформ, динамікою мережі та взаємодією між рівнями протокольного стеку. Методичний аналіз цих обмежень є необхідним для коректної інтерпретації можливостей РНУ-рівня у контексті керування часовими характеристиками.

Одним із базових обмежень є масо-габаритні та енергетичні характеристики безпілотних літальних апаратів. Реалізація складних антенних систем, багатоканальних МІМО-рішень або адаптивного формування променя потребує додаткових антенних елементів, радіочастотних трактів і обчислювальних ресурсів, що може бути критичним для малорозмірних БПЛА з обмеженим енергобюджетом. У часовому аспекті це може призводити до зростання затримок обробки та непрямих джерел варіативності.

Іншим важливим фактором є тривимірна мобільність і нестабільна орієнтація повітряних платформ. Для антенних систем із вираженою спрямованістю або beamforming-рішень точність наведення променя та швидкість його адаптації мають критичне значення. Помилки орієнтації, затримки в оновленні діаграми випромінювання або інерційність механізмів керування можуть призводити до короткочасного погіршення якості каналу, що у багатохопових FANET проявляється у вигляді сплесків затримок⁶³.

Обмеженням методичного характеру є також неможливість ізольованого застосування РНУ-підходів для повноцінного керування часовими затримками. Антенні та фізичні методи впливають на часові характеристики опосередковано, через стабілізацію радіоканалу, і не можуть самостійно забезпечити обмеження часу доступу до середовища або контроль чергування пакетів. За відсутності узгоджених механізмів на каналному та мережевому рівнях ефект від РНУ-стабілізації може бути частково або повністю нівельований⁶⁴.

⁶³ Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // Ad Hoc Networks. 2018. Vol. 68. P. 1–15.

⁶⁴ Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.

Додаткові обмеження пов'язані з адаптивними механізмами фізичного рівня. Часті зміни режимів модуляції, кодування або потужності передавання, хоча й спрямовані на підтримання якості каналу, можуть самі по собі створювати часову нестабільність за рахунок затримок оцінювання стану каналу та перебудови параметрів передавання. У FANET із високою швидкістю мобільності ці ефекти посилюються, що вимагає обережного методичного підходу до застосування РНУ-адаптації.

Суттєвим чинником є також взаємодія між антенними рішеннями та механізмами доступу до середовища. Наприклад, використання спрямованих антен або multi-beam підходів змінює просторову структуру завад, що може призводити до неочікуваної поведінки випадкових схем доступу та впливати на їх часові характеристики. Без відповідної адаптації MAC-рівня такі ефекти можуть зменшувати очікуваний позитивний вплив РНУ-методів на затримки⁶⁵.

Таким чином, антенні та РНУ-підходи у FANET мають розглядатися як обмежений, але важливий компонент комплексної архітектури керування часовими затримками. Їх ефективність істотно залежить від апаратних можливостей повітряних платформ, характеру мобільності, узгодженості з канальними та мережевими механізмами, а також від умов експлуатації. Усвідомлення цих обмежень є необхідною передумовою для коректного застосування антенних і фізичних методів та формує основу для подальших інтеграційних досліджень у галузі FANET.

У розділі здійснено методичний аналіз антенних і фізичних методів зменшення часових затримок у FANET з урахуванням специфіки багатохопових повітряних мереж. Показано, що фізичний рівень і антенні системи відіграють важливу, хоча й опосередковану роль у формуванні часових характеристик передавання даних, визначаючи стабільність радіолінків та початкові умови для роботи канального і мережевого рівнів.

У результаті аналізу встановлено, що антенні рішення, такі як спрямовані антени, просторова диверсифікація, МІМО та технології формування променя, сприяють зменшенню варіативності часових затримок шляхом стабілізації фізичного каналу та зниження імовірності повторних передач. У багатохопових FANET ефект таких методів має кумулятивний характер, оскільки зменшення часової нестабільності на окремих хопах призводить до зниження jitter на рівні end-to-end з'єднання.

Доведено, що РНУ-методи адаптації, зокрема адаптивна модуляція і кодування, вибір структури кадрів та керування потужністю передавання,

⁶⁵ Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.

можуть як зменшувати, так і збільшувати варіативність затримок залежно від способу їх застосування. Це зумовлює необхідність методичного балансу між стабілізацією каналу та часовою узгодженістю параметрів фізичного рівня, особливо в умовах високої мобільності повітряних вузлів. Таким чином антенні та РНУ-підходи не можуть розглядатися як самодостатні засоби керування часовими затримками у FANET. Їх вплив на часові характеристики має непрямий характер і істотно залежить від узгодженості з механізмами доступу до середовища, маршрутизації та часової синхронізації. За відсутності такої узгодженості позитивний ефект від стабілізації фізичного каналу може бути частково або повністю нівельований на вищих рівнях протокольного стеку.

Отримані результати дозволяють інтерпретувати антенні та фізичні методи як базовий рівень стабілізації часових характеристик у FANET, який зменшує джерела варіативності затримок ще до їх прояву на каналному та мережевому рівнях. Такий підхід доповнює мережеві й каналні механізми керування затримками та формує методичне підґрунтя для комплексних архітектурних рішень⁶⁶.

ВИСНОВКИ

1. FANET доцільно розглядати як просторово-розподілені динамічні системи, у яких end-to-end затримка є нестационарною величиною та формується внаслідок взаємодії топологічних, протокольних і фізичних чинників.

2. Запропонована декомпозиція часової затримки дозволяє формально виокремити внесок затримок поширення, передавання, доступу до середовища, обробки та чергування пакетів на кожному хопі багатохопового маршруту.

3. Для більшості практичних сценаріїв FANET домінуючими є затримки каналного та мережевого рівнів, зокрема затримка доступу до середовища і затримка чергування, тоді як затримка поширення сигналу має обмежений вплив.

4. Просторовий розподіл і висока мобільність повітряних вузлів безпосередньо визначають кількість хопів, стабільність маршрутів і рівень конкуренції за доступ до радіоканалу, що зумовлює значну варіативність часових характеристик.

⁶⁶ Сайко В. Г., Зінченко М. О., Комаров В. О., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Модель інтегрованого мережевого комплексу зв'язку з використанням БПЛА для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 35 (75), № 2, ч. 1. С. 130–138.

5. Випадкові механізми доступу до середовища призводять до накопичення jitter у багатохопових FANET, тоді як часово-синхронізовані та детерміновані підходи створюють передумови для обмеження затримок і підвищення їх передбачуваності.

6. Фізичний рівень і антенні системи мають істотний непрямий вплив на часові характеристики FANET через стабільність радіолінків і частоту повторних передач.

7. Антенні рішення, просторова диверсифікація, MIMO та технології формування променя доцільно розглядати як базові механізми стабілізації часових затримок, що доповнюють каналні й мережеві методи.

8. Отримані результати створюють методичну основу для подальших досліджень, спрямованих на детермінізацію та керування часовими характеристиками багатохопових FANET у тактичних і критичних застосуваннях.

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано особливості формування часових затримок у Flying Ad Hoc Networks (FANET) з просторово-розподіленими повітряними вузлами. FANET розглядаються як динамічні багатохопові мережі з тривимірною топологією та високою мобільністю вузлів, що зумовлює нестационарний характер end-to-end затримки. Запропоновано декомпозицію часової затримки з урахуванням внеску фізичного, каналного та мережевого рівнів, а також процесів обробки й чергування пакетів на проміжних вузлах. Показано, що у багатохопових FANET домінуючий вплив на часові характеристики мають затримки доступу до середовища та буферизації, тоді як затримка поширення сигналу зазвичай є другорядною. Досліджено вплив просторового розподілу та мобільності повітряних вузлів на варіативність затримок і jitter. Окрему увагу приділено ролі механізмів доступу до середовища та часової синхронізації у формуванні детермінованих і випадкових складових затримки. Виконано методичний аналіз антенних і фізичних методів як базового рівня стабілізації часових характеристик у FANET. Отримані результати формують методологічне підґрунтя для подальших досліджень і проектування повітряних мереж із прогнозованими часовими характеристиками.

Література

1. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 1123–1152.

2. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey // *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1254–1270.
3. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. P. 2334–2360.
4. Yanmaz E., Yahyanejad S., Rinner B., Hellwagner H., Bettstetter C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing // *Ad Hoc Networks*. 2018. Vol. 68. P. 1–15.
5. Corson S., Macker J. Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations : RFC 2501. IETF, 1999.
6. Royer E. M., Toh C. K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks // *IEEE Personal Communications*. 1999. Vol. 6, no. 2. P. 46–55.
7. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 7th ed. Pearson Education, 2017. 864 p.
8. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18, no. 3. P. 535–547.
9. Perkins C. E., Royer E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing // *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. 1999. P. 90–100.
10. Camp T., Boleng J., Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research // *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2002. Vol. 2, no. 5. P. 483–502.
11. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 5th ed. Pearson Education, 2011. 960 p.
12. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 664 p.
13. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.
14. Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О. Спосіб та інтегрований комплекс визначення місцезнаходження наземних джерел радіовипромінювання на базі БПЛА спеціального призначення // *Збірник наукових праць ВІПІ: системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2025. Вип. 7. С. 165–176.
15. Сайко В. Г., Зінченко М. О., Комаров В. О., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я. Модель інтегрованого мережевого комплексу зв'язку з використанням БПЛА для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення // *Вчені записки*

Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 35 (75), № 2, ч. 1. С. 130–138.

16. Патент України на корисну модель № 160108. Безпілотний літальний апарат мультикоптерного типу / Коломійцев О. В., Радзівілов Г. Д., Сайко В. Г., Комаров В. О. Опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.

Information about the authors:

Saiko Volodymyr Hryhorovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Communication Systems and Networks,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine

Komarov Volodymyr Oleksandrovych,

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine

Medved Yurii Hryhorovych,

Head of the Research Laboratory,
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications
and Information Technology,
45/1, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01011, Ukraine

06

SECTION



TRANSPORT

СТАЛИЙ РОЗВИТОК У ЛОГІСТИЦІ ЯК КЛЮЧОВИЙ СТРАТЕГІЧНИЙ ОРІЄНТИР

Білоног О. Є.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-10>

ВСТУП

Аналізуючи сталий розвиток як стратегічну концепцію, яка спрямована на забезпечення гармонійного поєднання економічного зростання, екологічної рівноваги та соціального добробуту, варто зазначити, що такий підхід ґрунтується на встановленні балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі.

На рисунку 1 представлено концептуальні засади сталого розвитку, що інтерпретуються як цілісна та збалансована система взаємопов'язаних економічної, екологічної та соціальної складових. Економічна складова орієнтована на забезпечення ефективного використання ресурсів, підвищення конкурентоспроможності суб'єктів господарювання та формування довгострокової економічної стабільності. Екологічна складова передбачає мінімізацію негативного впливу господарської діяльності на довкілля, раціональне використання природних ресурсів, зменшення викидів забруднюючих речовин і впровадження екологічно безпечних технологій. Соціальна складова відображає спрямованість сталого розвитку на покращення якості життя населення, забезпечення безпечних і гідних умов праці, розвиток людського капіталу та посилення соціальної відповідальності бізнесу.

Взаємодія зазначених складових формує інтегровану модель сталого розвитку, у межах якої досягнення економічних результатів не відбувається за рахунок погіршення соціальних умов або деградації довкілля, а соціальний прогрес та екологічна безпека розглядаються як необхідні передумови довгострокового економічного зростання. Таким чином, сталий розвиток постає як динамічний процес гармонізації економічних, соціальних та екологічних інтересів у стратегічній перспективі.



Рис. 1. Концептуальні засади сталого розвитку як збалансованої системи взаємопов'язаних економічної, екологічної та соціальної складових

Концепція сталого розвитку, яка базується на синтезі трьох взаємопов'язаних компонентів, а саме – економічної, екологічної та соціальної складової, може розглядатися як альтернатива моделі екстенсивного економічного зростання, яка призводила до екологічних криз, соціальної нерівності та виснаження ресурсів. Отже, зважаючи на те, що сталий розвиток є одним із стратегічних пріоритетів розвитку людства на найближчу перспективу, впровадження його підходів є актуальним завданням для всіх сфер, в тому числі і логістики. В контексті логістичної діяльності це буде сприяти, з одного боку, зниженню негативного екологічного впливу, оптимізації витрат та підвищенню ефективності використання ресурсів, а, з іншого, зростанню соціальної відповідальності підприємств, підвищенню їх конкурентоспроможності та забезпеченню довгострокової стійкості в умовах сучасних глобальних викликів.

1. Взаємозв'язок сталого розвитку та логістики

Згідно з міжнародними документами, зокрема Декларацією Ріо-де-Жанейро з навколишнього середовища і розвитку, (1992 р.)¹; Порядком

¹ Декларація Ріо-де-Жанейро з навколишнього середовища і розвитку, (1992 р.). URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/riodecl.shtml

денним на XXI століття²; Цілями сталого розвитку ООН, (2015 р.)³, можна сформулювати вісім ключових принципів сталого розвитку:

1. Принцип інтеграції, який полягає у взаємопов'язаному вирішенні економічних, екологічних та соціальних проблем.

2. Принцип міжпоколінної справедливості, який декларує турботу про потреби майбутніх поколінь.

3. Принцип внутрішньопоколінної справедливості, який є основою до зменшення нерівності між людьми, регіонами, країнами тощо.

4. Принцип запобіжних дій, який передбачає проактивні дії, тобто попередження негативних наслідків діяльності, а не лише їх ліквідацію.

5. Принцип «забруднювач платить», який вводить відповідальність виробника або користувача (споживача) за негативний вплив на довкілля.

6. Принцип участі, тобто залучення громадськості, бізнесу, влади до прийняття рішень у сфері сталого розвитку.

7. Принцип раціонального використання природних ресурсів, який має забезпечити баланс між споживанням і відновленням.

8. Принцип глобального партнерства який зобов'язує до побудови міжнародної співпраці у вирішенні глобальних екологічних і соціальних проблем.

Сутність шостого принципу, тобто принципу участі, залучення громадськості (партисипація), бізнесу, влади до прийняття рішень у сфері сталого розвитку передбачає необхідність глибшого аналізу множини відповідальних. Загалом, множина суб'єктів, на які покладається відповідальність за реалізацію концепції сталого розвитку, є дуже широкою і залежить як від рівня, так і від контексту. Зокрема, за ієрархією рівнів відповідальності серед основних можна виділити наступні: міжнародні інституції, держави та їх уряди, представників бізнесу різного рівня, місцеві громади, громадські та неурядові організації, та кожного окремого індивідуума, рисунок 2.

На найвищому рівні ієрархії, як видно з рисунка 2, передбачається взаємодія держав та їх урядів з міжнародними інституціями, яка має багаторівневий і системний характер та базується на поєднанні політичної координації, нормативного регулювання, фінансової підтримки й обміну знаннями.

Роль міжнародних інституцій в умовах впровадження підходів сталого розвитку полягає, з одного боку, у розробці ініціатив, стратегічній координації дій таких міжнародних організацій, як ООН, Світовий банк,

² Порядок денний на XXI століття. URL: <https://dev.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok/bazovi-dokumenti/>

³ Цілі сталого розвитку. Організація об'єднаних націй. Україна. URL: <https://ukraine.un.org>

ЄС тощо, які розробляють рамкові угоди, надають фінансову підтримку та забезпечують моніторинг, а, з іншого боку, у пошуку та забезпеченні фінансування через гранти, кредити та інші ресурси.



Рис. 2. Ієрархія рівнів відповідальності за реалізацію концепції сталого розвитку

Якщо розглядати рівні відповідальності за реалізацію концепції сталого розвитку на моделі держави, то на найвищому рівні ієрархії передбачається розробка політики та виконання міжнародних зобов'язань. До прикладу, уряди формують національні стратегії сталого розвитку, розробляють і впроваджують законодавчу базу, регуляції тощо. А також контролюють міжнародні зобов'язання щодо виконання цілей сталого розвитку, визначених ООН, у рамках Порядку денного на період до 2030 року.

Діяльність представників бізнесових структур різного рівня в умовах сталого розвитку передбачає впровадження відповідального управління та інновацій. Відповідальне управління полягає в інтеграції принципів сталого розвитку у виробничі процеси, управління ресурсами та корпоративну політику, а інноваційні підходи реалізуються через розробку екологічних технологій та зменшення впливу на довкілля ⁴.

Оскільки саме громади відіграють ключову роль у реалізації проєктів, пов'язаних із розвитком інфраструктури, охороною довкілля, освітою тощо, то для реалізації положень стратегії сталого розвитку також передбачається активне залучення громад на місцевому рівні.

Роль громадських та неурядових організацій при реалізації цілей сталого розвитку полягає у просвітницькій місії та адвокації. Саме

⁴ Керівництво «Посилення ролі бізнесу в досягненні ЦСП в Україні». URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/kerivnytstvo-posylennya-rol-i-biznesu-v-dosyahnenni-tssr-v-ukrayini>

громадські організації сприяють обізнаності суспільства, проводять моніторинг політичних процесів та захищають права. Також громадські та неурядові організації контролюють реалізацію проєктів щодо виконання ініціатив у галузях екології, соціальної рівності та економічного розвитку.

Життя кожної окремої людини в умовах сталого розвитку полягає у формуванні нової філософії існування, яка ґрунтується на усвідомленні взаємозв'язку між особистою діяльністю та глобальними соціально-екологічними процесами. Ключовими складовими такої філософії є особиста відповідальність та активна громадська участь. Це передбачає формування нової моделі екологічно відповідальної поведінки, що охоплює раціональне використання природних ресурсів, свідоме споживання, мінімізацію відходів, сортування сміття та зниження негативного впливу на довкілля. Водночас громадська участь проявляється через залучення громадян до місцевих екологічних і соціальних ініціатив, підтримку сталих проєктів та участь у прийнятті рішень на локальному рівні, що сприяє підвищенню якості життя суспільства в цілому та забезпеченню довгострокового сталого розвитку.

Зрозуміло, що ключ до успішної реалізації цілей сталого розвитку полягає у партнерстві між усіма рівнями відповідальності. Але, аналізуючи екологічний вектор стратегії, варто звернути особливу увагу на бізнесові структури виробничої та обслуговуючої сфери, оскільки масштаби їх діяльності та характер бізнес-процесів безпосередньо пов'язуються з загостренням проблеми впливу на довкілля. Окремої уваги в рамках даного дослідження заслуговує логістична діяльність, яка є базовою для економічної системи держави. Негативні впливи, які зумовлюються логістичними процесами, пов'язані з викидами шкідливих речовин та парникових газів через інтенсивне використання транспортних засобів; забруднення повітря, шумове та вібраційне навантаження на міські території; надмірне споживання енергетичних ресурсів; утворення великої кількості відходів, зокрема пакувальних матеріалів, тощо. Крім того, низький рівень оптимізації логістичних процесів може призводити до додаткового навантаження на інфраструктуру, виникнення заторових явищ на дорогах та підвищення ризиків для безпеки.

Сукупність цих негативних впливів актуалізує необхідність переходу підприємств логістичного сектору до сталих моделей діяльності, спрямованих на зменшення шкоди довкіллю, підвищення ефективності операцій та відповідальне використання ресурсів. Такий перехід стає не лише екологічною, а й економічною та соціальною вимогою сучасного ринку.

Останнім часом простежується суттєве зростання наукового інтересу з боку зарубіжних та вітчизняних дослідників як до загальних питань

імplementації цілей сталого розвитку^{5, 6, 7}, так і до вивчення специфічних напрямів їх реалізації у сфері логістики.

Зокрема, у наукових працях акцентується увага на інтеграції принципів сталого розвитку в логістичні стратегії підприємств, оптимізації логістичних процесів з урахуванням екологічних обмежень, підвищенні соціальної відповідальності логістичних провайдерів та впровадженні інноваційних «зелених» логістичних рішень.

До прикладу, в роботах^{8, 9, 10, 11} досліджується проблематика забезпечення сталого управління ланцюгами постачань та діяльністю підприємств логістичних провайдерів з урахуванням екологічних, економічних і соціальних аспектів їх функціонування.

В роботі¹² розглядаються сучасні підходи до впровадження сталих практик у системі управління процесами логістичного обслуговування суб'єктів господарської діяльності. Зокрема, увага зосереджується на інтеграції принципів сталого розвитку в логістичні стратегії підприємств з урахуванням екологічних критеріїв, а також на застосуванні інструментів оцінювання ефективності логістичних процесів. Окрему увагу приділено питанням підвищення якості логістичного сервісу, зниження негативного впливу логістичної діяльності на довкілля та формуванню передумов для забезпечення довгострокової конкурентоспроможності суб'єктів господарювання.

⁵ Боголюбов В.М., Клименко М.О., Мельник Л.Г., Ракоїд О.О. Стратегія сталого розвитку: Підручник. За редакцією професора В.М.Боголюбова. – К.: ВЦ НУБПУ, 2018. – 446 с.

⁶ Стратегія сталого розвитку: Європейські горизонти [Електронний ресурс]: Підручник / І.Л. Якименко, Л.П. Петрашко, Т.М. Димань, О.М. Салавор, Є.Б. Шаповалов, М.А. Галабурда, О.В. Нічик, О.В. Мартинюк. – К.: НУХТ, 2022. – 337 с. URL: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/VNAU/7990/1/stratehiia_staloho.pdf

⁷ Коломієць Л.В. Стратегія сталого розвитку: Навч. Посібник. – Кропивницький: 2019. – 126 с.

⁸ Галак Ірина, Косинський Дмитро. Інтеграція принципів сталого розвитку в управління ланцюгом постачання у логістичних провайдерів. І Міжнародна науково-практична конференція “Modern Perspectives on Global Scientific Solutions”, 7-9 жовтня 2024, Берген, Норвегія, 2024, с.75-85

⁹ Галак І. І., Крюковська Л. І. Особливості управління реверсивними потоками у замкненому ланцюзі постачань. Вісник Національного транспортного університету. Серія Технічні науки. 2021. Вип. 48. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-073-082>

¹⁰ Галак І.І., Добровольська А.М., Добровольський О.С., Овчар Д.О. Підходи до впровадження сталих практик у діяльність логістичного провайдера. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Вип. 116. Частина 2. Київ. С. 278-297. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.2-278-297>

¹¹ Білоног О.Є., Галак І.І., Овчар Д.О. Вплив системи управління часовими слотами на робочий час водіїв у підприємствах логістичних провайдерів. Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку. Запоріжжя, 2025. – Випуск 1 (31), С. 50 – 66. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-1/31-05>

¹² Білоног О. Є., Янішевський С. В., Костюченко О. В., Фартучний В. І., Черненко І. О., Янішевський Є. С. Впровадження підходів сталого розвитку під час управління процесами транспортного обслуговування суб'єктів господарської діяльності. Дороги і мости. Київ, 2025. Вип. 31. С. 322–335. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.331>

Також заслуговують на увагу роботи, які присвячені дослідженню сітілогістики, як однієї із сучасних логістичних концепцій, яка власне і сформувалася під впливом сталого розвитку. Зокрема, в роботі¹³ розглядаються ключові аспекти забезпечення ефективності сітілогістичної системи, як такої, яка складається із підсистем мобільності, безпечності та екологічності міського середовища. Окремий напрямок наукових досліджень в сфері забезпечення сталості транспортних систем простежується в роботах, які фокусуються на плануванні систем сталої мобільності у великих містах^{14, 15}.

В контексті забезпечення соціальної складової сітілогістики, яку можна розглядати як задачу забезпечення безпечної мобільності, зокрема і щодо вразливих учасників дорожнього руху, заслуговують на увагу роботи^{16, 17}. До прикладу, в роботі¹⁸ проведено експертне оцінювання інженерних та планувальних рішень щодо підвищення рівня безпеки вищезазначеної категорії учасників дорожнього руху та забезпечення інклюзивності в сітілогістичних системах міст України.

Аналіз вищезазначених наукових праць показав, що більшість із них перебувають переважно на стадії адаптації цілей сталого розвитку до українського контексту або на етапі формування концептуальних засад впровадження підходів сталого розвитку в даній сфері. Водночас варто зазначити, що сучасні соціально-економічні та безпекові реалії в Україні зумовлюють нагальну потребу якнайшвидшого переходу від теоретичного осмислення зазначеної проблематики до етапу її практичної реалізації.

¹³ 13. Білоног О.Є., Галак І.І., Добровольська А.М., Янішевський С.В. Системні аспекти забезпечення ефективності сітілогістики. Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку. Запоріжжя, 2025. – Випуск 2 (32), С. 221 – 235. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-2/32-18>

¹⁴ Білоног О.Є., Янішевський С.В., Галак І.І., Климчук Ю.О. Управління міською мобільністю: кращі практики впровадження проєктів розвитку систем сталої мобільності в містах України. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал. Київ, 2025. – Вип. 117.1. С. 276 – 292. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.1-276-292>

¹⁵ Білоног О.Є., Янішевський С.В., Климчук Ю.О., Черненко І.О. Міська мобільність в Україні: аналіз основних викликів. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2024. – Вип. 1 (58). С. 11-22. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2024-1-58-011-022>. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/58/011.pdf>

¹⁶ Янішевський С.В., Білоног О.Є., Корчевська А.А. Обмеження швидкості транспортних засобів в містах для підвищення безпеки вразливих учасників дорожнього руху. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий збірник. – К. : НТУ, 2023. – Вип. 1 (55). С. 335-347. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-335-347>. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/55/335.pdf>

¹⁷ Polishchuk V., Yanishevskyi S., Bilonoh O., Nahrebelna L., Trushevsky V., Korchevska A., Semchenko O., Vyhovska I. (2023). Expert assessment of engineering and planning solutions to improve the safety of vulnerable road users in Ukraine. // Expert assessments in decision making: risks and safety: collective monograph. Pp. 154-206. Tallinn: Scientific Route OÜ, 222. Scopus DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9916-9850-2-1>

¹⁸ Там само.

2. Роль логістики у досягненні цілей сталого розвитку

Серед 17 глобальних цілей сталого розвитку (ЦСР) Організації Об'єднаних Націй, які, як зазначалося вище, спрямовані на забезпечення балансу між економічним зростанням, соціальним прогресом та збереженням навколишнього природного середовища, сфера логістики відіграє ключову роль у досягненні щонайменше 10 із 17 визначених цілей. Хоча найбільш тісний зв'язок логістичної діяльності простежується із такими ЦСР, рисунок 3:

- ЦСР 7 – доступна та чиста енергія;
- ЦСР 9 – промисловість, інновації та інфраструктура;
- ЦСР 11 – сталі міста та громади;
- ЦСР 12 – відповідальне споживання і виробництво;
- ЦСР 13 – боротьба зі зміною клімату;
- ЦСР 17 – партнерство заради сталого розвитку.

Сфера логістики відіграє важливу роль у досягненні більшості з цих цілей, оскільки вона впливає на ресурсоефективність, транспорт, обслуговування торговельних, виробничих підприємств та кінцевих споживачів, інфраструктуру та клімат тощо. Слід зазначити, що досягнення ЦСР в логістиці відбувається на основі впровадження сталих практик. При цьому, сталі практики розглядаються як комплекс управлінських, технологічних, організаційних та соціально-екологічних рішень, які системно впроваджуються у діяльність логістичних провайдерів з метою мінімізації негативного впливу на довкілля, а також суспільство, раціонального використання ресурсів та забезпечення довгострокової економічної ефективності і стійкості розвитку.

Сталі практики в діяльності логістичних провайдерів можна розділити на такі категорії, як: екологічні сталі практики, технологічні та цифрові практики сталого розвитку, організаційно-економічні практики, соціальні сталі практики, інституційні та управлінські практики, рисунок 4.

Екологічні сталі практики, які спрямовані на зменшення впливу логістичних операцій на довкілля, включають оптимізацію транспортних маршрутів з метою скорочення викидів шкідливих речовин та парникових газів, використання енергоефективних та альтернативних видів транспорту, впровадження екологічно чистих видів палива, модернізацію складської інфраструктури з використанням енергозберігаючих технологій, а також зменшення обсягів відходів шляхом повторного використання та переробки пакувальних матеріалів.

Технологічні та цифрові практики сталого розвитку забезпечують підвищення ефективності логістичних процесів і зниження ресурсомісткості. До них належать застосування систем управління

транспортом і складом (TMS, WMS), використання цифрових платформ для моніторингу вантажопотоків у реальному часі, автоматизація процесів планування та контролю, а також впровадження аналітики даних для прогнозування попиту і зменшення надлишкових операцій.



Рис. 3. Роль логістики у досягненні ЦСР



Рис. 4. Категорії сталих практик в логістиці

Організаційно-економічні практики передбачають раціоналізацію логістичних ланцюгів та оптимізацію витрат. До них відносять консолідацію вантажів, розвиток мультимодальних перевезень, впровадження принципів «зеленої логістики», інтеграцію сталих критеріїв у вибір партнерів і постачальників, а також оцінювання екологічних і соціальних ризиків у ланцюгах постачання.

Соціальні сталі практики, які спрямовані на забезпечення безпечних умов праці, підвищення рівня соціальної відповідальності та добробуту персоналу, охоплюють дотримання норм охорони праці, зниження рівня виробничого травматизму, навчання працівників принципам сталого розвитку, підтримку етичних стандартів у взаємовідносинах з клієнтами та партнерами, а також участь логістичних компаній у соціальних і гуманітарних ініціативах.

Інституційні та управлінські практики забезпечують системність впровадження сталого розвитку. До них належать розроблення корпоративних стратегій сталого розвитку, інтеграція екологічних і соціальних показників у систему оцінювання ефективності діяльності, дотримання міжнародних стандартів і сертифікацій (ISO, ESG), а також публічна звітність щодо впливу логістичної діяльності на довкілля та суспільство.

Повертаючись до питання реалізації ЦСР через сталі практики, варто зазначити, що їх можна структурувати за окремими функціональними сферами логістики. Хоча більш доцільно представляти їх приклади в межах окремих логістичних концепцій, які власне і сформувалися під впливом стратегії сталого розвитку. Це, зокрема, зелена логістика, реверсивна логістика та сітілогістика. Систематизація прикладів сталих практик, спрямованих на досягнення ЦСР, які реалізуються в логістиці, наведена в таблиці 1.

Сучасний розвиток логістики відбувається під впливом глобальних екологічних, соціальних і економічних викликів. Аналізуючи концептуальні засади сталого розвитку (див. рис. 1), можна простежити векторну орієнтацію на певні складові сталого розвитку концепцій зеленої, реверсивної та сітілогістики, які за своєю суттю спрямовані на досягнення балансу між ефективністю бізнесу, екологічною безпекою та комфортом суспільства, таблиця 2. Таким чином, можна стверджувати, що суто екологічне спрямування має концепція зеленої логістики. Економічне та екологічне спрямування має концепція реверсивної логістики. А концепція сітілогістики орієнтована на досягнення соціальних на екологічних ЦСР. При цьому, всі три складові сталого розвитку є взаємозалежними та взаємопідсилювальними. Тобто, жодна з них не може розвиватися ізольовано без порушення гармонії розвитку суспільства. Цей взаємозв'язок ще часто зображають у вигляді «трикутника сталого розвитку».

Економічна складова сталого розвитку спрямована на ефективне використання ресурсів, забезпечення стабільного економічного зростання та формування конкурентоспроможної економіки, яка не завдає шкоди довкіллю. Основними цілями в рамках економічної складової є:

підвищення продуктивності та інноваційності економіки; створення «зеленої» економіки; формування ресурсоефективного виробництва; забезпечення гідної праці та економічної безпеки населення тощо.

Таблиця 1

**Сталі практики, спрямовані на досягнення ЦСР,
які реалізуються в логістиці**

| Концепція логістики | Сталі практики, спрямовані на реалізацію ЦСР | Очікувані ефекти |
|----------------------|---|--|
| Зелена логістика | <p>Використання енерго-ефективних та альтернативних видів транспорту. Впровадження екологічно чистих видів палива. Модернізація складської інфраструктури з використанням енергозберігаючих технологій. Зменшення обсягів відходів шляхом повторного використання та переробки пакувальних матеріалів</p> | <p>Зменшення викидів забруднюючих речовин та парникових газів. Зниження енергоспоживання та споживання природних ресурсів. Скорочення обсягів відходів завдяки оптимізації упаковки та повторному використанню матеріалів. Мінімізація негативного впливу транспортних і складських операцій на довкілля. Зменшення негативного впливу на екосистеми. Підвищення екологічної безпеки територій</p> |
| Реверсивна логістика | <p>Підтримка циркулярної економіки. Створення замкнутих ланцюгів постачання. Переробка та повторне використання матеріалів. Пріоритезація використання обігової тари</p> | <p>Зменшення використання первинних природних ресурсів. Скорочення обсягів відходів, що підлягають захороненню. Зниження викидів парникових газів за рахунок повторного використання та переробки матеріалів. Мінімізація забруднення ґрунтів, води та повітря. Продовження життєвого циклу продукції</p> |
| Сіті-логістика | <p>Використання екологічного транспорту. Створення міських логістичних центрів. Консолідація доставок на останній милі. Розвиток сталих видів мобільності. Розвиток інклюзії</p> | <p>Зменшення викидів забруднюючих речовин і парникових газів. Покращення якості повітря в місті. Підвищення енергоефективності доставки. Зменшення інтенсивності руху у центральних районах. Оптимізація маршрутів доставки. Зниження шумового і вібраційного навантаження у міських і приміських зонах. Зменшення заторових явищ. Створення міських безбар'єрних просторів</p> |

**Орієнтація сучасних логістичних концепцій
на складову сталого розвитку**

| Концепція логістики | Основна мета | Орієнтація на складову сталого розвитку |
|----------------------|--|---|
| Зелена логістика | Мінімізація негативного впливу на довкілля в усьому логістичному ланцюзі | Екологічна складова |
| Реверсивна логістика | Підтримка циркулярної економіки. Організація реверсивних (зворотних) потоків (повернення, утилізація, переробка, використання обігової тари) | Економічна та екологічна складові |
| Сітілогістика | Оптимізація логістичних процесів у містах із урахуванням екологічних та соціальних аспектів | Соціальна та екологічна складові |

Для оцінювання результативності ініціатив в даному напрямку найчастіше використовують такі показники, як ВВП на душу населення; рівень зайнятості; енергоефективність виробництва; інвестиції в екотехнології.

В якості прикладів економічних сталих практик в логістиці можна розглядати розвиток циркулярної економіки в ланцюгах постачання, оптимізацію маршрутів для зменшення транспортних витрат; використання енергоощадних складів тощо.

Екологічна складова сталого розвитку забезпечує збереження природного середовища і раціональне використання природних ресурсів задля задоволення потреб нинішнього та майбутніх поколінь. При цьому, цільова направленість полягає у зниженні викидів шкідливих речовин та парникових газів; охороні природних ресурсів; розвитку відновлюваної енергетики; управлінні відходами та повторному використанні ресурсів; формуванні екологічної свідомості населення. Реалізація даних цілей відбувається на основі наступних ключових принципів:

- «забруднювач платить»;
- пріоритет превентивних заходів;
- екологічна відповідальність бізнесу;
- впровадження екологічного менеджменту (ISO 14001).

В якості прикладів екологічних сталих практик в логістиці можна розглядати перехід на екологічний транспорт; екологічне пакування та повторне використання тари; створення «зелених складів» з використанням відновлюваної енергії тощо.

Соціальна складова сталого розвитку спрямована на підвищення якості життя людини, забезпечення соціальної справедливості та гармонійного

розвитку суспільства. Серед основних цілей можна виділити: забезпечення гідних умов праці та зайнятості; подолання бідності, нерівності, дискримінації; розвиток освіти, охорони здоров'я, безпеки; формування соціально відповідального бізнесу; участь громадськості у прийнятті рішень.

Ключовими показниками для оцінювання успішності ініціатив у даній сфері є рівень добробуту населення, який відображає економічну стабільність, рівень доходів та якість життя громадян; доступність базових соціальних послуг (освіти та охорони здоров'я), що характеризує можливості населення щодо отримання якісних та своєчасних освітніх і медичних послуг; рівень соціальної згуртованості, який свідчить про ступінь інтегрованості різних соціальних груп, рівень довіри в суспільстві та готовність до спільних дій; а також ступінь розвитку корпоративної соціальної відповідальності, що визначається рівнем залученості підприємств до реалізації соціальних, екологічних і етичних ініціатив.

В якості прикладів соціальних сталих практик в логістиці можна розглядати дотримання стандартів безпеки праці логістичного персоналу (водіїв, диспетчерів, експедиторів, працівників складів); забезпечення рівних можливостей при працевлаштуванні; створення комфортної сітілогістики, безпечної для населення; програми соціального партнерства підприємств з громадами.

З огляду на вищевикладене, взаємозв'язок між складовими сталого розвитку можна представити у наступному вигляді, рисунок 5.



Рис. 5. Взаємозв'язок між екологічною, економічною та соціальною складовими сталого розвитку

Отже, сталий розвиток – це система рівноваги між економічною ефективністю, екологічною безпекою та соціальною справедливістю. Економічна складова забезпечує ресурси, екологічна – їх збереження, соціальна – спрямування розвитку на благо людини. Для досягнення сталості необхідна інтеграція політики держави, бізнесу та суспільства, особливо у сферах з високим ресурсним споживанням – таких, як логістика.

3. Підходи до відстеження успішності досягнення цілей сталого розвитку

Окремих важливим завданням залишається необхідність відстеження успішності досягнення ЦСР в логістичній діяльності. Припустимо, що на рівні окремого підприємства, яке безпосередньо є логістичним провайдером, або виробничого чи торговельного підприємства, яке в своїй організаційній структурі має власний логістичний підрозділ і виконує логістичне обслуговування власними силами, ступінь досягнення ЦСР можна описати через інтегральний показник:

$$E_{SD} = w_{eco} E_{eco} + w_{env} E_{env} + w_{soc} E_{soc} , \quad (1)$$

де: E_{SD} – ефективність сталого розвитку (сталих практик) в логістичній діяльності;

E_{eco} – економічна складова;

E_{env} – екологічна складова;

E_{soc} – соціальна складова;

$w_{eco}, w_{env}, w_{soc}$ – коефіцієнти вагомості економічної, екологічної та соціальної складової.

Для визначення коефіцієнтів вагомості економічної, екологічної та соціальної складових можуть застосовуватися експертні, нормативні, ієрархічні та статистичні підходи, а також їх комбінації, що дозволяє врахувати як галузеву специфіку логістичної діяльності, так і наявну інформаційну базу дослідження. В таблиці 3 наведена порівняльна характеристика основних підходів, які найчастіше використовуються в наукових дослідженнях для визначення коефіцієнтів вагомості за даними складовими.

Економічна ефективність логістики може бути представлена у вигляді системи нормованих показників:

$$E_{eco} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{P_i}{P_i^{max}} \quad (2)$$

де: P_i – показники ефективності логістичної діяльності (рівень логістичних витрат, оборотність товарних запасів, продуктивність транспорту, рівень своєчасності постачань, прибутковість логістичних операцій тощо);

P_i^{max} – максимально допустиме (граничне, еталонне) значення i -го показника, яке використовується в моделях оцінювання ефективності, зокрема сталого розвитку логістики;

α_i – коефіцієнти вагомості економічних показників;

i – індекс економічного показника, $i = 1, 2, \dots, n$;

n – загальна кількість економічних індикаторів, що використовуються для оцінювання.

Таблиця 3

Характеристика основних підходів для визначення коефіцієнтів вагомості

| Підхід | Коротка характеристика | Переваги | Недоліки |
|--|---|---|---|
| Експертний підхід | Передбачає залучення групи експертів (науковців, представників логістичних компаній, органів влади), які шляхом анкетування або ранжування визначають відносну важливість кожної складової сталого розвитку | – враховує галузеву специфіку та практичний досвід; – гнучкий до умов конкретної країни чи регіону | – суб’єктивність оцінок; – потреба в достатній кількості кваліфікованих експертів |
| Метод аналізу ієрархій (АНР, метод Сааті) | Базується на попарному порівнянні складових сталого розвитку з подальшим розрахунком вагових коефіцієнтів на основі матриці переваг та перевіркою узгодженості суджень експертів | – формалізований і широко визнаний метод; – дозволяє перевірити логічну узгодженість оцінок | – відносна складність розрахунків; – залежність від експертних суджень |
| Рівноважний (нормативний) підхід | Передбачає прийняття рівних ваг для всіх складових | – простота та прозорість; – доцільний за відсутності обґрунтованих переваг | – не враховує галузеву або регіональну специфіку; – може занижувати роль окремих складових |
| Статистичні методи (факторний аналіз, PCA) | Вагові коефіцієнти визначаються на основі статистичної обробки фактичних даних, зокрема через внесок кожної складової у загальну дисперсію показника | – об’єктивність; – базування на реальних даних | – потреба у великому масиві достовірних даних; – складність інтерпретації результатів |

| | | | |
|---------------------|---|---|---|
| Комбінований підхід | Поєднує експертні оцінки зі статистичними методами або нормативними обмеженнями (наприклад, експертне коригування результатів факторного аналізу) | – підвищена надійність результатів; – баланс між об'єктивністю та практичною доцільністю | - |
|---------------------|---|---|---|

При цьому, P_i^{max} являє собою верхню межу (цільового або нормативного значення) i -го індикатора, досягнення або перевищення якої вважається оптимальним з позицій сталого розвитку. Даний показник, який застосовується для нормалізації та масштабування різнорідних економічних, екологічних і соціальних параметрів логістичної діяльності, визначається на основі нормативно-правових актів, галузевих стандартів (ISO 14001, ISO 45001, ESG), стратегічних цілей підприємства, найкращих практик (бенчмаркінгу).

Екологічна ефективність логістичної діяльності відображає мінімізацію негативного впливу на довкілля:

$$E_{env} = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot \left(1 - \frac{E_j}{E_j^{lim}} \right) \quad (3)$$

де: E_j – показники фактичного екологічного навантаження (викиди шкідливих речовин та парникових газів, шум, вібрація, відходи);

E_j^{lim} – гранично допустимі значення показників фактичного екологічного навантаження;

β_j – коефіцієнти вагомості екологічних показників;

j – індекс екологічного показника, $j = 1, 2, \dots, m$;

m – загальна кількість екологічних індикаторів, що використовуються для оцінювання.

Соціальна ефективність логістичної діяльності характеризує умови праці та вплив на суспільство:

$$E_{soc} = \sum_{k=1}^l \gamma_k \cdot S_k \quad (4)$$

де: S_k – нормалізовані значення соціальних показників ефективності логістичної діяльності;

γ_k – коефіцієнти вагомості соціальних показників;

k – індекс соціального показника, $k = 1, 2, \dots, l$;

l – загальна кількість соціальних індикаторів, що використовуються для оцінювання.

Нормалізоване значення соціальних показників ефективності логістичної діяльності можна визначити за наступним виразом:

$$S_k = \frac{S_k^{fact}}{S_k^{norm}} \quad (5)$$

де: S_k^{fact} – фактичне значення k -го соціального показника, отримане на основі статистичних даних підприємства або результатів соціального моніторингу (наприклад, фактичний рівень травматизму, середня заробітна плата, частка персоналу, що пройшла навчання тощо);

S_k^{norm} – нормативне (еталонне або цільове) значення k -го соціального показника, встановлене відповідно до галузевих стандартів, законодавчих вимог, міжнародних рекомендацій (ILO, ISO 26000) або стратегічних цілей підприємства.

При інтерпретації результатів інтегрального показника E_{SD} щодо досягнення ЦСР в логістичній діяльності будемо виходити з наступних положень:

– якщо $E_{SD} > 1$ – високий рівень ефективності впровадження сталого розвитку;

– якщо $E_{SD} \approx 1$ – прийнятний рівень ефективності впровадження сталого розвитку;

– якщо $E_{SD} < 1$ – необхідність коригування логістичної стратегії.

В якості ще одного підходу до оцінювання успішності досягнення ЦСР в діяльності логістичного провайдера (логістичній діяльності) можна розглядати розроблення системи ключових показників оцінювання ефективності (KPI) за кожною із складових сталого розвитку (екологічною, економічною та соціальною). При цьому, саме KPI дають можливість проведення кількісної та якісної оцінки результативності діяльності організації, підрозділу або окремого процесу щодо досягнення поставлених стратегічних і операційних цілей. Така система дасть змогу провести оцінювання локально за кожним індикатором та, на основі їх значень, – комплексно, за кожною складовою сталого розвитку.

Відмінності між кількісними та якісними KPI полягають у тому, що під кількісними KPI мають на увазі показники, які мають чітке числове вираження, а під якісними – ті, які відображають рівень, стан або якість процесів. При цьому, кількісні KPI розраховуються за формулами та дозволяють однозначно виміряти результат, а якісні – часто оцінюються за шкалами, експертними методами, анкетуванням або аудитами.

У контексті сталого розвитку логістичної діяльності обидва типи КРІ є взаємодоповнюючими: кількісні фіксують результат, а якісні – ефективність управління процесами. Отже, кількісні КРІ дозволяють оцінити фактичні результати реалізації цілей сталого розвитку в логістичній діяльності, тоді як якісні КРІ відображають рівень інтеграції принципів сталості в систему управління логістичними процесами. Їх комплексне використання забезпечує всебічну та об’єктивну оцінку ефективності сталого логістичного розвитку.

Група показників за екологічною складовою сталого розвитку (Environmental KPI) спрямована на оцінювання зменшення негативного впливу діяльності логістичного провайдера (логістичної діяльності) на довкілля та оцінювання рівня екологічної відповідальності логістичного провайдера. При цьому, серед основних показників даної групи варто виділити наступні:

- рівень викидів CO₂ на одиницю транспортної роботи;
- частка екологічно чистого транспорту в автопарку;
- питоме споживання пального;
- частка використання альтернативних джерел енергії;
- частка відходів, що підлягають переробці або повторному використанню;
- індекс екологічної відповідності.

В таблиці 4 представлено групу КРІ за екологічною складовою та наведено їх коротку характеристику.

Таблиця 4

Група КРІ за екологічною складовою сталого розвитку

| КРІ за екологічною складовою | Одиниці вимірювання | Характеристика |
|---|---------------------|---|
| 1. Рівень викидів CO ₂ на одиницю транспортної роботи | кг/т-км | Показник характеризує екологічну ефективність транспортних операцій |
| 2. Частка екологічно чистого транспорту в автопарку | % | Показник включає електротранспорт, гібридні авто, транспорт екологічного стандарту Euro-6 |
| 3. Питоме споживання пального | л/100 км; л/т-км | Показник відображає ефективність маршрутного планування та технічного стану транспорту |
| 4. Частка використання альтернативних джерел енергії | % | Показник враховує застосування відновлюваної енергії на складах і терміналах |
| 5. Частка відходів, що підлягають переробці або повторному використанню | % | Показник характеризує ефективність управління пакуванням і складськими відходами |
| 6. Індекс екологічної відповідності | - | Показник характеризує відповідність стандартам ISO 14001, EMAS, ESG-звітності |

Група показників за економічною складовою сталого розвитку (Economic KPI) відображає фінансову доцільність та економічну результативність впровадження сталих практик в діяльності логістичного провайдера (логістичній діяльності) в контексті досягнення ЦСР. В якості основних показників за економічною складовою сталого розвитку можна розглядати наступні:

- зміна операційних витрат на логістику;
- економія витрат на паливо;
- рентабельність інвестицій у сталу логістику (ROI);
- рівень завантаження транспортних засобів (використання вантажопідйомності);
- собівартість логістичних послуг;
- частка доходів від клієнтів, орієнтованих на сталий розвиток.

В таблиці 5 представлено групу KPI за економічною складовою сталого розвитку та наведено їх коротку характеристику.

Таблиця 5

Група KPI за економічною складовою сталого розвитку

| KPI за екологічною складовою | Одиниці вимірювання | Характеристика |
|---|----------------------------|--|
| 1. Зміна операційних витрат на логістику | % | Показник використовується для порівняння витрат до і після впровадження сталих рішень |
| 2. Економія витрат на паливо | % | Показник характеризує результат оптимізації маршрутів та оновлення автопарку |
| 3. Рентабельність інвестицій у сталу логістику (ROI) | % | Показник використовується для оцінювання ефективності капіталовкладень у «зелені» технології |
| 4. Рівень завантаження транспортних засобів (використання вантажопідйомності) | % | Показник характеризує ефективність використання логістичних ресурсів |
| 5. Собівартість логістичних послуг | грн/т; грн/замовлення | Інтегральний показник економічної ефективності |
| 6. Частка доходів від клієнтів, орієнтованих на сталий розвиток | % | Показник відображає конкурентні переваги провайдера |

Група показників за соціальною складовою (Social KPI) оцінює вплив діяльності логістичного провайдера (логістичної діяльності) на персонал, клієнтів та суспільство. Серед основних показників даної групи варто виділити наступні:

- рівень виробничого травматизму;
- індекс плинності кадрів;

- частка персоналу, що пройшов навчання зі сталого розвитку;
- індекс задоволеності персоналу;
- рівень задоволеності клієнтів логістичними послугами;
- участь у соціальних та екологічних ініціативах.

В таблиці 6 представлено групу КРІ за соціальною складовою сталого розвитку та наведено їх коротку характеристику.

Таблиця 6

Група КРІ за соціальною складовою сталого розвитку

| КРІ за екологічною складовою | Одиниці вимірювання | Характеристика |
|--|----------------------------|---|
| 1. Рівень виробничого травматизму | випадків/100 працівників | Показник характеризує рівень безпеки праці |
| 2. Індекс плинності кадрів | % | Показник відображає соціальну стабільність та якість умов праці |
| 3. Частка персоналу, що пройшов навчання зі сталого розвитку | % | Показник характеризує рівень залученості працівників у впровадження сталих практик |
| 4. Індекс задоволеності персоналу | бали | Показник формується на основі внутрішніх опитувань |
| 5. Рівень задоволеності клієнтів логістичними послугами | %; NPS | Показник інтегрує соціальний аспект якості сервісу |
| 6. Участь у соціальних та екологічних ініціативах | кількість програм/проектів | Показник відображає корпоративну соціальну відповідальність логістичного провайдера |

Для комплексного оцінювання ефективності впровадження ЦСР в діяльність логістичних провайдерів доцільно сформулювати інтегральний індекс сталості логістичного провайдера, який розраховується як зважена сума КРІ за трьома складовими. Також передбачається використання бенчмаркінгу із середньогалузевими показниками. При цьому, в контексті реалізації основної мети, має постійно здійснюватися динамічний аналіз змін КРІ у часі.

Як можна бачити з таблиць 4-6, представлені там КРІ чітко відповідають вимогам, які до них висуваються. Тобто, вони мають ряд наступних ознак:

- релевантність – КРІ безпосередньо пов'язані зі стратегічними цілями;
- вимірюваність – КРІ мають чітку кількісну або бальну форму;
- досяжність – КРІ є реалістичними для виконання;
- порівнюваність – КРІ дозволяють проведення аналізу у часі та між об'єктами;
- орієнтація на результат – КРІ мають набагато ширшу орієнтацію ніж лише на процес.

У контексті необхідності системного відстеження результативності досягнення ЦСР на рівні держави та окремих галузей економіки, для

оцінювання прогресу їх реалізації в Україні було розроблено систему з 183 національних індикаторів. У межах кожної ЦСР визначено відповідні завдання, загальна кількість яких становить 86, і для кожного з них сформовано комплекс релевантних індикаторів, що забезпечують можливість комплексного та порівняльного оцінювання досягнутого прогресу. Такий підхід дозволяє здійснювати моніторинг реалізації ЦСР, виявляти проблемні напрями та обґрунтовувати управлінські рішення у сфері сталого розвитку на національному та галузевому рівнях.

Державна служба статистики України спільно з VoxUkraine за підтримки Програми розвитку ООН в Україні на базі Добровільного національного огляду щодо ЦСР здійснює постійний моніторинг та оцінку прогресу досягнення ЦСР за методологією Економічної та соціальної комісії ООН для Азії та Тихого океану (UNESCAP)¹⁹. Відповідно до кожної цілі оприлюднюються результати оцінювання за визначеними індикаторами. Відкриту платформу ЦСР в Україні розроблено Державною службою статистики України у партнерстві з ПРООН в Україні в рамках програми ООН «Сприяння стратегічному плануванню та фінансуванню стійкого розвитку України як на національному, так і на регіональному рівні», що фінансується Спільним Фондом ЦСР.

В таблиці 7 представлено кількісну характеристику індикаторів відстеження успішності досягнення ЦСР в Україні, під якою мається на увазі ступінь фактичного виконання визначених завдань і цільових орієнтирів ЦСР, що оцінюється на основі системи кількісних і якісних індикаторів та відображає прогрес країни, галузі або організації у напрямі сталого розвитку.

Таблиця 7

Сукупність індикаторів відстеження успішності досягнення ЦСР в Україні

| ЦСР | Завдання | Індикатори |
|--|---|---|
| ЦСР 1 – подолання бідності | 3 завдання (1.1; 1.2; 1.3) | 5 індикаторів (1.1.1; 1.1.2; 1.2.1; 1.3.1; 1.3.2) |
| ЦСР 2 – подолання голоду, розвиток сільського господарства | 4 завдання (2.1; 2.2; 2.3; 2.4) | 11 індикаторів (2.1.1; 2.1.2; 2.1.3; 2.1.4; 2.1.5; 2.2.1; 2.2.2; 2.3.1; 2.3.2; 2.3.3; 2.4.1) |
| ЦСР 3 – міцне здоров'я і благополуччя | 9 завдань (3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5; 3.6; 3.7; 3.8; 3.9) | 16 індикаторів (3.1.1; 3.2.1; 3.3.1; 3.3.2; 3.4.1; 3.4.2; 3.4.3; 3.4.4; 3.5.1; 3.5.2; 3.6.1; 3.6.2; 3.7.1; 3.8.1; 3.8.2; 3.9.1) |

¹⁹ Відкрита платформа ЦСР в Україні. URL: <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/goals/>

Продовження таблиці 7

| | | |
|--|--|--|
| ЦСР 4 – якісна освіта | 7 завдань (4.1; 4.2; 4.3; 4.4; 4.5; 4.6; 4.7) | 14 індикаторів (4.1.1; 4.1.2; 4.2.1; 4.3.1; 4.4.1; 4.4.2; 4.4.3; 4.4.4; 4.5.1; 4.5.2; 4.6.1; 4.7.1; 4.7.2; 4.7.3) |
| ЦСР 5 – гендерна рівність | 6 завдань (5.1; 5.2; 5.2; 5.4; 5.5; 5.6) | 20 індикаторів (5.1.1; 5.2.1; 5.2.2; 5.2.3; 5.2.4; 5.2.5; 5.2.6; 5.2.7; 5.2.8; 5.2.9; 5.2.10; 5.2.11; 5.2.12; 5.3.1; 5.4.1; 5.4.2; 5.4.3; 5.5.1; 5.6.1; 5.6.2) |
| ЦСР 6 – чиста вода та належні санітарні умови | 5 завдань (6.1; 6.2; 6.3; 6.4; 6.5) | 12 індикаторів (6.1.1; 6.1.2; 6.1.3; 6.1.4; 6.1.5; 6.2.1; 6.2.2; 6.3.1; 6.3.2; 6.4.1; 6.4.2; 6.5.1) |
| ЦСР 7 – доступна та чиста енергія | 4 завдання (7.1; 7.2; 7.3; 7.4) | 7 індикаторів (7.1.1; 7.1.2; 7.1.3; 7.2.1; 7.2.2; 7.3.1; 7.4.1) |
| ЦСР 8 – Гідна праця та економічне зростання | 6 завдань (8.1; 8.2; 8.3; 8.4; 8.5; 8.6) | 14 індикаторів (8.1.1; 8.1.2; 8.1.3; 8.1.4; 8.2.1; 8.2.2; 8.3.1; 8.4.1; 8.5.1; 8.5.2; 8.5.3; 8.6.1; 8.6.2; 8.6.3) |
| ЦСР 9 – промисловість, інновації та інфраструктура | 7 завдань (9.1; 9.2; 9.3; 9.4; 9.5; 9.6; 9.7) | 14 індикаторів (9.1.1; 9.1.2; 9.1.3; 9.1.4; 9.2.1; 9.3.1; 9.3.2; 9.4.1; 9.4.2; 9.4.3; 9.5.1; 9.5.2; 9.6.1; 9.7.1) |
| ЦСР 10 – скорочення нерівності | 5 завдань (10.1; 10.2; 10.3; 10.4; 10.5) | 8 індикаторів (10.1.1; 10.2.2; 10.2.1; 10.3.1; 10.3.2; 10.3.3; 10.4.1; 10.5.3) |
| ЦСР 11 – сталий розвиток міст і громад | 6 завдань (11.1; 11.2; 11.3; 11.4; 11.5; 11.6) | 10 індикаторів (11.1.1; 11.1.2; 11.2.1; 11.3.1; 11.3.2; 11.3.3; 11.4.1; 11.5.1; 11.5.2; 11.6.1) |
| ЦСР 12 – відповідальне споживання та виробництво | 4 завдання (12.1; 12.2; 12.3; 12.4) | 6 індикаторів (12.1.1; 12.2.1; 12.2.2; 12.3.1; 12.4.1; 12.4.2) |
| ЦСР 13 – пом'якшення наслідків зміни клімату | 1 завдання (13.1) | 1 індикатор (1.3.1.1) |
| ЦСР 14 – збереження морських ресурсів | 3 завдання (14.1; 14.2; 14.3) | 4 індикатори (14.1.1; 14.2.1; 14.2.2; 14.3.1) |
| ЦСР 15 – захист та відновлення екосистем суші | 4 завдання (15.1; 15.2; 15.3; 15.4) | 13 індикаторів (15.1.1; 15.1.2; 15.1.3; 15.2.1; 15.2.2; 1.3.1; 15.3.2; 15.3.3; 15.3.4; 15.3.5; 15.3.6; 15.4.1; 15.4.2) |
| ЦСР 16 – мир, справедливість та сильні інститути | 9 завдань (16.1; 16.2; 16.3; 16.4; 16.5; 16.6; 16.7; 16.8; 16.9) | 24 індикатори (16.1.1; 16.1.2; 16.1.3; 16.2.1; 16.2.2; 16.2.3; 16.2.4; 16.2.5; 16.2.6; 16.2.7; 16.3.1; 16.3.2; 16.4.1; 15.5.1; 16.5.2; 16.5.3; 16.6.1; 16.7.1; 16.8.1; 16.8.2; 16.8.3; 16.8.4; 16.8.5; 16.9.1) |
| ЦСТ 17 – партнерство заради сталого розвитку | 3 завдання (17.1; 17.2; 17.3) | 4 індикатори (17.1.1; 17.1.2; 17.2.1; 17.3.1) |

До прикладу, розглянемо як на платформі ЦСР представлено дослідження щодо досягнення ЦСР 12 «Відповідальне споживання та виробництво», яка має безпосереднє відношення до сфери логістики. За даною ціллю визначено чотири завдання. Зокрема, завдання 12.1 «Знизити

ресурсоемність економіки», завдання 12.2 «Зменшити втрати продовольства у виробничо-збутових ланцюжках», завдання 12.3 «Забезпечити стале використання хімічних речовин на основі інноваційних технологій та виробництв» та завдання 12.4 «Зменшити обсяг утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв». Далі, в межах кожного завдання виділено певні показники, які і виступають в ролі індикаторів оцінки прогресу досягнення ЦСР. Так, за завданням 12.4 виділяються два показники «Обсяг утворених відходів усіх видів економічної діяльності на одиницю ВВП» – (індикатор 12-4-1) та «Частка спалених та утилізованих відходів у загальному обсязі утворених відходів» – (індикатор 12-4-2), діаграми за якими представлено на рисунках 6 та 7 відповідно. Додатково до кожної діаграми наводиться таблиця, яка інформує про національні метадані, на основі яких і було побудовані дану діаграму, таблиці 8 та 9 відповідно.

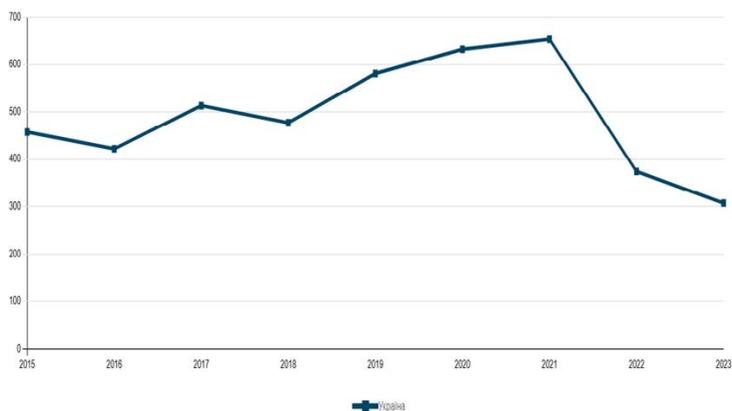


Рис. 6. Обсяг утворених відходів усіх видів економічної діяльності на одиницю ВВП, кг на 1000 дол. США за ПКС 2011 року

Отже, відстеження успішності досягнення ЦСР в Україні за допомогою системи національних індикаторів створює підґрунтя для формування інтегральної характеристики результативності реалізації завдань сталого розвитку. Така система дозволяє оцінювати рівень досягнення встановлених індикаторів, аналізувати динаміку їх змін, а також визначати ступінь збалансованості економічних, екологічних та соціальних компонентів розвитку, у тому числі в галузевому розрізі, зокрема у сфері логістики.

Метадані для фактичного індикатора 12.4.1, доступного зі статистики України, найближчої до відповідного глобального індикатора ЦСР

| | |
|-------------------------------|---|
| Ціль | 12 Відповідальне споживання та виробництво |
| Завдання | 12.4 Зменшити обсяг утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв |
| Показник | 12.4.1 Обсяг утворених відходів усіх видів економічної діяльності на одиницю ВВП, кг на 1000 дол. США за ПКС 2011 року |
| Організація | Державна служба статистики України (Держстат) |
| Одиниця виміру | кг на 1000 дол. США за ПКС 2011 року |
| Коментарі та обмеження | Обсяг утворених відходів усіх видів економічної діяльності на одиницю ВВП розраховано за ПКС у постійних цінах 2021 року. 2022-2023 роки – Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. Дані можуть бути уточнені. |

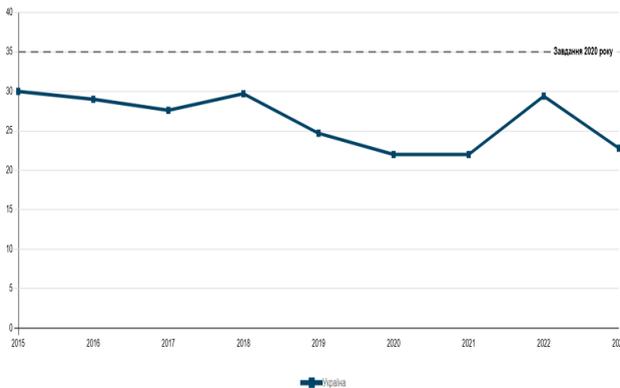


Рис. 7. Частка спалених та утилізованих відходів у загальному обсязі утворених відходів, %

З огляду на стратегічні пріоритети сучасного розвитку, серед яких провідне місце посідає концепція сталого розвитку, інтеграція її принципів у логістичну діяльність набуває особливої актуальності. Впровадження сталих логістичних рішень є критично важливим для зниження негативного екологічного впливу, оптимізації логістичних витрат і підвищення ефективності використання ресурсів. Водночас це сприяє зростанню соціальної відповідальності підприємств, підвищенню їх конкурентоспроможності та забезпеченню довгострокової стійкості функціонування в умовах сучасних глобальних викликів.

Метадані для фактичного індикатора 12.4.2, доступного зі статистики України, найближчої до відповідного глобального індикатора ЦСР

| | |
|-------------------------------|---|
| Ціль | 12 Відповідальне споживання та виробництво |
| Завдання | 12.4 Зменшити обсяг утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв |
| Показник | 12.4.2 Частка спалених та утилізованих відходів у загальному обсязі утворених відходів, % |
| Організація | Державна служба статистики України (Держстат) |
| Одиниця виміру | Відсоток (%) |
| Коментарі та обмеження | 2022-2023 роки – Дані наведено без урахування тимчасово окупованих російською федерацією територій та частини територій, на яких ведуться (велися) бойові дії. Дані можуть бути уточнені. |

ВИСНОВКИ

У процесі дослідження встановлено, що в умовах реалізації стратегії сталого розвитку, яка базується на поєднанні економічної, соціальної та екологічної складових, логістична діяльність відіграє ключову роль у функціонуванні економічної системи держави. Визначено, що логістичні процеси є джерелом суттєвих негативних впливів на довкілля та міське середовище, зокрема через викиди шкідливих і парникових газів, надмірне споживання енергетичних ресурсів, утворення відходів, а також додаткове навантаження на інфраструктуру та зростання ризиків для безпеки за умов недостатньої оптимізації.

Обґрунтовано необхідність переходу підприємств логістичного сектору до сталих моделей діяльності, що орієнтовані на зменшення негативного впливу на довкілля, підвищення операційної ефективності та відповідальне використання ресурсів. Доведено, що такий перехід є не лише екологічною, а й економічною та соціальною вимогою сучасного ринку.

Встановлено, що логістика має істотний вплив на досягнення більшості ЦСР, зокрема через забезпечення ресурсоефективності, розвиток транспортної та логістичної інфраструктури та зниження кліматичних ризиків. З'ясовано, що досягнення ЦСР у сфері логістики відбувається шляхом впровадження сталих практик, які охоплюють управлінські, технологічні, організаційні та соціально-екологічні рішення.

У ході дослідження систематизовано сталі практики в межах логістичних концепцій зеленої, реверсивної та сітілогістики та визначено їх векторну орієнтацію на складові сталого розвитку. Зокрема, встановлено, що зелена логістика має переважно екологічне спрямування, реверсивна логістика поєднує економічні та екологічні цілі, а сітілогістика орієнтована на досягнення соціальних і екологічних аспектів сталого розвитку.

Запропоновано підходи до оцінювання рівня досягнення ЦСР в логістичній діяльності. На рівні підприємства доцільним є використання комплексного інтегрального показника за економічним, екологічним і соціальним векторами або системи КРІ, тоді як на макрорівні ефективність впровадження сталих практик може оцінюватися за допомогою національних індикаторів ЦСР, зокрема тих, що безпосередньо пов'язані з логістичною діяльністю.

АНОТАЦІЯ

В умовах необхідності впровадження стратегії сталого розвитку, яка базується на синтезі трьох взаємопов'язаних компонентів, а саме: економічної, соціальної та екологічної складової та може розглядатися як альтернатива моделі екстенсивного економічного зростання, окремої уваги заслуговує логістична діяльність, яка є базовою для економічної системи держави. Негативні впливи, які зумовлюються логістичними процесами, пов'язані з викидами шкідливих речовин та парникових газів через інтенсивне використання транспортних засобів; забруднення повітря, шумове та вібраційне навантаження на міські території; надмірне споживання енергетичних ресурсів; утворення великої кількості відходів, зокрема пакувальних матеріалів, тощо. Крім того, низький рівень оптимізації логістичних процесів може призводити до додаткового навантаження на інфраструктуру, дорожніх заторів та підвищення ризиків для безпеки. Сукупність цих негативних впливів актуалізує необхідність переходу підприємств логістичного сектору до сталих моделей діяльності, спрямованих на зменшення шкоди довкіллю, підвищення ефективності операцій та відповідальне використання ресурсів. Такий перехід стає не лише екологічною, а й економічною та соціальною вимогою сучасного ринку.

Сфера логістики відіграє важливу роль у досягненні більшості ЦСР, оскільки вона впливає на ресурсоефективність, транспорт, обслуговування торговельних та виробничих підприємств, інфраструктуру та клімат тощо. Слід зазначити, що досягнення ЦСР в логістиці відбувається на основі впровадження сталих практик. При цьому, сталі практики розглядаються як комплекс управлінських, технологічних, організаційних та соціально-екологічних рішень, які системно впроваджуються у діяльність логістичних провайдерів з метою мінімізації негативного впливу на довкілля, а також суспільство, раціонального використання ресурсів та забезпечення довгострокової економічної ефективності і стійкості розвитку.

Сталі практики в дослідженні структуровано в рамках окремих логістичних концепцій, які власне і сформувалися під впливом стратегії

сталого розвитку. Це, зокрема, зелена, реверсивна та сітілогістика. Також простежено векторну орієнтацію на певні складові сталого розвитку вище зазначених концепцій. Зокрема, встановлено, що суто екологічне спрямування має концепція зеленої логістики, економічне та екологічне спрямування має концепція реверсивної логістики, а концепція сітілогістики орієнтована на досягнення соціальних на екологічних ЦСР.

В роботі запропоновано підходи до відстеження успішності досягнення ЦСР в логістичній діяльності. На рівні окремого підприємства, яке є логістичним провайдером, або виробничого чи торговельного підприємства, яке в своїй організаційній структурі має власний логістичний підрозділ і виконує логістичне обслуговування власними силами, ступінь досягнення ЦСР запропоновано визначати через комплексний інтегральний показник, який включає оцінку за трьома векторами: економічним, екологічним та соціальним. Також з цією метою можна використовувати системи ключових показників оцінювання ефективності за кожною із складових сталого розвитку. Для оцінки прогресу досягнення ЦСР на рівні держави або окремих галузей економіки можна використати національні індикатори, які було розроблено в Україні та, які оприлюднюються Державною службою статистики України на відкритій платформі ЦСР (в партнерстві з ПРООН в рамках програми ООН «Сприяння стратегічному плануванню та фінансуванню стійкого розвитку України як на національному, так і на регіональному рівні»). Певні індикатори, які мають безпосереднє відношення до логістичної діяльності, також можуть слугувати в якості вимірників успішності як досягнення ЦСР, так і впровадження сталих практик в сфері логістики.

Література

1. Декларація Ріо-де-Жанейро з навколишнього середовища і розвитку, (1992 р.). URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/riodecl.shtml (дата звернення: 10.01.2026).
2. Порядок денний на XXI століття. URL: <https://dev.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok/bazovi-dokumenty/> (дата звернення: 19.01.2026).
3. Цілі сталого розвитку. Організація об'єднаних націй. Україна. URL: <https://ukraine.un.org> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Керівництво «Посилення ролі бізнесу в досягненні ЦСР в Україні». URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/kerivnytstvo-posylennya-rol-i-biznesu-v-dosyahnenni-tssr-v-ukrayini> (дата звернення: 10.01.2026).
5. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мельник Л. Г., Ракоїд О. О. Стратегія сталого розвитку: Підручник. За редакцією професора В.М. Боголюбова. – К.: ВЦ НУБІПУ, 2018. – 446 с.

6. Стратегія сталого розвитку: Європейські горизонти [Електронний ресурс]: Підручник / І. Л. Якименко, Л. П. Петрашко, Т. М. Димань, О. М. Салавор, Є. Б. Шаповалов, М. А. Галабурда, О. В. Ничик, О. В. Мартинюк. – К.: НУХТ, 2022. – 337 с. URL: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/7990/1/stratetiia_staloho.pdf (дата звернення: 10.01.2026).

7. Коломієць Л.В. Стратегія сталого розвитку: Навч. Посібник. – Кропивницький: 2019. – 126 с.

8. Галак Ірина, Косинський Дмитро. Інтеграція принципів сталого розвитку в управління ланцюгом постачання у логістичних провайдерів. 1 Міжнародна науково-практична конференція “Modern Perspectives on Global Scientific Solutions”, 7-9 жовтня 2024, Берген, Норвегія, 2024, с.75-85

9. Галак І. І., Крюковська Л. І. Особливості управління реверсивними потоками у замкненому ланцюзі постачань. Вісник Національного транспортного університету. Серія Технічні науки. 2021. Вип. 48. С. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-073-082> URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/073-082.pdf> (дата звернення: 10.01.2026).

10. Галак І. І., Добровольська А. М., Добровольський О. С., Овчар Д. О. Підходи до впровадження сталих практик у діяльність логістичного провайдера. Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», 2024. Вип. 116. Частина 2. Київ. С. 278-297. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-116.2-278-297> (дата звернення: 19.01.2026).

11. Білоног О. Є., Галак І. І., Овчар Д. О. Вплив системи управління часовими слотами на робочий час водіїв у підприємствах логістичних провайдерів. Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку. Запоріжжя, 2025. – Випуск 1 (31), С. 50 – 66. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-1/31-05> (дата звернення: 19.01.2026).

12. Білоног О. Є., Янішевський С. В., Костюченко О. В., Фаргучний В. І., Черненко І. О., Янішевський Є. С. Впровадження підходів сталого розвитку під час управління процесами транспортного обслуговування суб'єктів господарської діяльності. Дороги і мости. Київ, 2025. Вип. 31. С. 322–335. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.331> (дата звернення: 19.01.2026).

13. Білоног О. Є., Галак І. І., Добровольська А. М., Янішевський С. В. Системні аспекти забезпечення ефективності сітілогістики. Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку. Запоріжжя, 2025. – Випуск 2 (32), С. 221 – 235. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-2/32-18>. (дата звернення: 19.01.2026).

14. Білоног О. Є., Янішевський С. В., Галак І. І., Климчук Ю. О. Управління міською мобільністю: кращі практики впровадження проєктів

розвитку систем сталої мобільності в містах України. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал. Київ, 2025. – Вип. 117.1. С. 276 – 292. DOI: <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.1-276-292>. (дата звернення: 19.01.2026).

15. Білоног О. Є., Янішевський С. В., Климчук Ю. О., Черненко І. О. Міська мобільність в Україні: аналіз основних викликів. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2024. – Вип. 1 (58). С. 11-22. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2024-1-58-011-022>. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/58/011.pdf> (дата звернення: 19.01.2026).

16. Янішевський С. В., Білоног О. Є., Корчевська А. А. Обмеження швидкості транспортних засобів в містах для підвищення безпеки вразливих учасників дорожнього руху. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий збірник. – К. : НТУ, 2023. – Вип. 1 (55). С. 335-347. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-335-347>. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/55/335.pdf> (дата звернення: 19.01.2026).

17. Polishchuk V., Yanishevskiy S., Bilonoh O., Nahrebelna L., Trushevsky V., Korchevska A., Semenchenko O., Vyhovska I. (2023). Expert assessment of engineering and planning solutions to improve the safety of vulnerable road users in Ukraine. // Expert assessments in decision making: risks and safety: collective monograph. Pp. 154-206. Tallinn: Scientific Route OÜ, 222. Scopus DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9916-9850-2-1> (дата звернення: 19.01.2026).

18. Відкрита платформа ЦСР в Україні. URL: <https://sdg.ukrstat.gov.ua/uk/goals/> (дата звернення: 19.01.2026).

Information about the author:

Bilonoh Oksana Yevhenivna,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor at the Department of Logistics
and Project Management,

National Transport University,

1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., Kyiv, 02000, Ukraine

УПРАВЛІННЯ ПАРТНЕРСЬКИМИ ВІДНОСИНАМИ В ЛАНЦЮГУ ПОСТАЧАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ESG-ІНТЕГРАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ЛОГІСТИЧНОГО ПРОВАЙДЕРА

Галак І. І.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-11>

ВСТУП

Успішний перехід до зеленої економіки можливий лише за умови системного підходу, який передбачає узгоджену взаємодію бізнесу, держави та міжнародних партнерів, а також формування сприятливого інституційного середовища для впровадження сталих рішень. У цьому процесі ключове значення мають підвищення енергоефективності, розвиток відновлюваних джерел енергії та модернізація економічних процесів, що безпосередньо впливають на зменшення екологічного навантаження та підвищення стійкості господарської діяльності. Водночас важливу роль відіграють освітні й інформаційні ініціативи, які сприяють формуванню екологічної відповідальності та залученню всіх учасників економічних відносин до реалізації принципів зеленої економіки. Адаптація традиційних галузей, розвиток інноваційних підходів у виробництві й наданні послуг, а також поширення прозорих стандартів і сертифікації створюють необхідні передумови для довгострокового сталого розвитку та підвищення конкурентоспроможності суб'єктів господарювання в умовах структурних змін¹.

У міру посилення вимог до відповідальності бізнесу з боку інвесторів, регуляторів і суспільства зазначені підходи дедалі більше поширюються на сферу управління ланцюгами постачання, у межах яких сталість розглядається не як додаткова перевага, а як ключовий критерій ефективності діяльності. За таких умов стійкість постає як стратегічний

¹ Huseynova N. Transition to sustainable development and green economy. *Modern Knowledge: Research and Discoveries: proceedings of the 3rd international scientific and practical conference (Vancouver, July 19–20, 2024)*. Vancouver, 2024. P. 47–54. DOI: 10.51582/interconf.19-20.07.2024.004. <https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/article/view/6689/6727>

підхід, що дозволяє компаніям, зокрема логістичним провайдером, зберігати конкурентні позиції шляхом інтеграції екологічних, соціальних та управлінських (ESG) принципів у взаємодію з партнерами ланцюга постачання². Попри зростання зацікавленості бізнесу у впровадженні сталих практик, логістичні провайдери продовжують стикатися з труднощами забезпечення екологічної та соціальної відповідальності в межах власної операційної діяльності. Значною мірою це зумовлено передачею частини логістичних функцій на аутсорсинг транспортним організаціям і перевізникам, діяльність яких не завжди відповідає цілям сталого розвитку та ESG-принципам. Різний рівень управлінської зрілості, фінансових можливостей, а також неоднакове сприйняття вимог щодо екологічної безпеки, умов праці та соціальної відповідальності серед субпідрядників створюють додаткові ризики для репутації, прозорості та сталості діяльності логістичного провайдера. У зв'язку з цим зростає роль управління партнерськими відносинами як інструменту ESG-інтеграції, що дозволяє логістичному провайдеру формувати вимоги до субпідрядників, координувати їхню діяльність і сприяти підвищенню рівня сталості в межах усього логістичного ланцюга.

Фінансова звітність традиційно слугувала ключовим джерелом інформації для зацікавлених сторін про фінансовий стан, операційні результати та грошові потоки компаній. Однак численні дослідження показують, що ці дані вже не є достатніми для ефективного прийняття рішень, оскільки сучасні стейкхолдери очікують ширшої інформації про екологічні, соціальні та економічні наслідки діяльності підприємств³. Саме тому розвиток нефінансової звітності, а згодом і звітності зі сталого розвитку, став необхідним елементом сучасного відповідального та стратегічно орієнтованого корпоративного управління.

Усвідомлення необхідності сталого розвитку логістичним провайдером має виходити за межі декларативних підходів і потребує інституційного закріплення у системі управління та прийняття рішень. Перехід від традиційної операційної моделі до сталої діяльності передбачає не лише впровадження окремих екологічних чи соціальних ініціатив, а й формування механізмів вимірювання, контролю та оцінки досягнутих результатів. У цьому контексті звітність зі сталого розвитку виступає ключовим інструментом, що забезпечує фіксацію фактичного впливу логістичної діяльності на економічні, соціальні та екологічні аспекти, а також слугує

² Cassani, L., and Gomez-Zavaglia, A. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. *Front. Nutr.* 2022, V.9, 829061. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.829061>

³ Kelly L. History of Sustainability Reporting. *Energy Elephant*. 2022. URL: <https://blog.energyelephant.com/history-of-sustainability-reporting/>

доказом реальної інтеграції принципів сталості у повсякденні бізнес-процеси. Саме через систему показників, стандартів і розкриття інформації звітність формує «місток» між операційною діяльністю логістичного провайдера та стратегічною орієнтацією на сталий розвиток, роблячи цей перехід прозорим і перевіреним для зацікавлених сторін⁴.

Основна ідея полягає в тому, що інтеграція ESG-принципів у діяльність учасників логістичного ланцюга постачання сприяє сталому розвитку всієї мережі, підвищенню конкурентоспроможності партнерів та зростанню їх інвестиційної привабливості. Логістичні провайдери, орієнтовані на дотримання екологічних, соціальних та управлінських стандартів, виступають ключовими координаторами цього процесу, формуючи довгострокову цінність для широкого кола стейкхолдерів через розвиток партнерських відносин у ланцюгу постачання.

Водночас у більшості досліджень сталого управління ланцюгами постачання акцент традиційно робиться на взаємодії між ключовими учасниками, що перебувають на одному організаційному рівні, зокрема виробниками, постачальниками, дистриб'юторами, роздрібними мережами та логістичними провайдерами. Такі партнери, як правило, мають порівнянні ресурсні можливості, інституційну зрілість і стратегічну спроможність до впровадження ESG-принципів. Однак досягнення системної сталості ланцюга постачання не може бути обмежене лише цим рівнем взаємодії, оскільки значна частина екологічних, соціальних та операційних впливів формується за участю субпідрядників, які, хоча й не належать до ядра ланцюга постачання, є безпосередньо залученими до виконання логістичних та транспортних операцій. Саме тому залучення субпідрядників, малих або середніх підприємств із нижчим рівнем ESG-зрілості, до процесів сталого розвитку набуває особливого значення з точки зору формування інтегрованої системи сталого управління логістичним провайдером.

Попри те, що такі підприємства зазвичай не зобов'язані здійснювати формальне розкриття ESG-інформації, результати їх операційної діяльності безпосередньо впливають на сукупні екологічні та соціальні показники провайдера, які відображаються у його нефінансовій звітності. Для великих логістичних компаній, що дедалі частіше функціонують у середовищі посиленних вимог до сталості та прозорості діяльності, зокрема у контексті європейської інтеграції, рівень ESG-зрілості субпідрядників стає важливим чинником діяльності. У цьому зв'язку мотивація, навчання та поступова

⁴ Inten Meutia, Zulnaidi Yaacob and Shelly F. Kartasari. Sustainability reporting: An overview of the recent development. *Accounting and Financial Control*, 2020, 3(1), 23-39. [http://dx.doi.org/10.21511/afc.03\(1\).2020.03](http://dx.doi.org/10.21511/afc.03(1).2020.03)

інтеграція ESG-принципів у діяльність субпідрядників розглядаються як інструмент підвищення сталого розвитку самого логістичного провайдера.

У зазначеному контексті актуалізується потреба у поглибленому аналізі механізмів, за допомогою яких логістичний провайдер може впливати на рівень сталості діяльності субпідрядників, не обмежуючись формальними вимогами чи контрактними зобов'язаннями. Особливої уваги потребує управління партнерськими відносинами як інструмент координації, мотивації та поступової інтеграції ESG-принципів у діяльність субпідрядників, що дозволяє поєднати стратегічні цілі логістичного провайдера з реальними операційними практиками на нижчих рівнях ланцюга постачання. Саме через такі механізми можливо зменшити розрив між декларованими цілями сталого розвитку та фактичними результатами логістичної діяльності, а також забезпечити цілісність ESG-підходів у межах усього ланцюга створення вартості. Це зумовлює доцільність дослідження управління партнерськими відносинами в ланцюгу постачання як інструменту ESG-інтеграції та підвищення сталості діяльності логістичного провайдера, що й визначає мету, логіку та структуру даної роботи.

Метою даного дослідження є аналіз ролі управління партнерськими відносинами в ланцюгу постачання як інструменту інтеграції ESG-принципів у діяльність логістичного провайдера з урахуванням особливостей взаємодії із субпідрядниками.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається розгляд теоретичних підходів до сталого управління ланцюгами постачання, аналіз специфіки ESG-інтеграції у логістичній діяльності, а також дослідження можливостей застосування мотиваційних та координаційних механізмів залучення субпідрядників до процесів сталого розвитку.

1. Ключові елементи сталого управління та ESG-стратегії логістичного провайдера

Стратегія сталої діяльності логістичного провайдера має зосереджуватись на пріоритетах у сфері сталого розвитку та відповідних матеріальних темах ESG, що відображено на рис. 1⁵.

Чітка стратегія допомагає забезпечити узгодженість організації та спільну роботу над досягненням її цілей, а також визначає пріоритети та оптимальний розподіл ресурсів для реалізації цих цілей. Постійне прагнення

⁵ Галак І.І., Добровольська А.М., Добровольський О.С., Овчар Д.О. Підходи до впровадження сталих практик у діяльність логістичного провайдера. Науковий журнал. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал. Вип. 116. Київ. 2024. С. 183-206. http://publications.ntu.edu.ua/avtdorogi_i_stroitelstvo/116.2/278.pdf

мінімізувати ризики та посилювати можливості, базуючись на результатах щорічної оцінки пріоритетів, дозволяє аналізувати потреби й очікування зацікавлених сторін, забезпечуючи безперервне покращення якості послуг.

Системне прагнення до мінімізації ризиків і водночас посилення можливостей розвитку, що ґрунтується на результатах щорічної оцінки пріоритетів, дає змогу логістичному провайдеру глибше розуміти потреби та очікування зацікавлених сторін і забезпечувати безперервне підвищення якості послуг. У цьому контексті формування та реалізація пріоритетів сталого розвитку доцільно розглядати крізь призму ESG-підходу, який інтегрує екологічні, соціальні та управлінські аспекти діяльності компанії.

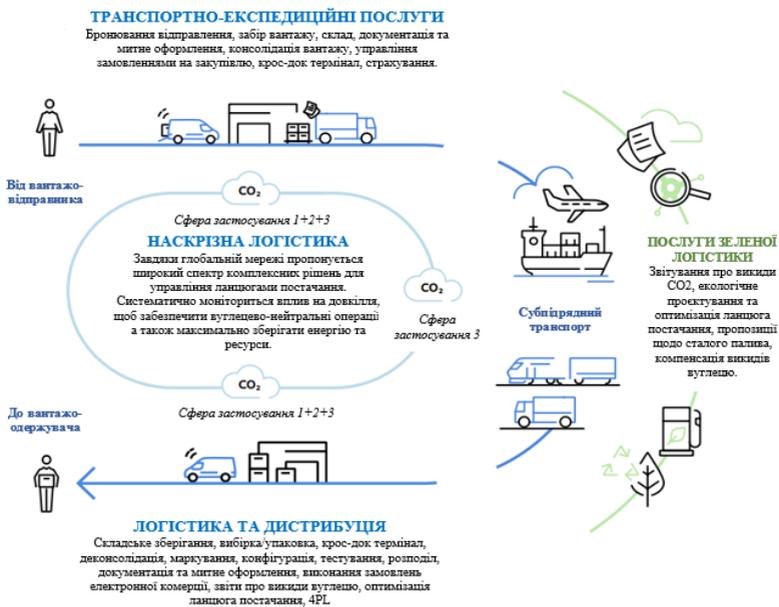


Рис. 1. Стратегічні пріоритети сталої діяльності логістичного провайдера у контексті ESG

У межах екологічного компонента (Environmental) ключовим пріоритетом для логістичних провайдерів є зменшення власного негативного впливу на довкілля. Транспортний сектор залишається одним із найбільш енергоємних у світі та, за оцінками, формує близько 20 % глобальних викидів CO₂, що зумовлює підвищену увагу до питань декарбонізації. Відповідно до рекомендацій Міжурядової групи експертів

зі зміни клімату та ініціативи Science Based Targets, компаніям необхідно зосереджуватися не лише на оптимізації власних операцій, а й на зменшенні екологічного впливу партнерів у межах ланцюга постачання. Це передбачає дотримання екологічних вимог у країнах присутності, раціональне використання енергії та ресурсів, запобігання забрудненню, відповідальне управління водними ресурсами, а також інтеграцію цих заходів у систему управління з регулярним моніторингом і звітуванням. Важливим напрямом також є розвиток низьковуглецевих логістичних рішень, впровадження послуг із нульовими або мінімальними викидами та прискорення переходу до відновлюваних джерел енергії⁶.

Соціальний вимір ESG (Social) охоплює зобов'язання логістичних провайдерів щодо забезпечення добробуту працівників і відповідального ставлення до суспільства. Це включає створення інклюзивних робочих місць, справедливу оплату праці, розвиток талантів і формування корпоративної культури, заснованої на повазі та рівних можливостях. Компанії мають гарантувати дотримання трудових прав, свободу об'єднання та колективних переговорів, а також виконання норм національного законодавства і стандартів Міжнародної організації праці. Особлива увага приділяється охороні праці та безпеці, показники яких системно відстежуються через інтегровані системи управління. Водночас логістичні провайдери зобов'язані дотримуватися міжнародних принципів захисту прав людини, протидіяти примусовій праці, торгівлі людьми та будь-яким формам експлуатації, а також враховувати вплив своєї діяльності на місцеві громади, зокрема в частині транспортного навантаження, безпеки руху, якості повітря та збереження біорізноманіття⁷.

Управлінський компонент (Governance) ESG зосереджується на принципах чесності, прозорості та відповідальності у веденні бізнесу. Логістичні компанії повинні діяти відповідно до етичних стандартів, забезпечувати прозору податкову практику, належний захист даних і конфіденційної інформації, а також формувати відповідальний ланцюг постачання. Це передбачає встановлення чітких вимог до постачальників, їх відповідність стандартам сталого розвитку та залучення до реалізації спільних ESG-цілей. Для забезпечення прогресу в усіх напрямках ESG необхідним є регулярний перегляд і коригування коротко- та довгострокових цілей, проведення оцінки значущості ESG-тем, кліматичних ризиків і можливостей (табл.1) , а також їх інтеграція в систему управління

⁶ Sustainability ratings. URL: <https://www.dsv.com/en/our-reporting>

⁷ Тюріна А.А., Грищенко А.О. ESG як нова парадигма оцінки інвестиційної привабливості сільськогосподарських підприємств. Агросвіт. 2025. 14. С.160-169. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.14.160>.

ризики⁸. Такий підхід дозволяє логістичним провайдерам більш ефективно реагувати на зовнішні виклики та забезпечувати стійкий розвиток у середньо- й довгостроковій перспективі.

Таблиця 1

Потенційні ризики та можливості та їх вплив на стратегію сталого розвитку логістичного провайдера

| Ризик та можливість | Опис | Потенційний вплив на логістичного провайдера |
|--|---|---|
| Фізичні кліматичні ризики (підвищення температури, екстремальні погодні явища) | За умов недостатніх глобальних зусиль із пом'якшення наслідків зміни клімату зростає ймовірність підвищення температури, повен-ей, теплового стресу, посух, штормів та інших екстремальних погодних явищ, що створює середньо- та довгострокові ризики для транспортної інфраструктури. | Підвищення ризиків для здоров'я та безпеки працівників на складах і терміналах, збої в ланцюгах постачання, зростання операційних витрат і ризиків переривання сервісу. Для провайдерів з asset-light моделлю прямий вплив є обмеженим, однак непрямі ризики через партнерів залишаються суттєвими. |
| Регуляторні та політичні ризики | Посилення державного регулювання у сфері кліматичної політики, зокрема запровадження ціноутворення на викиди вуглецю, обов'язкових цілей декарбонізації та вимог до нефінансової звітності, а також залежність від розвитку інфраструктури відновлюваної енергетики. | Потенційне зростання тарифів і витрат у ланцюгу створення вартості, необхідність адаптації бізнес-моделей і процесів звітування. Вплив на фінансові результати частково може бути компенсований через перерозподіл витрат між учасниками ланцюга постачання. |
| Технологічні ризики | Досягнення цілей з нульових викидів вимагає впровадження нових, часто ще не повністю зрілих або комерційно доступних технологій у сфері транспорту, енергетики та цифрових рішень. | Ризики пов'язані з невизначеністю щодо ефективності інвестицій, термінів масштабування технологій та швидкості їх впровадження. Водночас здатність своєчасно ідентифікувати та інтегрувати інновації може стати джерелом конкурентних переваг. |
| Комерційні та ринкові ризики | Зростання вимог клієнтів і партнерів щодо зниження викидів у ланцюгах постачання та досягнення кліматичних цілей створює додатковий тиск на логістичних провайдерів. | У разі неспроможності запропонувати низьковуглецеві логістичні рішення можливе скорочення попиту на послуги. Натомість розвиток «зелених» продуктів і послуг дозволяє утримувати клієнтів і розширювати ринкові можливості без значних капіталовкладень у власні активи. |

⁸ Report on Corporate Governance. URL: <https://www.dsv.com/en/governance-reports>

Продовження таблиці 1

| | | |
|--|---|---|
| Можливості сталого зростання та декарбонізації | Перехід до сценарію з обмеженням глобального потепління на рівні 1,5°C створює можливості для компаній, які інтегрують кліматичні цілі у свої бізнес-моделі та портфель послуг. | Логістичні провайдери, що виступають кліматичними лідерами, можуть отримати конкурентні переваги, посилити довіру клієнтів та інвесторів і стати ключовими учасниками процесу декарбонізації. |
|--|---|---|

Зміна клімату створює для компаній й можливості. За умов переходу до низьковуглецевої економіки компанії, які заздалегідь адаптують свою діяльність до кліматичних вимог і обмежують вплив на довкілля, мають кращі позиції порівняно з тими, хто цього не робить.

Для логістичних провайдерів інтеграція кліматичних питань у систему управління та ESG-стратегію стає важливим чинником довгострокової конкурентоспроможності.

У межах реалізації стратегії сталого розвитку логістичний провайдер формує системну модель взаємодії з ключовими стейкхолдерами, яка ґрунтується на постійному діалозі та врахуванні їхніх очікувань у контексті ESG. Центральне місце в цій моделі займають клієнти, з якими команди з управління рахунками регулярно проводять огляди ринку, ідентифікуючи нові бізнес-можливості та потреби, зокрема у сфері «зеленої» логістики.

Важливо додати, що зворотний зв'язок клієнтів використовується не лише для розвитку послуг, а й як інформаційна база для оцінки матеріального впливу в логістичному ланцюгу постачання.

Важливою групою зацікавлених сторін є інвестори та рейтингові агентства, з якими логістичний провайдер підтримує активний діалог щодо ESG-питань. Під час зустрічей компанія презентує власне бачення сталих логістичних рішень та інвестиційних ініціатив, а також використовує отриманий зворотний зв'язок для узгодження очікувань інвесторів із ESG-стратегією та визначення пріоритетних тем для оцінки значущості. Така взаємодія сприяє підвищенню прозорості та довіри до діяльності провайдера з боку фінансової спільноти⁹.

Не менш вагомою складовою ESG-підходу є взаємодія з працівниками, яка базується на принципах відкритості, залученості та соціальної відповідальності. Логістичний провайдер заохочує чесний діалог щодо актуальних питань, зокрема сталого розвитку, шляхом регулярних опитувань персоналу та внутрішніх комунікацій. Результати таких опитувань використовуються для вдосконалення програм розвитку

⁹ Siems, E., Seuring, S. & Schilling, L. Stakeholder roles in sustainable supply chain management: a literature review. *J Bus Econ* 93, 747–775, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11573-022-01117-5>

людського капіталу та ідентифікації соціально значущих тем у межах організації.

Взаємодія з органами державної влади розглядається як ключовий елемент управлінського компонента ESG. Дотримання чинних регуляторних вимог є базовим принципом ведення бізнесу логістичного провайдера, що передбачає підтримання регулярного та прозорого діалогу з податковими та іншими контролюючими органами. У відповідь компанія отримує актуальну інформацію щодо суспільних і регуляторних очікувань, яка враховується під час оцінки значущості ESG-питань.

В табл. 2 представлена класифікація стейкхолдерів, яка дозволяє систематизувати їх за спільними інтересами та роллю в інтеграції ESG-принципів, що створює підґрунтя для ефективного управління партнерськими відносинами та підвищення сталості логістичного провайдера¹⁰.

Окрему роль у формуванні відповідального ланцюга постачання відіграють постачальники, зокрема перевізники. З огляду на те, що логістичний провайдер здебільшого не володіє власним вантажним обладнанням і значною мірою залежить від підрядників, ефективна взаємодія з ними є критично важливою для реалізації екологічних і соціальних стандартів. Співпраця з постачальниками дозволяє не лише підвищувати рівень сталості всього ланцюга постачання, а й більш чітко визначати межі відповідальності та підходи до оцінки значущості ESG-впливів.

Таблиця 2

Зацікавлені сторони у сталому управлінні ланцюгами постачання

| Група стейкхолдерів | Основні представники | Ключові інтереси | Роль у ESG-інтеграції |
|---|---|--|---|
| Внутрішні стейкхолдери компанії | <ul style="list-style-type: none">керівництвопрацівники | Постійна зайнятість, безпечні умови праці, професійний розвиток, репутація компанії. | Формування та реалізація ESG-стратегії, інтеграція ESG у бізнес-процеси, контроль дотримання стандартів |
| Партнерські стейкхолдери в ланцюгу постачання | <ul style="list-style-type: none">постачальникиперевізникисубпідрядники | Довгострокова співпраця, прозорі контрактні умови, стабільні обсяги робіт. | Виконання екологічних і соціальних вимог, зниження екологічного впливу логістичних операцій, підтримка відповідальних практик |

¹⁰ Воркут Т.А. Управління портфелями реалізації логістичних стратегій в мережах організацій ланцюгів постачань. Монографія / Т.А. Воркут, І.І. Галак, А.В. Петуніч, В.С. Харута. – Київ: Міленіум, 2020. – 210 с

Продовження таблиці 2

| | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Клієнтські стейкхолдери | <ul style="list-style-type: none"> • корпоративні клієнти • торговельні мережі | Якість та надійність сервісу, прозорість операцій, відповідність ESG-вимогам | Формування попиту на сталі логістичні рішення, стимулювання ESG-покращень |
| Фінансово-ринкові стейкхолдери | <ul style="list-style-type: none"> • інвестори • банки | Фінансова стійкість, управління ризиками, довгострокова прибутковість. | Фінансування сталих проєктів, впровадження ESG-критеріїв у фінансові рішення, формування ринкових стандартів |
| Суспільні та регуляторні стейкхолдери | <ul style="list-style-type: none"> • органи влади • громади | Дотримання законодавства, соціальна відповідальність, екологічна безпека | Регулювання та нагляд, суспільний контроль, формування довіри та соціальної легітимності |

Отже, стратегія сталого управління передбачає системне визначення пріоритетів, оцінку матеріальних ризиків і можливостей, а також активну взаємодію з усіма групами стейкхолдерів, що забезпечує ефективне управління екологічним впливом у ланцюгах постачання, розвиток «зелених» логістичних рішень, підвищення соціальної відповідальності і прозорості бізнесу. Такий підхід дозволяє логістичному провайдеру не лише мінімізувати ризики та зміцнювати довіру зацікавлених сторін, а й створювати додаткову цінність для суспільства й довкілля, підтримуючи довгострокову конкурентоспроможність та стійке зростання компанії.

2. Аналіз існуючих методів вирішення проблеми та формулювання завдання для оптимального розвитку техніки

Зазвичай логістичні провайдери здійснюють свою діяльність у тісній взаємодії з субпідрядниками та іншими зовнішніми партнерами, які безпосередньо залучені до виконання транспортних і логістичних операцій. У межах сталого управління ланцюгами постачання логістичний провайдер очікує, що субпідрядники дотримуватимуться аналогічних етичних, соціальних та екологічних стандартів, які застосовуються до власної діяльності компанії. Водночас рівень зрілості ESG-практик серед субпідрядників може суттєво відрізнятись залежно від економічних, інституційних та регуляторних умов, у яких вони функціонують¹¹.

¹¹ Галак І.І., Гець І.М. Інтеграція сталого розвитку та логістики в контексті управління та обслуговування матеріального потоку. Міжнародна науково-практична конференція «Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку», 23 жовтня 2025, м. Київ, Європейський університет, С 207-210. https://e-u.edu.ua/userfiles/files/135/zbirnik_konferencii-_stalogo_rozvitku_23-10-2025_-1.pdf

Подібна асиметрія характерна як для взаємодії між логістичними провайдерами з країн ЄС та партнерами з економічно слабших країн, так і для внутрішнього українського ринку логістичних послуг. У таких умовах недостатній рівень екологічних, соціальних та управлінських стандартів у субпідрядників може створювати репутаційні, операційні та регуляторні ризики для логістичного провайдера як ключового учасника ланцюга постачання.

Водночас зміцнення співпраці між логістичним провайдером та субпідрядниками відкриває можливості для поширення сталих практик у межах ланцюга постачання. Досвід провідних логістичних провайдерів країн ЄС свідчить, що через вимоги до партнерів, спільні стандарти, навчання та координацію процесів можливо підвищувати рівень ESG-зрілості субпідрядників, сприяючи їх довгостроковій конкурентоспроможності та стійкості.

У контексті України дана проблема набуває особливої актуальності. Попри те, що в країні наразі відсутні комплексні законодавчі вимоги щодо обов'язкового розкриття інформації з питань ESG та кліматичних ризиків, останні роки характеризуються активним формуванням нормативної бази у сфері сталого розвитку. У 2021–2024 роках державні органи та регулятори, зокрема Національний банк України та Національна комісія з цінних паперів та фондового ринку, розробили стратегічні документи та дорожні карти реформ, спрямовані на поступове впровадження стандартів з урахуванням практик Європейського Союзу¹².

У жовтні 2024 року була схвалена Стратегія запровадження підприємствами звітності зі сталого розвитку, а 25 червня 2025 року Кабінет Міністрів України підтримав зміни до Закону України «Про бухгалтерський облік та фінансову звітність», які передбачають обов'язкове впровадження звітності зі сталого розвитку для великих і середніх підприємств та застосування Європейських стандартів звітності зі сталого розвитку (ESRS)¹³. Це означає, що в середньостроковій перспективі українські логістичні провайдери та їх субпідрядники будуть змушені адаптувати свою діяльність до нових вимог, зокрема у сфері ESG впливу.

За таких умов логістичні провайдери можуть відігравати ключову роль у підвищенні сталості діяльності субпідрядників, виступаючи

¹² Badovska S. Sustainability-Related Disclosures in Ukraine: What Businesses Should Expect Soon. *Ukrainian Journal of Business Law*. 2022. URL: <https://www.ujbl.info/article.php?id=1542>

¹³ Уряд схвалив зміни до Закону про бухгалтерський облік: що зміниться для бізнесу. 2025. URL: https://www.mof.gov.ua/uk/news/uriad_skhvaliv_zmini_do_zakonu_pro_bukhgalterskii_oblik_sheho_zminitsia_dlia_biznesu-5212

носіями знань, стандартів та управлінських підходів до ESG-інтеграції. Передача сталого досвіду, впровадження спільних вимог і оцінка результатів співпраці дозволяють не лише знизити ризики для самого логістичного провайдера, але й підготувати субпідрядників до майбутніх регуляторних змін та інтеграції України до європейського економічного простору.

З огляду на зазначене доцільним є розроблення дослідницької моделі, що дозволяє проаналізувати вплив співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками на інтеграцію ESG-принципів, підвищення сталості діяльності учасників ланцюга постачання та формування довгострокових конкурентних переваг. Відтак постає потреба у постановці системи дослідницьких питань, спрямованих на виявлення закономірностей впливу співпраці логістичного провайдера з субпідрядниками на інтеграцію ESG-принципів, підвищення сталості діяльності учасників ланцюга постачання та формування їх конкурентних переваг у довгостроковій перспективі.

П1: Який вплив має співпраця логістичного провайдера із субпідрядниками на інтеграцію ESG-принципів у ланцюгах постачання?

П2: Чи сприяє передача сталих практик логістичного провайдера підвищенню рівня сталості діяльності та конкурентоспроможності субпідрядників?

Теоретичну модель дослідження представлено на рисунку 2.

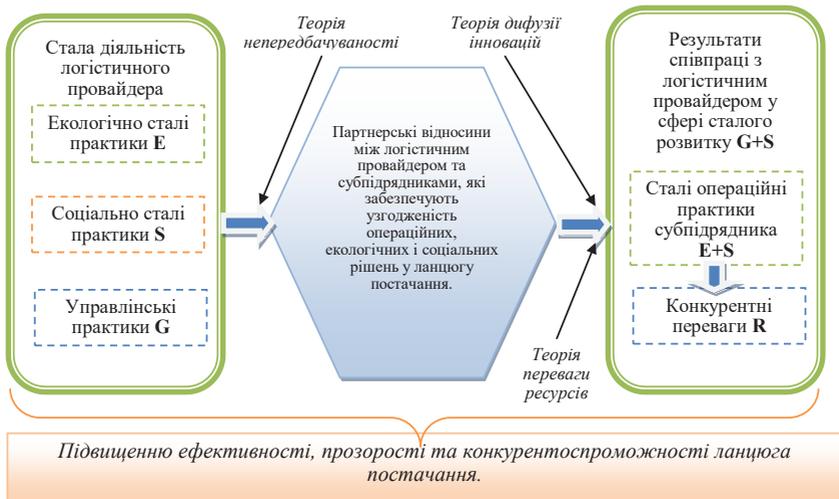


Рис. 2. Теоретичну модель дослідження

Варто зазначити, що навіть за високої обізнаності про принципи сталого розвитку та ESG-практики, це не завжди конвертується у реальні дії¹⁴. Нестача знань і компетенцій знижує мотивацію інвестувати в екологічні ініціативи та відтермінує впровадження кліматичних рішень. Ця проблема проявляється у невідповідності між усвідомленням важливості ESG та фактичним рівнем інтеграції сталих практик у діяльність компаній, що ускладнює досягнення стратегічних цілей сталості на рівні ланцюга постачання. У контексті управління партнерськими відносинами в ланцюгу постачання навчання та підтримка субпідрядників щодо ESG-принципів створює потенціал для реальної трансформації їхніх операційних процесів, що, у свою чергу, підвищує загальну стійкість та ефективність логістичного провайдера.

Сучасні ланцюги постачання функціонують в умовах підвищеної турбулентності, зумовленої регуляторними змінами, глобалізаційними процесами, цифровізацією та зростанням вимог до екологічної й соціальної відповідальності бізнесу. У таких умовах традиційні підходи до управління логістичними взаємодіями є недостатніми для пояснення механізмів інтеграції принципів сталого розвитку та ESG у діяльність учасників ланцюга постачання.

З огляду на це, у дослідженні застосовано комплексний теоретичний підхід, що поєднує теорію непередбачених обставин, теорію дифузії інновацій та теорію ресурсних переваг. Використання зазначених теорій дозволяє всебічно обґрунтувати роль співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками як ключового механізму адаптації до зовнішніх викликів, поширення ESG-практик та формування довгострокових конкурентних переваг у ланцюгах постачання.

Теорія непередбачених обставин виходить з того, що зовнішнє середовище функціонування організацій характеризується високим рівнем невизначеності (табл.3), що безпосередньо впливає на стабільність та ефективність ланцюгів постачання¹⁵. В умовах регуляторних змін, зростання вимог до екологічної та соціальної відповідальності, а також посилення тиску з боку клієнтів і міжнародних партнерів, співпраця між логістичним провайдером та субпідрядниками розглядається як механізм зниження цієї невизначеності.

¹⁴ Нопка, М., Kovtun, O. Features of implementation of ESG management criteria in Ukrainian agriculture in the context of global challenges and EU integration. *Economics and Business Management*, 2024. 15 (3), 87—99. DOI: <https://doi.org/10.31548/economics/3.2024.87>

¹⁵ Buttermann G., Germain R., Iyer K. N. S. Contingency theory “fit” as gestalt: An application to supply chain management // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2008. Vol. 44, No. 6. P. 955–969. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.05.012>

Систематизація впливу факторів середовища на ESG-орієнтовану співпрацю в ланцюгу постачання

| Рівень середовища | Зміст середовища | Прояви в контексті ESG | Роль співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками |
|------------------------------|--|--|--|
| Далеке зовнішнє середовище | Соціокультурні, політичні, макроекономічні та екологічні фактори | Глобальні кліматичні виклики, ESG-регулювання, міжнародні стандарти, цифровізація, тиск інвесторів і суспільства | Формує зовнішню невизначеність, що стимулює потребу в узгоджених ESG-підходах у ланцюгу постачання |
| Близьке зовнішнє середовище | Клієнти, партнери, конкуренти, державне регулювання | Вимоги клієнтів до «зелених» послуг, відповідальності постачальників, відповідності ESG-критеріям | Співпраця використовується як інструмент узгодження стандартів і зниження репутаційних та регуляторних ризиків |
| Далеке внутрішнє середовище | Стратегія, місія, бізнес-модель, управлінські рішення | Включення ESG у корпоративну стратегію логістичного провайдера | Логістичний провайдер задає ESG-орієнтири та очікування для субпідрядників |
| Близьке внутрішнє середовище | Операційні процеси, ресурси, бюджети, планування | Реалізація екологічних, соціальних та управлінських практик у логістичних операціях | Спільне планування, координація процесів і обмін ресурсами сприяють практичній ESG-інтеграції |
| Рівень дій (операційний) | Ідентифікація та впровадження інновацій | Запровадження ESG-практик як управлінських та операційних інновацій | Співпраця виступає каналом поширення інновацій і закріплення сталих практик серед субпідрядників |

Відповідно до положень теорії, співпраця не є статичною, а змінюється залежно від зовнішніх умов, тоді як операційні процеси мають бути адаптовані до вимог середовища. Це формує теоретичну основу для припущення, що логістичні провайдери можуть досягати цілей сталого розвитку та інтегрувати ESG-принципи шляхом поглиблення співпраці із субпідрядниками.

Підвищення рівня сталості діяльності неможливе без глибоких організаційних змін, що реалізуються через навчання, обмін знаннями та впровадження інновацій. Наукові дослідження підкреслюють, що стійкі практики мають інноваційний характер і потребують відповідних ресурсів для їх поширення та закріплення. У цьому контексті співпраця логістичного провайдера із субпідрядниками виступає каналом передачі знань, стандартів та управлінських рішень у сфері ESG. Інновації

у логістичних процесах, цифрових рішеннях, екологічних технологіях і соціальних практиках сприяють підвищенню операційної ефективності та формуванню конкурентних переваг як для самого логістичного провайдера, так і для його партнерів.

З позицій теорії непередбачених обставин, впровадження логістичним провайдером екологічних, соціальних та управлінських практик формує нове інституційне середовище для діяльності субпідрядників. В екологічному аспекті це проявляється у впровадженні енергоефективних транспортних рішень, оптимізації маршрутів, зниженні викидів, управлінні відходами та використанні циркулярних підходів¹⁶.

Соціальні ESG-практики, зокрема дотримання стандартів охорони праці, розвиток інфраструктури, створення робочих місць та соціальні ініціативи, сприяють підвищенню мотивації персоналу, зниженню плинності кадрів і покращенню репутації логістичного провайдера та його партнерів¹⁷.

В управлінському вимірі впровадження стандартів управління якістю, цифрових технологій та інноваційних логістичних рішень дозволяє знижувати витрати, скорочувати терміни виконання замовлень і підвищувати надійність послуг, що створює умови для довгострокового розвитку ланцюга постачання.

Теорія дифузії інновацій пояснює механізми прийняття нових практик організаціями через канали взаємодії (рис.3). У межах даного дослідження ESG-практики логістичного провайдера розглядаються як управлінські та операційні інновації, що трансформують підходи до сталого розвитку в ланцюгах постачання¹⁸.

Поширення таких практик серед субпідрядників відбувається поетапно через інформування, переконання, прийняття рішень, спільну реалізацію та підтвердження ефективності. Це дозволяє субпідрядникам адаптувати ESG-практики до власних операційних можливостей і поступово інтегрувати їх у свою діяльність.

Згідно з теорією переваги ресурсів, конкурентні переваги формуються завдяки доступу до унікальних, важко відтворених матеріальних

¹⁶ Bilonoh O., Sopotsko O., Fartuchnyi V. The role of road transport enterprises in sustainable logistics. *Economics for Ecology: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Sumy, June 13–14, 2025. Sumy, 2025 – 34-35 pp. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17036242>.

¹⁷ Овчар Д.О. Ключові аспекти управління персоналом водіїв у підприємствах логістичних провайдерів в умовах економічної нестабільності та кризових ситуацій. *Дороги і мости*. Вип. 31. Київ, 2025. С. 292–304. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.292>.

¹⁸ Aizstrauta D., Ginters E., Pjera Eroles M.-A. Applying theory of diffusion of innovations to evaluate technology acceptance and sustainability. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 43. P. 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.12.010>

і нематеріальних ресурсів та здатності організації ефективно поєднувати їх у межах міжорганізаційних взаємодій (табл.4).



Рис. 3. Процес інтеграції ESG-принципів через співпрацю логістичного провайдера із субпідрядниками на основі теорії дифузії інновацій

Комбінація ресурсів у межах співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками забезпечує інтеграцію фізичних, інформаційних та нематеріальних активів, що створює синергетичний ефект, сприяє системному впровадженню ESG-практик у логістичні процеси та формуванню довгострокових конкурентних переваг¹⁹.

У контексті логістичної діяльності такими ресурсами виступають не лише фізична інфраструктура, а й управлінські компетенції, знання, інформаційні технології, реляційний та репутаційний капітал. Співпраця логістичного провайдера із субпідрядниками створює механізм доступу та обміну цими ресурсами, зокрема ESG-стандартами, управлінськими практиками, цифровими рішеннями та досвідом їх впровадження. У результаті відбувається інтеграція ESG-принципів у діяльність субпідрядників і формування синергійних ефектів, що сприяє підвищенню

¹⁹ Wong C. Y., Karia N. Explaining the competitive advantage of logistics service providers: A resource-based view approach. International Journal of Production Economics. – 2010. – Vol. 128, № 1. – P. 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.08.026>.

конкурентоспроможності як логістичного провайдера, так і всього ланцюга постачання в довгостроковій перспективі.

Таблиця 4

Застосування теорії переваги ресурсів у співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками в контексті ESG

| Тип ресурсу | Зміст ресурсу у логістичній діяльності | Прояви в контексті ESG | Роль співпраці логістичного провайдера із субпідрядниками |
|------------------------------------|---|--|---|
| Фізичні ресурси | Транспортні засоби, склади, логістична інфраструктура, обладнання | Енергоефективний транспорт, зниження викидів CO ₂ , оптимізація маршрутів, управління відходами | Провайдер задає екологічні вимоги до використання активів субпідрядниками та стимулює модернізацію інфраструктури |
| Інформаційні ресурси | ІТ-системи, цифрові платформи, системи моніторингу та звітності | ESG-звітність, відстеження викидів, контроль соціальних і екологічних показників | Спільні ІТ-рішення забезпечують прозорість ESG-показників і узгодженість дій у ланцюгу постачання |
| Знання та управлінські компетенції | Досвід управління ланцюгами постачання, стандарти, методики, | Впровадження ESG-політик, навчання персоналу, управління ризиками сталого розвитку | Співпраця виступає каналом передачі ESG-знань і управлінських практик від провайдера до субпідрядників |
| Людські ресурси | Кваліфікація персоналу, професійні навички, корпоративна культура | Охорона праці, соціальна відповідальність, дотримання етичних норм | Узгодження вимог до персоналу субпідрядників та спільні навчальні ініціативи підвищують соціальну складову ESG |
| Реляційні ресурси | Довгострокові партнерські відносини, довіра, репутація | Репутаційна стійкість, відповідальний вибір партнерів, ESG-ланцюги постачання | Тривала співпраця сприяє закріпленню ESG-практик і зменшенню опортуністичної поведінки |
| Репутаційний капітал | Імідж, бренд, довіра клієнтів та інвесторів | Позиціонування як сталого логістичного провайдера | Провайдер транслює власні ESG-цінності на субпідрядників, формуючи спільну репутацію ланцюга постачання |

Застосування зазначених теоретичних підходів дозволило сформуванати систему гіпотез, що відображають взаємозв'язок між ESG-практиками логістичного провайдера, рівнем співпраці із субпідрядниками, інтеграцією принципів сталого розвитку та конкурентоспроможністю ланцюга постачання.

G1: Екологічні ESG-практики логістичного провайдера позитивно впливають на рівень співпраці із субпідрядниками.

G2: Соціальні ESG-практики логістичного провайдера позитивно впливають на рівень співпраці із субпідрядниками.

G3: Управлінські ESG-практики логістичного провайдера позитивно впливають на рівень співпраці із субпідрядниками.

G4: Співпраця логістичного провайдера із субпідрядниками позитивно впливає на рівень інтеграції ESG-принципів у діяльність субпідрядників.

G5: Співпраця із субпідрядниками сприяє підвищенню сталості діяльності логістичного провайдера.

G6: Інтеграція ESG-принципів у діяльність субпідрядників сприяє формуванню довгострокових конкурентних переваг у ланцюгу постачання.

3. Методологія дослідження управління партнерськими відносинами в контексті ESG-інтеграції

Запропонований дизайн дослідження має на меті концептуально та емпірично обґрунтувати роль управління партнерськими відносинами в ланцюгу постачання як механізму інтеграції принципів ESG та підвищення загальної сталості діяльності логістичного провайдера.

Основними цілями дослідження є:

- визначення впливу ESG-орієнтованих управлінських практик логістичного провайдера на характер і глибину партнерської взаємодії з субпідрядниками у ланцюгу постачання.

- дослідження медіаційної ролі співпраці в ланцюгу постачання у трансформації ESG-практик логістичного провайдера в підвищення сталості та конкурентної спроможності партнерів.

- формування методологічної основи для оцінювання прямих і непрямих ефектів ESG-інтеграції через управління партнерськими відносинами.

Для досягнення поставлених цілей пропонується використання кількісного підходу на основі анкетного опитування представників компаній-партнерів логістичного провайдера. Об'єктом дослідження виступають організації, які перебувають у стабільних договірних відносинах з провайдером та залучені до виконання логістичних операцій або суміжних функцій.

Анкетування дозволяє:

- оцінити рівень впровадження ESG-практик з боку логістичного провайдера;
- дослідити сприйняття та інтенсивність партнерської взаємодії;
- проаналізувати вплив такої взаємодії на сталі виробничі та управлінські можливості партнерів.

До вибірки включаються субпідрядники, за умови наявності сталої та тісної співпраці з логістичним провайдером, що є необхідною передумовою для аналізу процесів інтеграції ESG-принципів у ланцюгу постачання.

Опитувальник формується з трьох логічно пов'язаних блоків:

Вступний блок. Опис мети дослідження, значущості теми ESG та очікуваних результатів. Респонденти отримують пояснення про конфіденційність даних і роль їхніх відповідей для підвищення ефективності та стійкості ланцюгів постачання.

Аналітичний блок. Оцінка практик сталого розвитку та співпраці з субпідрядниками. Респонденти оцінюють рівень впровадження екологічних, соціальних та управлінських практик у своїй компанії та у співпраці з партнерами. Оцінюється ефективність процесів контролю та підтримки ESG-практик у ланцюзі постачання, а також наявність конкурентних переваг завдяки впровадженню стійких рішень.

Для оцінки використовується 7-бальна шкала Лайкерта (1 = повністю не згоден, 7 = повністю згоден), що дозволяє кількісно порівнювати результати.

Профільний блок. Це більше про демографічну та організаційну інформація, а саме збір базових даних про компанію, роль респондента та масштаби діяльності у ланцюзі постачання.

Опитування надсилається обраній групі субпідрядників та партнерів логістичного провайдера через електронну пошту. Респондентів просять залучати колег із відділів логістики, управління ланцюгами постачання або корпоративної соціальної відповідальності. Для підвищення точності даних рекомендується, щоб малі компанії узгоджували відповідь колективно. Після збору даних для перевірки висунутих гіпотез пропонується використовувати моделювання структурними рівняннями, що дозволяє комплексно аналізувати взаємозв'язки між латентними змінними та оцінювати як прямі, так і опосередковані ефекти.

Для оцінювання ключових змінних дослідження розроблено набір вимірювальних шкал, спрямованих на відображення ESG-практик логістичного провайдера, характеру партнерської взаємодії із субпідрядниками та рівня інтеграції ESG-принципів у їхню операційну діяльність. Запропонований інструментарій сформовано з урахуванням

специфіки логістичних операцій і міжорганізаційної взаємодії в ланцюгах постачання. З огляду на концептуально-методологічний характер дослідження, зазначені шкали розглядаються як нові та такі, що потребують подальшої емпіричної перевірки й уточнення в майбутніх дослідженнях (табл. 5). Структура вимірювання передбачає багатовимірний підхід до оцінювання ESG-практик логістичного провайдера, який охоплює екологічний, соціальний та управлінський виміри. Такий підхід дозволяє комплексно аналізувати процеси ESG-інтеграції в межах партнерських відносин у ланцюгу постачання.

Рівень співпраці між логістичним провайдером і субпідрядниками вимірюється через індикатори інтенсивності обміну інформацією, спільного планування, координації операційних процесів і довгострокової орієнтації партнерських відносин. Додатково оцінюється рівень інтеграції ESG-принципів у діяльність субпідрядників, а також сформовані конкурентні переваги, які можуть бути отримані в результаті такої співпраці в ланцюгу постачання.

На рисунку 4 представлено узагальнену блок-схему методологічного підходу дослідження, яка відображає послідовність основних етапів та логіку переходу від теоретичного аналізу до емпіричної перевірки гіпотез. Схема ілюструє взаємозв'язок між аналізом літератури, розробкою інструментарію збору даних, формуванням вибірки та застосуванням кількісних методів аналізу.

Таблиця 5

Структуровані показники метрики

| Е | Екологічні практики |
|----|--|
| Е1 | Чи дотримується ваша організація чинних екологічних стандартів та вимог у сфері перевезень? |
| Е2 | Чи впроваджує або чи планує ваша організація систему екологічного управління транспортною діяльністю? |
| Е3 | Чи зменшує ваша організація використання небезпечних або токсичних матеріалів? |
| Е4 | Чи вживає ваша організація заходів для зменшення споживання невідновлюваної енергії? |
| Е5 | Чи підтримує ваша організація використання екологічних логістичних рішень (зелена упаковка, оптимізація завантаження)? |
| Е6 | Чи співпрацює ваша організація зі спеціалізованими компаніями з переробки матеріалів (шини, мастила)? |
| Е7 | Чи використовує ваша організація системи переробки або утилізації відходів? |
| Е8 | Чи вживає ваша організація заходів для зменшення ризику екологічних аварій та інцидентів? |

Продовження таблиці 5

| | |
|----------|--|
| S | Соціальні практики |
| S1 | Чи приділяє ваша організація увагу формуванню позитивного іміджу відповідального логістичного партнера? |
| S2 | Чи сприяє ваша організація створенню робочих місць для місцевого населення? |
| S3 | Чи дотримується ваша організація прав людини та трудових прав працівників (зокрема водіїв)? |
| S4 | Чи забезпечує ваша організація безпечні та здорові умови праці для персоналу? |
| S5 | Чи перевищує рівень оплати праці у вашій організації законодавчо встановлений мінімум? |
| S6 | Чи надає ваша організація можливості навчання, підвищення кваліфікації або кар'єрного розвитку? |
| G | Управлінські практики |
| G1 | Чи інтегрує ваша організація принципи сталого розвитку у стратегічні управлінські рішення? |
| G2 | Чи має ваша організація довгострокові партнерські відносини у ланцюгу постачання, що базуються на принципах сталості? |
| G3 | Чи забезпечує ваша організація прозорість у формуванні тарифів та умов співпраці з партнерами? |
| G4 | Чи враховує ваша організація екологічні та соціальні витрати під час прийняття управлінських рішень? |
| G5 | Чи є ваша організація гнучкою в управлінні логістичними процесами з урахуванням принципів сталого розвитку? |
| G6 | Чи планує або здійснює ваша організація інвестиції у сталі технології та інновації? |
| G7 | Чи використовує ваша організація цифрові або управлінські інструменти для підвищення сталості ланцюга постачання? |
| G8 | Чи забезпечує система управління вашої організації стабільність та надійність логістичних операцій у довгостроковій перспективі? |
| G+S | Співпраця з логістичним провайдером у сфері сталого розвитку |
| G+S1 | Чи заохочує логістичний провайдер вашу організацію до впровадження практик сталого розвитку? |
| G+S2 | Чи надає логістичний провайдер вашій організації інформацію та рекомендації щодо ініціатив сталого розвитку? |
| G+S3 | Чи залучає логістичний провайдер вашу організацію до формування спільних цілей сталого розвитку? |
| G+S4 | Чи співпрацює логістичний провайдер з вашою організацією у впровадженні сталих управлінських практик? |
| G+S5 | Чи оцінює логістичний провайдер разом з вашою організацією результати впровадження сталих практик? |
| E+S | Сталі операційні практики субпідрядника |
| E+S1 | Чи використовує ваша організація матеріали, які підлягають повторному використанню або переробці? |

Продовження таблиці 5

| | |
|------|--|
| E+S2 | Чи застосовує ваша організація екологічно безпечні матеріали та ресурси у своїй діяльності? |
| E+S3 | Чи переглядає ваша організація операційні процеси відповідно до екологічних стандартів? |
| E+S4 | Чи забезпечує ваша організація дотримання норм охорони праці та безпеки? |
| E+S5 | Чи бере ваша організація участь у соціальних ініціативах або підтримці місцевих громад? |
| E+S6 | Чи надає ваша організація можливості кар'єрного розвитку та безперервного навчання? |
| R | Конкурентні переваги |
| R1 | Чи забезпечує ваша організація економічно обґрунтовані тарифи на транспортні послуги порівняно з конкурентами? |
| R2 | Чи забезпечує ваша організація вищу якість транспортних послуг порівняно з конкурентами? |
| R3 | Чи є ваша організація більш екологічно відповідальною порівняно з конкурентами? |
| R4 | Чи є транспортні послуги вашої організації більш надійними з точки зору доставки? |
| R5 | Чи впроваджує ваша організація інноваційні рішення швидше, ніж конкуренти? |

Такий підхід забезпечує системне дослідження ролі управління партнерськими відносинами у процесах інтеграції ESG-принципів та формування стійких конкурентних переваг у ланцюгу постачання.

З метою підвищення мотивації респондентів та рівня їх участі в опитуванні передбачено застосування комплексу стимулювальних заходів, зокрема надання учасникам доступу до узагальнених результатів дослідження, можливість отримання невеликих грошових або нематеріальних заохочень, а також акцентування уваги на тому, що їхня участь сприятиме розвитку та поширенню ESG-практик у межах партнерської мережі логістичного провайдера.

Додатково в процесі збору даних забезпечується дотримання етичних принципів емпіричних досліджень, зокрема добровільність участі, анонімність відповідей та конфіденційність отриманої інформації. Респондентам надається чітке роз'яснення щодо наукового характеру дослідження та використання зібраних даних виключно в узагальненому вигляді, що знижує ризик стратегічних або упереджених відповідей.

Застосування зазначених процедур спрямоване на підвищення якості первинних даних, мінімізацію систематичних викривлень та зменшення впливу загальної методичної похибки, характерної для самозвітних опитувань у сфері оцінки ESG-практик. У сукупності ці заходи створюють

передумови для отримання надійних і валідних емпіричних результатів, необхідних для подальшого кількісного аналізу взаємозв'язків у межах партнерських відносин ланцюга постачання.

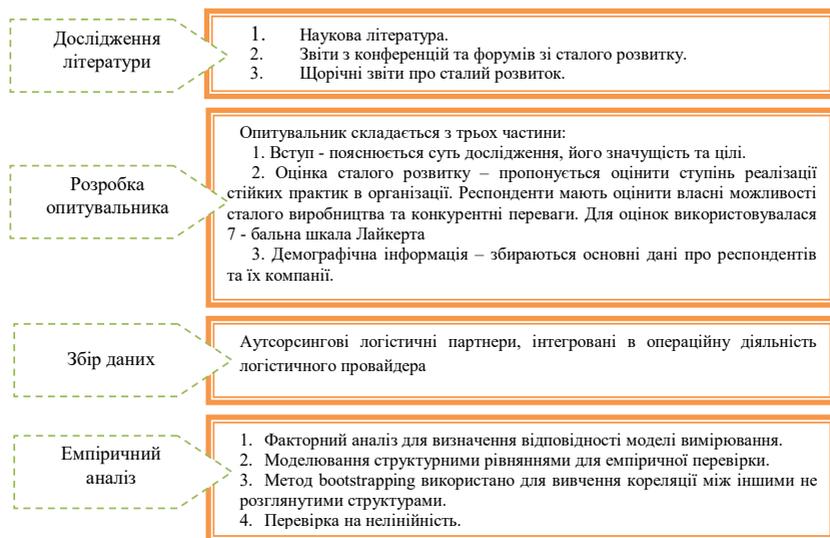


Рис. 4. Алгоритм методологічного підходу

Для підвищення достовірності самозвітних даних у анкетуванні доцільно використовувати текстові нагадування, які закликають респондентів давати щирі відповіді та усувають тиск соціально бажаних відповідей. Наприклад, формулювання на кшталт «Будь ласка, відповідайте чесно, немає правильних або неправильних відповідей» сприяє більш об'єктивній оцінці ESG-практик субпідрядників, підвищуючи валідність отриманих результатів та зменшуючи систематичні викривлення, пов'язані з прагненням відповідати очікуванням дослідника.

Для перевірки наявності загальної методичної похибки застосовується дослідний факторний аналіз, який дозволяє оцінити, чи впливають систематичні викривлення на результати опитування²⁰. Для цього всі змінні анкети об'єднуються у матрицю X розміром $n \times p$, де n – кількість респондентів, p – кількість змінних. Далі виконується одномірний факторний аналіз за моделлю:

²⁰ Podsakoff P. M., MacKenzie S. B., Lee J. Y., Podsakoff N. P. Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*. 2003. Vol. 88, No. 5. P. 879–903.

$$X = F\Lambda' + \varepsilon, \quad (1)$$

де F – матриця факторних навантажень, Λ – матриця коефіцієнтів, ε – матриця залишкових значень.

Якщо перший фактор пояснює значну частину загальної дисперсії (наприклад, понад 50%), це свідчить про можливу наявність загальної методичної похибки. У разі, якщо перший фактор пояснює невелику частину дисперсії, ризик систематичного зміщення через використання самозвітних даних вважається низьким, що підтверджує валідність отриманих результатів²¹.

Для оцінки можливого упередження через нереспондентів дані розділяються на дві групи – ранніх та пізніх респондентів – відповідно до дати заповнення анкети. Для кожної змінної проводиться t-тест для незалежних вибірок за формулою:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}, \quad (2)$$

де \bar{X}_1 та \bar{X}_2 – середні значення змінної у групах ранніх та пізніх респондентів відповідно, s_1^2 та s_2^2 – дисперсії змінної в обох групах, n_1 та n_2 – кількість респондентів у кожній групі. Відсутність статистично значущих відмінностей ($p > 0,05$) свідчить про низьку ймовірність упередження через нереспондентів і підтверджує репрезентативність зібраних даних²².

Для перевірки висунутих гіпотез та оцінки взаємозв'язків між ESG-практиками логістичного провайдера і субпідрядників у ланцюзі постачання застосовується комплексний статистичний підхід. Аналіз включає кілька рівнів: первинне дослідження кореляцій між показниками, оцінку впливу через регресійні моделі, перевірку надійності та стабільності результатів за допомогою бутстреп-методу, а також побудову багатовимірних моделей структурних рівнянь для моделювання прямих та опосередкованих ефектів. Такий підхід дозволяє не лише кількісно оцінити силу і напрямок взаємозв'язків між змінними, але й врахувати складні механізми передачі ESG-принципів від провайдера до субпідрядників, а також перевірити роль партнерської взаємодії у формуванні конкурентних переваг в ланцюзі постачання.

²¹ Harman H. H. Modern factor analysis. Chicago : University of Chicago Press, 1976. 487 p.

²² Armstrong J. S., Overton T. S. Estimating nonresponse bias in mail surveys . Journal of Marketing Research. 1977. Vol. 14, No. 3. P. 396–402. DOI: 10.2307/3150783

Кореляційний аналіз. Для оцінки взаємозв'язку між ESG-практиками логістичного провайдера (X) та субпідрядників (Y) застосовується коефіцієнт кореляції Пірсона:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3)$$

де X_i та Y_i – значення показників ESG відповідно для логістичного провайдера та субпідрядника у i -го респондента, \bar{X} та \bar{Y} – середні значення змінних. Кореляційний аналіз дозволяє визначити силу та напрямок лінійного зв'язку між змінними²³. Високе позитивне значення r_{XY} свідчить про узгодженість практик провайдера і субпідрядників, що може бути ознакою перенесення ESG-принципів через партнерські взаємодії.

Регресійний аналіз використовується для оцінки впливу ESG-практик провайдера на ESG-практики субпідрядників:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, \quad (4)$$

де Y_i – показник ESG у субпідрядника, X_i – показник ESG логістичного провайдера, β_0 – перехоплення, β_1 – коефіцієнт впливу, ε_i – випадкова похибка.

За потреби у модель можна включати контрольні змінні Z_i (наприклад, розмір компанії, галузь, географія):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Z_i + \varepsilon_i, \quad (5)$$

Регресійний аналіз дозволяє кількісно оцінити прямий вплив ESG-практик провайдера, а також ізолювати цей ефект від зовнішніх факторів.

Бутстрепінг використовується для оцінки надійності результатів та формування інтервалів довіри²⁴:

1. Генерується B вибірок з повторенням з оригінальної вибірки;

2. Для кожної вибірки обчислюється коефіцієнт $\hat{\beta}_1^{(b)}$.

Інтервал довіри 95% формується як:

²³ Hair J. F., Black W. C., Babin B. J., Anderson R. E. Multivariate data analysis. 8th ed. Boston : Cengage Learning, 2019. 832 p.

²⁴ Efron B., Tibshirani R. J. An introduction to the bootstrap. New York : Chapman & Hall, 1993. 436 p. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>

$$\left[\text{percentile}_{2,5\%} \left(\hat{\beta}_1^{(b)} \right), \text{percentile}_{97,5\%} \left(\hat{\beta}_1^{(b)} \right) \right], \quad (6)$$

Цей метод дозволяє оцінити стабільність результатів без суворих припущень про розподіл даних, що особливо важливо при обмеженому розмірі вибірки.

Для аналізу складних взаємозв'язків між кількома показниками ESG-практик провайдера та субпідрядників застосовується моделювання структурними рівняннями²⁵:

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta, \quad (7)$$

де η – латентні змінні, що відображають ESG-практики субпідрядників, ξ – латентні змінні ESG-практик логістичного провайдера, B – матриця внутрішніх зв'язків між латентними змінними субпідрядників, Γ – матриця зовнішніх впливів від змінних провайдера, ζ – похибки.

Моделювання структурними рівняннями дозволяє одночасно перевіряти прямі та опосередковані ефекти, а також враховувати взаємодію багатьох змінних. Це дає змогу оцінити, як ESG-практики провайдера через партнерську взаємодію впливають на інтеграцію ESG-принципів у діяльність субпідрядників та формування їх конкурентних переваг.

Поєднання кількісного анкетного опитування, багатовимірного вимірювання ESG-практик, процедур контролю методичних викривлень та сучасних методів статистичного аналізу дозволяє не лише ідентифікувати прямі впливи ESG-орієнтованих практик логістичного провайдера, але й розкрити опосередковані ефекти через партнерську взаємодію із субпідрядниками. Запропонована методологія створює емпіричну основу для перевірки висунутих гіпотез та формує аналітичні передумови для обґрунтування управлінських рішень, спрямованих на підвищення сталості та конкурентоспроможності ланцюгів постачання.

ВИСНОВКИ

Зі зростанням уваги до звітності зі сталого розвитку акцент поступово переноситься з внутрішньої діяльності логістичного провайдера на сталість усього ланцюга постачання. У цьому контексті питання інтеграції ESG-принципів дедалі частіше пов'язуються не лише з операційними практиками самого провайдера, а й з характером його взаємодії з партнерами

²⁵ Hair J. F., Hult G. T. M., Ringle C. M., Sarstedt M. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). 3rd ed. Thousand Oaks : Sage Publications, 2022. 384 p.

та субпідрядниками, які безпосередньо залучені до виконання логістичних процесів. Для країн з перехідною економікою, зокрема України, ці процеси ускладнюються незавершеністю нормативно-правового регулювання та поступовим наближенням до європейських підходів у сфері нефінансової звітності та сталого розвитку.

Проведений у роботі аналіз сучасних підходів до сталого управління, ESG-стратегій та практик нефінансової звітності дозволив розглядати логістичного провайдера як потенційного координатора процесів ESG-інтеграції в межах ланцюга постачання. Через управління партнерськими відносинами, формування вимог до співпраці, рекомендацій та інструментів взаємодії з субпідрядниками логістичний провайдер здатен впливати на поширення сталих практик у ширшій мережі створення вартості та сприяти підвищенню загального рівня ESG-зрілості логістичних ланцюгів.

Теоретичне підґрунтя дослідження, сформоване на основі теорії непередбачених обставин, теорії дифузії інновацій та теорії переваги ресурсів, дозволило інтерпретувати ESG-інтеграцію як процес адаптації до зовнішніх викликів, поступового поширення управлінських і операційних практик через партнерську взаємодію, а також як потенційне джерело формування довгострокових конкурентних переваг у ланцюгу постачання. Запропонована концептуальна модель і система гіпотез відображають можливі взаємозв'язки між ESG-практиками логістичного провайдера, рівнем співпраці із субпідрядниками, інтеграцією ESG-принципів у їхню діяльність та формуванням конкурентних переваг.

У роботі також запропоновано прикладну методичку, за допомогою якої логістичний провайдер може оцінити рівень співпраці з партнерами, їх готовність до впровадження ESG-принципів та можливості подальшої інтеграції сталих практик у ланцюгу постачання. Методика базується на використанні системи показників та кількісних інструментів аналізу, що забезпечує можливість її практичного застосування в управлінні партнерськими відносинами.

Водночас у сучасних умовах функціонування економіки України процеси інтеграції ESG-принципів у діяльність логістичних провайдерів та їхніх партнерів суттєво ускладнюються впливом повномасштабної війни, високим рівнем економічної невизначеності, обмеженим доступом до фінансових ресурсів і недостатньою практичною обізнаністю бізнесу щодо змісту сталого розвитку. Особливо відчутними ці обмеження є на рівні субпідрядників, переважно малих і середніх підприємств, для яких впровадження ESG-практик часто сприймається як додаткове навантаження, не пов'язане безпосередньо з поточними операційними потребами.

За таких умов застосування жорстких регуляторних або контрольних механізмів ESG-інтеграції є обмежено ефективним і може створювати ризики для стабільності партнерських відносин у ланцюгу постачання. Натомість актуалізується необхідність використання більш гнучких, «лагідних» механізмів залучення субпідрядників до процесів сталого розвитку, орієнтованих на мотивацію, підтримку та поступову адаптацію їхньої діяльності до базових ESG-принципів з урахуванням реальних ресурсних можливостей.

Таким чином, управління партнерськими відносинами логістичного провайдера доцільно розглядати не лише як інструмент контролю, а передусім як механізм зацікавлення та поетапного залучення субпідрядників до спільного досягнення цілей сталого розвитку. Саме такий підхід дозволяє поєднати стратегічні вимоги до ESG-зрілості великих логістичних компаній із практичними обмеженнями функціонування малого та середнього бізнесу в умовах трансформаційної економіки України, що визначає актуальність і практичну спрямованість даного дослідження.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено управління партнерськими відносинами в ланцюгу постачання як інструмент інтеграції принципів ESG та підвищення сталості діяльності логістичного провайдера. Обґрунтовано, що в умовах посилення регуляторних вимог, зростання очікувань інвесторів і клієнтів, а також функціонування логістичних компаній у середовищі перехідної економіки ефективність ESG-стратегії значною мірою залежить від рівня взаємодії з партнерами і субпідрядниками.

Теоретичне підґрунтя дослідження сформовано на основі поєднання теорії непередбачених обставин, теорії дифузії інновацій та теорії переваги ресурсів, що дозволяє пояснити особливості поширення сталих практик у ланцюгах постачання. Запропоновано концептуальну модель та систему гіпотез, які відображають взаємозв'язок між ESG-практиками логістичного провайдера, рівнем співпраці із субпідрядниками та потенційним формуванням конкурентних переваг.

У межах дослідження також запропоновано анкетне опитування як прикладний інструмент для оцінки рівня співпраці з партнерами та їх готовності до впровадження ESG-принципів. Отримані результати можуть бути використані як аналітична основа для формування управлінських рішень, спрямованих на поступове залучення партнерів і субпідрядників до реалізації принципів сталого розвитку в логістичних ланцюгах постачання.

Література

1. Huseynova N. Transition to sustainable development and green economy. *Modern Knowledge: Research and Discoveries: proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (July 19–20, 2024)*. Vancouver, 2024. P. 47–54. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/2709-4685/article/view/6689/6727>
2. Cassani L., Gomez-Zavaglia A. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Art. 829061. DOI: 10.3389/fnut.2022.829061.
3. Kelly L. History of sustainability reporting. *Energy Elephant*. 2022. URL: <https://blog.energyelephant.com/history-of-sustainability-reporting/>
4. Meutia I., Yaacob Z., Kartasari S. F. Sustainability reporting: an overview of the recent development. *Accounting and Financial Control*. 2020. Vol. 3, No. 1. P. 23–39. DOI: [http://dx.doi.org/10.21511/afc.03\(1\).2020.03](http://dx.doi.org/10.21511/afc.03(1).2020.03).
5. Галак І. І., Добровольська А. М., Добровольський О. С., Овчар Д. О. Підходи до впровадження сталих практик у діяльність логістичного провайдера. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 116. С. 183–206. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtdorogi_i_stroitelstvo/116.2/278.pdf
6. Sustainability ratings. URL: <https://www.dsv.com/en/our-reporting>
7. Тюріна А. А., Грищенко А. О. ESG як нова парадигма оцінки інвестиційної привабливості сільськогосподарських підприємств // *Агросвіт*. 2025. № 14. С. 160–169. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.14.160>.
8. Report on corporate governance. URL: <https://www.dsv.com/en/governance-reports>
9. Siems E., Seuring S., Schilling L. Stakeholder roles in sustainable supply chain management: a literature review. *Journal of Business Economics*. 2023. Vol. 93. P. 747–775. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11573-022-01117-5>.
10. Воркут Т. А., Галак І. І., Петунін А. В., Харута В. С. Управління портфелями реалізації логістичних стратегій в мережах організацій ланцюгів постачань : монографія. Київ : Міленіум, 2020. 210 с.
11. Галак І. І., Гець І. М. Інтеграція сталого розвитку та логістики в контексті управління та обслуговування матеріального потоку. *Україна 2025: виклики та перспективи сталого розвитку: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (23 жовтня 2025 р., м. Київ)*. Київ, 2025. С. 207–210. URL: https://e-u.edu.ua/userfiles/files/135/zbirnik_konferencii-_stalogo_rozvitku_23-10-2025_-1.pdf

12. Badovska S. Sustainability-related disclosures in Ukraine: what businesses should expect soon. *Ukrainian Journal of Business Law*. 2022. URL: <https://www.ujbl.info/article.php?id=1542> (дата звернення: 09.01.2025).

13. Уряд схвалив зміни до Закону про бухгалтерський облік: що зміниться для бізнесу. 2025. URL: https://www.mof.gov.ua/uk/news/uriad_skhvaliv_zmini_do_zakonu_pro_bukhgalterskii_oblik_shcho_zminitsia_dlia_biznesu-5212 (дата звернення: 10.01.2025).

14. Галак І., Косинський Д. Інтеграція принципів сталого розвитку в управління ланцюгом постачання у логістичних провайдерів. *Modern Perspectives on Global Scientific Solutions*: матеріали 1-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (7–9 жовтня 2024 р., Берген, Норвегія). 2024. С. 75–85.

15. Нопка М., Kovtun O. Features of implementation of ESG management criteria in Ukrainian agriculture in the context of global challenges and EU integration. *Economics and Business Management*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 87–99. DOI: <https://doi.org/10.31548/economics/3.2024.87>.

16. Buttermann G., Germain R., Iyer K. N. S. Contingency theory “fit” as gestalt: an application to supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2008. Vol. 44, No. 6. P. 955–969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.05.012>.

17. Bilonoh O., Sopotsko O., Fartuchnyi V. The role of road transport enterprises in sustainable logistics. *Economics for Ecology* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference (Sumy, June 13–14, 2025). Sumy, 2025. P. 34–35. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17036242>.

18. Овчар Д. О. Ключові аспекти управління персоналом водіїв у підприємствах логістичних провайдерів в умовах економічної нестабільності та кризових ситуацій. *Дороги і мости*. 2025. Вип. 31. С. 292–304. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.292>.

19. Aiztrauta D., Ginters E., Piera Eroles M.-A. Applying theory of diffusion of innovations to evaluate technology acceptance and sustainability. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 43. P. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.12.010>.

20. Wong C. Y., Karia N. Explaining the competitive advantage of logistics service providers: a resource-based view approach. *International Journal of Production Economics*. 2010. Vol. 128, No. 1. P. 51–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.08.026>.

21. Podsakoff P. M., MacKenzie S. B., Lee J. Y., Podsakoff N. P. Common method biases in behavioral research: a critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*. 2003. Vol. 88, No. 5. P. 879–903.

22. Harman H. H. Modern factor analysis. Chicago: University of Chicago Press, 1976. 487 p.

23. Armstrong J. S., Overton T. S. Estimating nonresponse bias in mail surveys. *Journal of Marketing Research*. 1977. Vol. 14, No. 3. P. 396–402. DOI: 10.2307/3150783.

24. Hair J. F., Black W. C., Babin B. J., Anderson R. E. Multivariate data analysis. 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2019. 832 p.

25. Efron B., Tibshirani R. J. An introduction to the bootstrap. New York: Chapman & Hall, 1993. 436 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429246593>.

26. Hair J. F., Hult G. T. M., Ringle C. M., Sarstedt M. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). 3rd ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2022. 384 p.

Information about the author:

Halak Iryna Ivanivna,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor at the Department of Logistics

and Project Management,

National Transport University,

1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., Kyiv, 02000, Ukraine

**СКОРОЧЕННЯ ВАРТОСТІ ЖИТТЕВОГО
ЦИКЛУ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ
ЗАЛІЗНИЦЬ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ
У ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНЕ ВИРОБНИЦТВО
АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Каращук В. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-12>

ВСТУП

Експлуатація тягового рухомого складу залізниць сприяє не лише ефективному перевізному процесу але водночас супроводжується поступовим зносом основних фондів. Утримання локомотивів у справному стані, операції технічного обслуговування, поточних та капітальних ремонтів є невід’ємною частиною транспортного виробництва, як галузі, та складають значну частку вартості їх життєвого циклу. На сьогоднішній день транспортна галузь України стикнулася з низкою серйозних проблем що стосуються стану транспортної інфраструктури. Значна застарілість рухомого складу, низькі темпи оновлення парку локомотивів, недостатність фінансування, незадовільний стан рейкової колії створюють загрозу безпеці процесу перевезень вантажів та пасажирів. Наприклад, загальний парк вантажних вагонів в середньому має ступінь зносу понад 90%, середній відсоток зносу парку локомотивів перевищує 95%¹. Станом на 31.12.2020 знос моторвагонного рухомого складу у приміському сполученні становить по електропоїздах – 90,06%; дизель-поїздах – 97,40%, рейкових автобусах – 28,50%. Понад подовженого терміну служби (більше 50 років) експлуатується 262 секції, або 54 состави (43,9%), електропоїздів постійного струму; 28 секцій, або 7 составів (6,1%), електропоїздів змінного струму та (понад 40 років) 47 секцій, або 24 состави (32,0%), дизель-поїздів².

¹ Свириденко Ю. Щодо розвитку залізничної галузі та її впливу на економічне зростання. URL: https://cfts.org.ua/blogs/schodo_rozvitku_zaliznichno_galuzi_ta_vpplivu_na_ekonomichne_zrostannya_561

² Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20Ukr.pdf>

Локомотивні господарства залізниць відчувають гостру потребу у запасних частинах, нових підходах та технологіях ремонту. Застарілість тягового рухомого складу викликає специфічні проблеми для ремонтних підрозділів щодо нестачі та замовлення запасних частин. За даними УЗ за 2020 рік заплановано витрати 2851 млн. грн. на закупівлю запасних частин, фактично освоєно 1746 млн. грн., що складає 61% від плану.

Найчастіше запасні частини потребують локомотиви, яким 30-60 років від побудови, крім того в Україні тяговий рухомий склад був побудований ще за радянських часів, велика частка маневрових тепловозів та електровозів, електро та дизель-поїздів поставлялися з-за кордону. Відповідно придбання запасних частин та вузлів для тягового рухомого складу часто ускладнено через неможливість замовлення їх з-за кордону, зняття з виробництва, припинення діяльності виробників залізничної техніки, високої вартості деталей внаслідок виготовлення за традиційними технологіями, тривалого часу поставки запасних частин, оптові закупки деталей до того ж потребують значних інвестицій. Тривалий простій тягового рухомого складу в очікуванні ремонту призведе до великих фінансових втрат.

Все вищезначене потребує пошуку нових способів виробництва застарілих запасних частин швидшим та дешевим способом. Однією з таких технологій стає 3D-друк. Ця технологія виробництва спирається на цифрові робочі процеси та не вимагає додаткових інструментів, таких як прес-форми, для створення деталі. Відповідно до звіту EY (Ernst & Young Global Limited), 16% компаній логістичної та транспортної галузі використовують 3D-друк для виробництва запасних частин³.

1. Використання адитивних технологій світовими компаніями для залізничної галузі

Як відомо, адитивні технології (англ. Additive Manufacturing) це технології пошарового нарощування та синтезу об'єктів. Інша назва – 3D-друк, що відноситься до групи технологічних методів виробництва виробів і прототипів, заснованих на поетапному формуванні виробу шляхом додавання матеріалу на основу.

Провідні залізничні компанії почали поступове використання адитивних технологій для друку запасних частин, деталей, елементів інфраструктури.

Так залізничний центр – центр обслуговування залізничних перевезень Siemens Mobility RRX, розташований у Дортмунд-Евінгу,

³ Krzyżanowski J. 3D printing in the Rail Industry. URL: <https://omni3d.com/3d-printing-in-the-rail-industry/>.

Німеччина, використовує 3D-принтер Stratasys Fortus 450mc Production для виготовлення інструментів та запасних частин на вимогу. За даними Siemens Mobility, підрозділу Siemens, час виготовлення деталей скорочено приблизно на 95 відсотків. У Siemens Mobility зазначили, що залізничний центр щомісяця прийматиме в депо близько 100 поїздів. Адитивне виробництво дозволяє Siemens Mobility бути більш ефективним із запасними частинами. Як правило, компанія покладалася на лиття та традиційні методи, що займало близько 6 тижнів для виготовлення спеціальної деталі. Завдяки обладнанню Stratasys Siemens Mobility може виготовити деталі за 13 годин⁴.

Siemens Mobility впровадила 3D-друк у сервісному центрі RRR Rail Service Centre для виробництва складних інструментів та запасних частин. Наприклад, було надруковано з'єднувальний інструмент, який використовується при обслуговуванні візка поїзда (рис.1).



Рис. 1. Інструмент для візка, виготовлений методом 3D-друку

Його досить складно виготовити традиційними методами, оскільки інструмент має складну форму, що вимагає високого ступеня індивідуального налаштування.

Компанія Deutsche Bahn надрукувала на 3D-принтері кришку підшипника колісної пари локомотива класу 294 (рис. 2).

Ця модель локомотиву була введена в експлуатацію в 1960-х і 1970-х роках, і запасні частини для деяких компонентів, таких як кришка, відсутні. Зазвичай деталь доводилося замовляти для виготовлення шляхом лиття. Однак цей метод зазвичай передбачає високі мінімальні обсяги закупівлі, і доставка деталі може тривати кілька місяців. Деталь була виготовлена

⁴ Dignan L. Siemens Mobility's rail service center bets on 3D printing. URL: <https://www.zdnet.com/article/siemens-mobilitys-rail-service-center-bets-on-3d-printing/>

методом 3D-друку з використанням технології адитивного виробництва з дуговим дротом Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) вага її складає 13 кг час друку 7 годин.



Рис. 2. Кришка підшипника колісної пари, надрукована на 3D-принтері за технологією WAAM

Компанія з оренди рухомого складу Angel Trains уклала партнерську угоду зі Stratasys, прагнучи роздрукувати на 3D-принтері компоненти інтер'єру поїзда, такі як підлокітники, поручні та столики у спинках сидінь (рис. 3). Компанія використовує технологію Stratasys FDM у поєднанні з високотемпературним термопластиком ULTEM 9085 для 3D-друку запасних частин. Стверджується, що нитка сумісна зі стандартами залізничної галузі (зокрема, залізничним стандартом EN45545-2) і має більшу вогнестійкість і довговічність, ніж традиційні термопласти⁵.



Рис. 3. Деталі, надруковані на 3D-принтері FDM (зліва направо): кришки електричних з'єднань, підлокітник з поручнями та стіл у спинці сидіння

⁵ Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry. URL: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>

German Rail (DB) вперше розпочала створення запчастин за допомогою 3D-принтера з металу, скорочуючи терміни доставки та простої транспортних засобів. Принтер зварює тонкі нитки дроту з нержавіючої сталі, накладаючи їх шарами, щоб створити такі елементи, як кришки букс, які важко знайти, а доставка може зайняти до 24 місяців⁶. Загалом, тепер DB може виробляти понад 120 різних виробів, включаючи колеса вентиляторів, підголівники, корпуси, клемні коробки для захисту кабелів та ін. Приклади 3-D друку деталей наведено на рис. 4-5.



Рис. 4. Знак поручня зі шрифтом Брайля



Рис. 5. Роздруковані на 3D-принтері лопасті турбіни (ліворуч) і кришка підшипника колісної пари (праворуч)

Mobility got Additive (MGA), мережа, що займається вивченням впровадження AM у секторі мобільності та стимулюванням індустріалізації, оголосила про затвердження першого компонента, виготовленого методом адитивних технологій, що забезпечує безпеку

⁶ DB begins 3D printing metal parts. URL: <https://www.railjournal.com/technology/db-begins-3d-printing-metal-parts/>

для залізничної галузі. Розглянута деталь, ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро (рис.6), використовується вже компанією Hamburger Hochbahn AG, оператором транспортної системи в Гамбурзі, Німеччина.



Рис. 6. Ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро виготовлена за допомогою АМ

Робочу групу за затвердженням у рамках MGA очолює Siemens Mobility GmbH, до неї входять Deutsche Bahn AG, Fraunhofer IPT та IGCV, Hamburger Hochbahn AG, Knorr-Bremse System für Schienenfahrzeuge GmbH, Photon AG⁷.

Один із партнерів Stratasys у залізничній галузі, Bombardier Transportation застосовує адитивне виробництво. 3D-принтер Stratasys F900 встановлюється на найбільшому виробничому майданчику Bombardier Transportation у Хеннігсдорфі, Німеччина. Виробник планує використовувати цю технологію для 3D-друку внутрішніх та зовнішніх деталей поїзда, таких як повітропроводи, кожухи та тримачі кабелів, а також спеціалізованих рейкових інструментів для полегшення виробничого процесу. Запчастини насамперед задовольнятимуть специфічні виробничі потреби німецьких, швейцарських та австрійських залізничних та трамвайних компаній⁸.

З використанням технології 3-D друку була побудована вентиляційна система для прототипу поїзда з акумуляторним живленням. Деталь (рис. 7) була надрукована з ULTEM 9085, яка не тільки відповідала

⁷ Boissonneault T. First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/>

⁸ Bombardier Transportation adopts Stratasys F900 to 3D print end-use rail parts. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/bombardier-transportation-stratasys-f900-end-use-rail/>

вимогам сертифікації рейок EN45545-2, але й дозволила компанії істотно зменшити вагу деталі⁹.



Рис. 7. Компонент системи вентиляції, надрукований з використанням технології 3-D друку

Angel Trains, одна з провідних британських компаній з лізингу поїздів, лідер 3D-друку Stratasys (NASDAQ: SSYS), інженерно-консультаційна компанія DB ESG і оператор поїздів Chiltern Railways об'єднали зусилля, щоб випробувати перші 3D-друковані деталі, які були встановлені в пасажирському поїзді, що знаходиться в експлуатації у Великобританії. Ці частини включають чотири підлокітника для пасажирів і сім ручок, які були встановлені на поїздах Chiltern Railways (рис. 8).



Рис. 8. Деталі надруковані на 3-D принтері та встановлені у пасажирському поїзді

⁹ Boissonneault T. Stratasys focuses on 3D printing in transport with Rail Industry Solution. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/stratasys-focuses-on-3d-printing-in-transport-with-rail-industry-solution/>

DB ESG провела комплексне тестування низки матеріалів для 3D-друку промислового класу, щоб вперше забезпечити відповідність 3D-друкованих деталей стандарту залізничної промисловості Великобританії EN45545-2. Остаточні частини були надруковані на 3D-друку за допомогою 3D-принтера Fortus 450mc на базі FDM від Stratasys на смолі ULTEM™ 9085, яка була сертифікована для залізничної промисловості відповідно вимогам до стандартів пожежної, димної та токсичної безпеки¹⁰.

Інститут залізничних досліджень Університету Хаддерсфілда отримав фінансування для вивчення потенціалу нових матеріалів для використання в залізничних візках, які встановлюються під вагонами та з'єднують осі з поїздом. Проект є частиною загальноєвропейської програми RUN2RAIL та розпочнеться з дослідження композитів із вуглецевого волокна, які дозволять роботам створювати рами візків пошарово. Основними перевагами нового матеріалу є зменшення ваги, простота конструкції та менші витрати на технічне обслуговування¹¹.

Alstom, світовий лідер у сфері екологічної та розумної мобільності, скорочує терміни доставки запчастин з 45 днів до 48 годин за допомогою 3D-принтерів F370. Алжирська компанія Sétif Tramways виявила, що трамвайні фари розбиваються через скупчення води та каміння, що потрапляють у невеликі отвори під час руху. В результаті до Alstom звернулися із терміновим запитом запасних частин, щоб герметизувати отвори та запобігти подальшому пошкодженню трамваїв. За допомогою спеціального внутрішнього центру 3D-друку компанія Alstom розгорнула свій 3D-принтер Stratasys F370 на основі технології FDM® для створення гумового дренажу та герметизації отворів у фарах трамваїв. Для друку використовувався передовий високоміцний еластомірний матеріал FDM TPU 92A. Поєднуючи гнучкість і розтяг із стійкістю до стирання та розриву, цей еластомірний матеріал ідеально підходить для тривалого використання поза приміщеннями, оскільки деталі працюють і досі. Таким чином, скоротився термін виготовлення деталей за традиційною технологією протягом 45 днів до 48 годин¹².

¹⁰ Angel trains, DB ESG and Stratasys trial the UK's first 3d printed parts on passenger trains. URL: <https://railway-international.com/news/21446-angel-trains.-db-esg-and-stratasys-trial-the-uk%E2%80%99s-first-3d-printed-parts-on-passenger-trains>

¹¹ Carbon fibre and 3D printing could make trains quieter and more comfortable. URL: <https://www.imeche.org/news-article/carbon-fibre-and-3d-printing-will-make-railways-quieter-and-more-comfortable>

¹² Alstom leverages Stratasys FDM 3D printing to create emergency spare parts and minimize downtime of sétif tramway network. URL: <https://railway-international.com/technical-articles/42721-alstom-leverages-stratasys-fdm-3d-printing-to-create-emergency-spare-parts-and-minimize-downtime-of-s%C3%A9tif-tramway-network>

З 2016 року асортимент деталей, виготовлених компанією Alstom за допомогою 3D-друку, постійно розширюється, та зараз компанія друкує близько 40000 деталей на рік. Друк відбувається такими матеріалами, як полімери, кераміка та метал. Використовуються 20 полімерів (в тому числі вогнетривкі та димозахисні – EN45545 для Європи та NFPA130 для Північної Америки) та чотири метали: алюміній, нержавіюча сталь, високоміцна сталь та титан¹³.

З проведеного аналізу можна зазначити, що наразі провідні залізничні компанії досліджують різні матеріали та технології для 3D друку з метою виготовлення запасних частин та елементів тягового рухомого складу залізниць та міського електротранспорту – трамваїв, з дотриманням вимог залізничних стандартів безпеки.

Впровадження технологій адитивного виробництва для залізничної галузі охоплює не лише друк запасних частин для парку локомотивів, вагонів та моторвагонного рухомого складу а і процеси оновлення і модернізації елементів інфраструктури залізниць.

Британська мережа високошвидкісних залізниць HS2, збирається запровадити 3D-друк залізобетону на місці. У проекті HS2 буде використовуватися новий бетонний матеріал, армований графеном, розроблений Британською інноваційною студією для 3D-друку бетону ChangeMaker 3D. Передова технологія під назвою «PrintInfrastructure» буде розгортатися лондонським підрядчиком HS2 Ltd у тунелях SCS JV (сумісне підприємство Skanska Costain STRABAG). Печать бетону за допомогою роботів, керованих комп'ютерів, дозволить створювати конструкції на місці. Використання керуючого комп'ютера робота дозволяє друкувати залізобетонні конструкції з унікальною внутрішньою ґратчастою структурою, яка не тільки значно зменшує кількість необхідної бетонної суміші, але й зменшує кількість відходів. Високотехнологічна інновація використовує процес тривимірного друку бетону і поєднує його з найміцнішим з будь-коли випробуваних матеріалів: графеном. Бетон з мікроскопічними нитками графену товщиною всього кілька атомів, що проходять через нього, як смуги в кам'яній брилі, замінює традиційну сталь, щоб підвищити безпеку на будівельному майданчику, підвищити гнучкість конструкції, скоротити час складання. Використання нового матеріалу дозволить скоротити обсяг використовуваного бетону та сприяти скороченню викидів вуглецю на 50%. За рахунок відмови від сталі та спрощення процесу будівництва, для якого більше не знадобляться крани

¹³ Harnessing 3D printing technology to deliver fast and sustainable rail parts URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2023/11/harnessing-3d-printing-technology-deliver-fast-and-sustainable-rail-parts>

та значно менше вантажівок для доставки, скорочення викидів вуглецю може бути ще більшим¹⁴.

Британська інфраструктурна компанія Amey вивчає використання адитивного виробництва для обслуговування транспортної галузі. На відміну від інших компаній, що використовують 3D-друк для виробництва запасних частин для поїздів та інструменту, Amey вивчає технологію обслуговування та оновлення залізничної колії. Компанія досліджує, як 3D-друк можна використовувати для оновлення рейок. Традиційно оновлення колій покладалося на ручну працю для видалення та заміни рейок. Однак за допомогою роботизованого 3D-друку цей процес можна автоматизувати.

Однією з найбільших перешкод на даний момент, яка уповільнює впровадження 3D-друку для обслуговування залізниць, є масштаб. Щоб вирішити цю проблему та розробити 3D-принтери, здатні друкувати до 5 метрів колії за раз, Amey працює над розробкою великомасштабної робототехніки з адитивними можливостями. Однією з областей, де, на думку компанії, 3D-друк може зробити найбільшу різницю – це ремонт або реконструкція стрілок і переїздів, які мають більше ознак зносу, ніж звичайні колії, і які є важливими для функціонування залізничної системи. Нинішній процес їх заміни полягає у видаленні старих перемикачів і перемикачів і заміні їх на нові – дорога та складна робота для координації. Цей процес також спричиняє перебої у використанні залізниці, оскільки ділянка колії має бути закрита під час заміни. Система 3D-друку на рейках на місці може значно спростити процес відновлення, що призведе до зниження витрат, швидшого часу заміни тощо. Технологія, яку розробляє Amey, поєднує метрологічні можливості для перевірки існуючої залізниці; автоматизованого зняття матеріалу для видалення зношеної поверхні; і система осадження для розміщення нової поверхні. Після цього 3D-друкована рейка буде перевірена за допомогою аналізу неруйнівного контролю¹⁵.

Наразі провідними компаніями світу та науковцями ведуться роботи щодо підвищення зносостійкості рейки та опору, для чого використовується спеціальна технологія адитивного виробництва лазерного плавлення, для створення покращеного шару на верхніх поверхнях рейок. Технологію 3-D друку використовують для виготовлення гвинтів для кріплення

¹⁴ Sher D. UK's new high speed rail HS2 looks to concrete 3D printing to cut CO2. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/londons-new-high-speed-rail-hs2-looks-to-concrete-3d-printing-to-cut-co2/>

¹⁵ Boissonneault T. Could 3D printing revolutionize the UK rail industry? URL: <https://www.3dprintingmedia.network/amey-could-3d-printing-revolutionize-the-uk-rail-industry/>

залізничної колії, тривимірних друкованих георешіток, звукових бар'єрів для залізниці, композитних опор для верхньої будови колії, часток «розумного» баласту та ін¹⁶.

2. Види та класифікація методів та матеріалів для 3-D друку

Адитивне виробництво – additive manufacturing – процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів із даних 3D-моделі, зазвичай пошарово, на відміну від субтрактивних методологій виробництва¹⁷.

Відповідно до стандарту ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, технології 3-D друку класифікують за технологією обробки на такі групи:

- *binder jetting* – струминне нанесення сполучного – адитивний процес виробництва, в якому рідкий сполучний агент вибірково наноситься для з'єднання порошкових матеріалів;

- *directed energy deposition* – спрямоване осадження енергії – адитивний процес, у якому для плавлення використовується сфокусована теплова енергія матеріалів шляхом плавлення в міру їх осадження;

- *material extrusion* – екструзія матеріалу – адитивний процес виробництва в якій матеріал вибірково подається через насадку або отвір;

- *material jetting* – струминна обробка матеріалу – процес адитивного виробництва в результаті якого краплі будівельного матеріалу вибірково осаджуються;

- *powder bed fusion* – плавлення у порошковому шарі – процес адитивного виробництва у результаті якого теплова енергія вибірково зплавляє дільниці порошкового шару;

- *powder bed fusion* – плавлення у порошковому шарі – адитивний процес виготовлення в якому листи матеріалу з'єднуються, щоб утворити об'єкт;

- *vat photopolymerization* – фотополімерізація у ванні – процес адитивного виробництва, при якому рідкий фотополімер у ванні вибірково затвердіває світлоактивною полімерізацією.

В процесі струминного нанесення сполучного (*Binder Jetting*) (рис. 9) використовується два матеріали: матеріал на основі порошку та сполучний.

¹⁶ Hao Fu, Sakdirat Kaewunruen. State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. J. Compos. Sci. 2022, 6(1), 7, <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>. URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/7>

¹⁷ ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. URL: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>

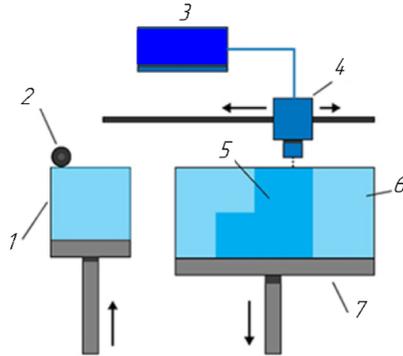


Рис. 9. Технологія 3-D друку методом струминного нанесення сполучного

1 – новий порошок, 2 – валик, 3 – рідкий сполучний матеріал, 4 – струменева друкувальна голівка, 5 – об’єкт (деталь), 6 – порошокове ложе; 7 – будівельна платформа

Сполучний матеріал (зазвичай рідкий) діє як клей між шарами порошку. Порошковий матеріал 1 наноситься по будівельній платформі 1 за допомогою валика 2. Друкувальна голівка 4 наносить сполучний клей 3 поверх порошку 6, де це необхідно. Будівельна платформа 7 опускається на товщину шару деталі 5.

Поверх попереднього шару наноситься ще один шар пудри. Об’єкт утворюється там, де порошок зв’язується з рідиною. Незв’язаний порошок залишається на місці навколо об’єкта. Процес повторюється до тих пір, поки не буде виготовлений весь об’єкт. Об’єкт, що друкується, самопідтримується в порошоківому шарі і після завершення видаляється з незв’язаного порошку.

Спрямоване осадження енергії (*Directed Energy Deposition*) це більш складний процес друку, який зазвичай використовується для ремонту або додавання додаткового матеріалу до існуючих компонентів. Типова машина DED складається з насадки, встановленої на багатівісському кронштейні, яка наносить розплавлений матеріал на задану поверхню, де він застигає (рис. 10).

Матеріал, який можна наносити під будь-яким кутом завдяки 4- і 5-осьовим машинам, розплавляється при осадженні за допомогою лазерного, електронного променя або плазмовою дугою, і все це в контрольованій камері, де в атмосфері знижений рівень кисню. 4- або 5-осевой важіль з насадкою 3 переміщується навколо нерухомого об’єкта 1.

Матеріал наноситься із сопла на наявні поверхні об'єкта. Матеріал подається у вигляді дроту 4 або порошку. Матеріал розплавляється за допомогою лазера, електронного променя 2 або плазмової дуги при осадженні. Подальший матеріал додається шар за шаром і застигає, створюючи або відновлюючи нові властивості матеріалу на існуючому об'єкті. Процес можна використовувати з полімерами, керамікою, але зазвичай використовується для металів у вигляді порошку або дроту.

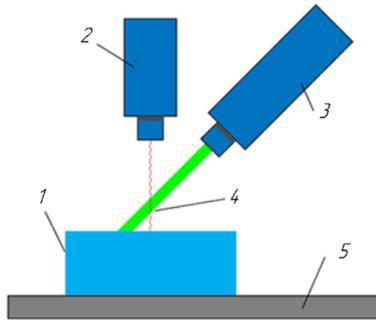


Рис. 10. Технологія 3-D друку методом спрямованого осадження енергії

1 – об'єкт (деталь), 2 – електронний промінь, 3 – подача матеріалу (металевого) дроту, 4 – металевий дріт, 5 – будівельна платформа

Моделювання методом наплавлення (рис. 11) (*Fuse Deposition Modelling*) це поширений процес екструзії матеріалів, зареєстрований під торговою маркою компанії Stratasys. Матеріал 2 протягується через сопло 4, де він нагрівається, а потім осаджується шар за шаром. Шари сплавляються разом при осадженні, оскільки матеріал перебуває у розплавленому стані. Сопло може рухатися горизонтально, а платформа 6 переміщається вгору та вниз вертикально після нанесення кожного нового шару.

Відмінність від інших методів полягає в тому, що матеріал подається через насадку під постійним тиском і безперервним потоком.

У процесі струминної обробки (*Material Jetting*) матеріал наноситься струменем на поверхню або платформу, де він застигає, і модель будується шар за шаром. Друкувальна голівка 3 розташована над платформою 9 для виготовлення (рис.12.).

Краплі матеріалу наносяться з друкувальною голівки на поверхню, де це необхідно, за допомогою термічного або п'єзоелектричного методу. Краплі матеріалу застигають і складають перший шар. Потім шари

матеріалу деталі 7 тверднуть за рахунок поступового охолодження або у разі друку фотополімерами кожен шар обробляється ультрафіолетовим випромінювачем 2 для полімеризації (затвердіння). Після обробка включає видалення підтримуючої частини 6.

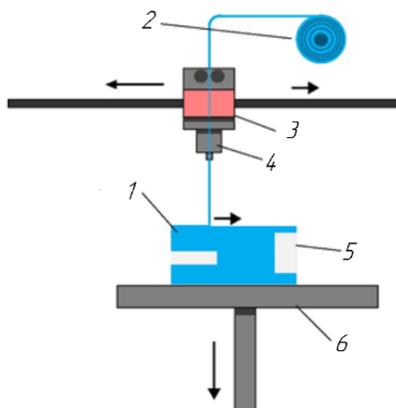


Рис. 11. Технологія 3-D друку методом наплавлення
1 – об’єкт (деталь), 2 – котушка матеріалу, 3 – нагрівальний елемент,
4 – сопло, 5 – підтримуючий матеріал, 6 – будівельна платформа

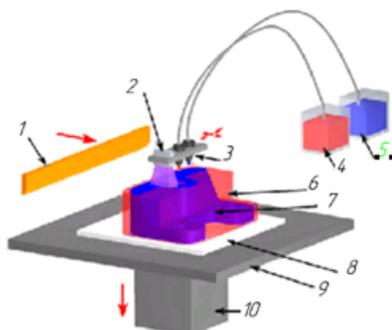


Рис. 12. Технологія 3-D друку методом струминної обробки матеріалу
1 – вирівнювальна лопатка (лезо), 2 – УФ-лампа для затвердіння
матеріалу, 3 – друкувальні голівки, 4 – підтримуючий матеріал,
5 – будівельний матеріал, 6 – підтримуюча частина, 7 – деталь,
8 – будівельна підкладка, 9 – платформа, 10 – поршень

Процес порошкового сплавлення (рис.13) (*Powder Bed Fusion*) включає наступні методи друку: пряме лазерне спікання металів (DMLS), електронно-променевоє плавлення (EBM), селективне теплове спікання (SHS), селективне лазерне плавлення (SLM) і селективне лазерне спікання (SLS).

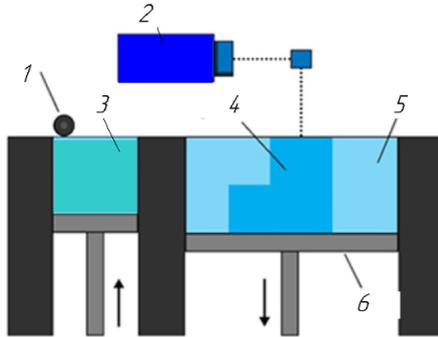


Рис. 13. Технологія 3-D друку методом плавлення у порошковому шарі

1 – ролик, 2 – лазер, 3 – резервуар з новим порошком, 4 – об’єкт (деталь), 5 – порошковий шар, 6 – будівельна платформа

У методах плавки у порошковому шарі (PBF) використовується лазерний або електронний промінь для плавлення та сплавлення порошку матеріалу. Методи електронно-променевої плавки (EBM) вимагають вакууму, але можуть використовуватися з металами та сплавами при створенні функціональних деталей. Всі процеси PBF включають нанесення порошкового матеріалу на попередні шари. І тому існують різні механізми, зокрема ролик чи лезо. Бункер або резервуар під бічною стінкою забезпечує подачу свіжого матеріалу. Пряме лазерне спікання металів (DMLS) – це те саме, що і SLS, але з використанням металів, а не пластмас. Процес спікає порошок шар за шаром. Селективне термічне спікання відрізняється від інших процесів тим, що для сплавлення порошкового матеріалу використовується нагріта термо-друкуюча голівка. Як і раніше, шари додаються валиком у проміжках між сплавленими шарами.

Шар матеріалу товщиною зазвичай 0,1 мм розподіляється по будівельній платформі 6. Лазер 2 сплавляє перший шар або перший поперечний переріз моделі. Новий шар порошку, розташований в резервуарі 3 розподіляється поверх попереднього шару за допомогою валика 1. Додаткові шари або поперечні перерізи сплавляються та додаються. Процес повторюється

доти, доки не буде створено всю модель 4. Пухкий, нерозплавлений порошок 5 залишається на місці, але видаляється під час після обробки.

Процеси листового ламінування (рис.14) включають ультразвукове адитивне виробництво (*Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)*) та виробництво ламінованих об'єктів (*Laminated Object Manufacturing (LOM)*).

У процесі ультразвукового адитивного виробництва використовуються листи чи стрічки металу, які з'єднуються разом за допомогою ультразвукового зварювання. Цей процес вимагає додаткової обробки з ЧПУ та видалення незв'язаного металу, часто в процесі зварювання. Виробництво ламінованих об'єктів (LOM) використовує аналогічний пошаровий підхід, але використовує папір як матеріал і клей замість зварювання.

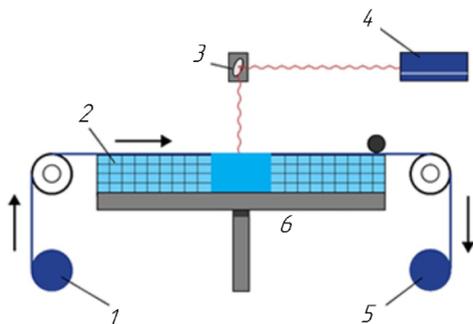


Рис. 14. Технологія 3-D друку методом листового ламінування
1 – котушка матеріалу, 2 – перехресно нагрітий матеріал,
3 – дзеркало з електроприводом, 4 – лазер, 5 – котушка
використаного матеріалу, 6 –будівельна платформа

UAM використовує метали і включає алюміній, мідь, нержавіючу сталь і титан. Цей процес є низькотемпературним та дозволяє створювати внутрішню геометрію. Цей процес може пов'язувати різні матеріали та вимагає відносно мало енергії, оскільки метал не плавиться, натомість використовується комбінація ультразвукової частоти та тиску. Матеріали склеюються, чому сприяє пластична деформація металів. Пластична деформація забезпечує більший контакт між поверхнями та підтримує існуючі зв'язки.

Для процесу фотополімеризації у ванні (*VAT Photopolymerisation*) (рис. 15) використовується ванна 1 з рідкою фотополімерною смолою 2, з якої шар за шаром будується модель. Лазер 3 використовується для

затвердіння смоли, де це потрібно, в той час як платформа 5 переміщує об'єкт, який виготовляється 4, вниз після затвердіння кожного нового шару. Після завершення з ванни зливають смолу і видаляють об'єкт¹⁸.

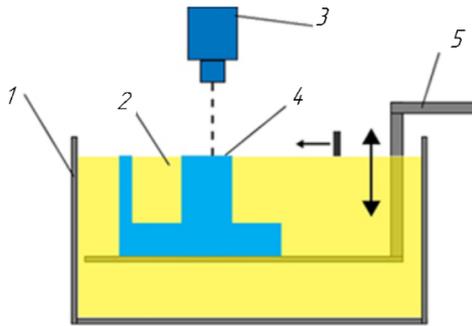


Рис. 15. Технологія 3-D друку методом фотополімеризації у ванні
1 – ванна, 2 – фотополімер (смола), 3 – лазер, 4 – об'єкт побудови,
5 – платформа

Розглянувши технології 3-D друку різними методом та матеріалами проаналізуємо основні їх переваги та недоліки. Результат аналізу наведено у табл. 1. Кожен з методів 3-D друку має перспективи використання у локомотиворемонтному господарстві.

Таблиця 1

Основні переваги та недоліки технологій 3-D друку та матеріалів, що використовуються

| Матеріал для друку | Переваги | Недоліки |
|--|---|---|
| Струминне нанесення сполучного (BJ) | | |
| Метали: нержавіюча сталь; Полімери: ABS-пластик, поліамід, полікарбонат; Кераміка: скло. | Різнокольоровий друк. Використання різних матеріалів. Швидкий процес. Велика кількість різних комбінацій сполучного та порошку та різних механічних властивостей. | Не завжди підходить для конструкційних деталей через використання сполучного матеріалу. Додаткова після обробка може значно збільшити час всього процесу. |

¹⁸ About Additive Manufacturing. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Продовження таблиці 1

| Спрямоване осадження енергії (DED) | | |
|--|--|---|
| Метали: кобальт, хром, титан | Можливість високого рівня контролю структури зерна, що надає процесу ремонту високоякісні, функціональні деталі. Потрібен баланс між якістю поверхні та швидкістю. | Обмежене використання матеріалів. Процеси плавлення потребують додаткових досліджень для подальшого просування процесу до більш поширеного позиціонування |
| Екструзія матеріалу (ME) | | |
| ABS -пластик, нейлон, полікарбонат | Поширений та недорогий процес. Можна використовувати ABS -пластик, що має хороші структурні властивості та легкодоступний. | Радіус сопла обмежує та знижує кінцеву якість. Точність та швидкість низькі. Потрібен постійний тиск матеріалу для підвищення якості обробки. |
| Струминна обробка матеріалу (MJ) | | |
| Полімери: поліпропілен, поліетилен високої щільності, полістирол, поліметил-метакрилат, полікарбонат, ABS -пластик, удароміцний полістирол. | Низький рівень відходів, через високу точність осадження крапель. Використання кількох частин матеріалу і кольорів в рамках одного процесу. | Часто потрібен допоміжний матеріал. Обмежені матеріали. |
| Фотополімеризація у ванні (VP) | | |
| Полімери: УФ – фотополімерна смола. Смоли: лінійка Visijet | Високий рівень точності та гарна обробка. Відносно швидкий процес. Зазвичай великі площі збирання. | Досить вартісний. Тривалий час після обробки та видалення зі смоли. Обмежене використання матеріалів фотосмол. Необхідність опорних конструкції та подальше затвердіння. |
| Плавлення у порошковому шарі (PBF) | | |
| SHS: нейлон; DMLS, SLS, SLM: нержавіюча сталь, титан, алюміній, кобальт-хром, сталь; EBM: титан, кобальт-хром, нержавіюча сталь, алюміній та мідь. | Відносно недорогий. Підходить для візуальних моделей та прототипів (SHS). Порошок діє як інтегрована опорна структура. Великий вибір матеріалів. | Відносно низька швидкість (SHS). Відсутність структурних властивостей у матеріалів. Обмеження за розміром. Використання високої потужності. Обробка залежить від розміру зерна порошку. |

| Листове ламінування (UAM), (LOM) | | |
|---|--|---|
| Папір, пластик листові метали: алюміній, мідь, нержавіюча сталь і титан | Швидкість. Низька вартість. Простота обробки матеріалів. | Після обробка може змінюватись в залежності від паперу або пластику. Обмежене використання матеріалу. |

Особливо актуальними будуть методи обробки металів, таких як: спрямоване осадження енергії (DED), плавлення у порошковому шарі (PBF) для друку запасних частин локомотивів переважна частина яких виготовлена з різних металів та сплавів. Для підприємств залізничного транспорту, які займаються ремонтом та виробництвом вагонів та моторвагонного рухомого складу актуальними будуть методи струминного нанесення сполучного (BJ), екструзії матеріалу (ME), струминної обробки матеріалу (MJ), плавлення у порошковому шарі (PBF), листового ламінування (UAM) через наявність багатьох елементів вагонів та потягів виготовлених з пластиків, полімерів, алюмінію і т. ін.

3. Скорочення вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць за рахунок впровадження технологій 3-D друку запасних частин

Однією зі складових вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць є суми прямих виробничих витрат, що припадають на тягову одиницю в році t життєвого циклу. При цьому враховується, що на протязі року тягова одиниця може знаходитись в простой на капітальному або поточних видах ремонтів та технічному обслуговуванні. Урахування часу простою для виконання цих заходів в році t життєвого циклу визначається за формулою:

$$T_t^{np} = \sum_i (N_{i_t} \cdot t_i^{np}) + N_{To_t} \cdot t_{To_t}^{np} + N_{B_t} \cdot t_{B_t}^{np}, \quad (1)$$

де N_{i_t} – кількість i -х видів капітального, поточного ремонтів i -го виду і технічних обслуговувань, які припадають на рік t життєвого циклу;

t_i^{np} – час простою тягової одиниці на i -му виді капітального або поточного ремонтів, год;

N_{To_t} – кількість технічних обслуговувань на рік t життєвого циклу;

$t_{To_t}^{np}$ – час простою тягової одиниці на технічному обслуговуванні, год;

N_{B_t} – кількість відмов у році t життєвого циклу;

$t_{\text{в}}^{\text{пр}}$ – час простою тягової одиниці для відновлення працездатності після відмови, год.

Час простою $t_i^{\text{пр}}, t_{\text{ТО}}^{\text{пр}}$ – залежить від існуючої системи утримання тягової одиниці, виду тяги та роботи, яку виконує тягова одиниця.

Зазвичай при розрахунках вартості життєвого циклу нового рухомого складу використовуються середні норми простоїв на технічному обслуговуванні та ремонті. Так, наприклад, відповідно до «Положення про систему планово-попереджувального ремонту та технічного обслуговування електровозів, тепловозів (ТРС), електро- та дизель поїздів в тому числі міжрегіональних (МВРС)», затвердженого наказом Укрзалізниці від 30.01.2019 № 55-Ц, вказані середні по АТ «Укрзаліниця» норми простоїв ТРС та МВРС на технічному обслуговуванні та ремонті (з урахуванням очікування та поетапного подовження терміну служби) (табл. 2.).

Таблиця 2

Середні по АТ «Укрзаліниця» норми простоїв ТРС та МВРС на технічному обслуговуванні та ремонті

| Вид технічного обслуговування та ремонту | Норма простою | | |
|--|-----------------|-------------------------|--------------|
| ТЕПЛОВОЗИ | | | |
| тип | вантажні | пасажирські (на секцію) | маневрові |
| ТО-3 | 16 год. | 12 год. | 12 год. |
| ПР-1 (Поточний) | 48 год. | 36 год. | 24 год. |
| ПР-2 | 8 діб | 5 діб | 4 діб |
| ПР-3 (Деповський) | 10 діб | 6 діб | 5 діб |
| ЕЛЕКТРОВОЗИ | | | |
| ТО-3 | 12 год | | |
| ПР-1 (Поточний) | 24 год | | |
| ПР-2 | 2 доби/секцію | | |
| ПР-3 (Деповський) | 5 діб/секцію | | |
| МВРС | | | |
| Тип | електро- | дизель (поїзд) | |
| ТО-3 | 4 год. / поїзд | | 12 год. |
| ПР-1 | 24 год. / поїзд | | 24 год. |
| ПР-2 | 2 доби / секція | | 10 діб |
| ПР-3 | 8 діб / секція | | 12 діб |
| МІЖРЕГІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДИ | | | |
| Серія | HRCS2 | ЕКр1 | EJ 675 Škoda |

Продовження таблиці 2

| | | | |
|------|----------------|-----------------|-----------------|
| ТО-3 | 4 год. / поїзд | 4 год. / поїзд | 8 год. / поїзд |
| ПР-1 | 8 год. / поїзд | 48 год. / поїзд | 12 год. / поїзд |
| ПР-2 | 4 доби / поїзд | 96 год. / поїзд | 4 доби / поїзд |
| ПР-3 | - | 60 діб / поїзд | 60 діб / поїзд |

Терміни служби локомотивів та МВРС коливаються в межах 15-45 років залежно від серії. За статистичними даними локомотивних депо спостерігається перевищення норм простою локомотивів та МВРС на планових видах ремонтів, також з часом експлуатації збільшується кількість непланових ремонтів та кількість випадків непланової заміни обладнання при планових видах ремонтів.

Наприклад, за 2010 рік по Донецькій залізниці для тепловозів 2ТЕ116 та ЧМЕЗ перевищені норми простою для ремонтів ПР2 та ПР3. На ПР3 при нормі простою тепловозів 2ТЕ116 10 діб фактично простій складає 47,06 доби, для тепловозів ЧМЕЗ – при нормі 5 діб простій складає 30,02 діб. Для тепловозів ЧМЕЗ на ПР2 фактичний простій складає 18,04 доби, що перевищує норму на 14,04 доби. Норми простою електровозів по залізниці не виконуються на поточних ремонтах ПР3, перевищення складає 3,67 діб від норми. Причиною перевищення норм простою на ПР3 є недостатнє фінансування і відсутність необхідної кількості запасних частин для виконання ремонтів, істотного скорочення технологічного запасу справного обладнання локомотивів. Особливо гостра ситуація складається для локомотивів, які перевищили нормативний термін служби, давно зняті з виробництва та рухомого складу зарубіжної побудови.

З урахуванням вищеозначеного, потрібно при розрахунку вартості життєвого циклу тягової одиниці враховувати витрати, що пов'язані з простоєм локомотива більше середньої норми (яка зазвичай береться за основу при цих розрахунках). Перепростою локомотивів при планових видах ремонтів може бути викликаний багатьма причинами, наприклад, недостатність перехідного запасу запасних частин для ремонту локомотивів, тобто очікуванням поставки деталей, часті відмови обладнання викликані низькою надійністю тягової одиниці, що потребують більшої кількості запасних частин, а ні ж були заплановані для використання відповідно до програми ремонтів, недостатність ремонтних позицій та персоналу та ін.

Тобто, фактично час простою T_i^{np} , що визначається з ф. 1. буде набагато більшим ніж при розрахунку.

Відповідно від нього залежать такі експлуатаційні показники, як:

– ефективний фонд робочого часу використання тягової одиниці в році t життєвого циклу, $T_{ефт}$;

- кількість обертів, які здійснює тягова одиниця за рік t життєвого циклу у поїзній роботі, $K_{обі}$;
- пробіг тягової одиниці в році t життєвого циклу, $L_{проб}$;
- вантажообіг, виконаний тяговою одиницею у році t , життєвого циклу $\sum QL_t$;
- середньодобовий пробіг тягової одиниці в році t життєвого циклу, \bar{S}_t .

Відповідно збільшаться прямі виробничі витрати в році t , життєвого циклу, що обумовлені експлуатацією, поточними ремонтами, технічним обслуговуванням та відмовами тягової одиниці.

Для врахування у виробничих витратах впливу перепростою тягової одиниці на планових видах ремонту для локомотивів, що знаходяться в експлуатації, за статистичними даними по Укрзалізниці та відповідно серіям потрібно ввести поправочний коефіцієнт – коефіцієнт перепростою – $k_{пер}$. Він буде враховувати фактичні дані часу простою тягової одиниці на планових видах ремонтів, що наблизить розрахунки прямих виробничих витрат в році t , життєвого циклу до реальних значень. Наприклад, з наведених вище статистичних даних для тепловозів серії 2ТЕ116 при ПР3 та тепловозів серії ЧМЕЗ при ПР2 – коефіцієнт $k_{пер}$ знаходиться в межах $4 \div 5$, для електровозів серії ВЛ8 при ПР3 $k_{пер} = 1 \div 2$.

Таким чином ф. 1. набуде наступного вигляду:

$$T_t^{np} = \sum_t (N_{it} \cdot t_t^{np} \cdot k_{пер}) + N_{ТОt} \cdot t_{ТО}^{np} + N_{вт} \cdot t_{вт}^{np}, \quad (2)$$

Коефіцієнт вводимо для першої частини рівняння, що стосується поточних ремонтів, тому що основна частина перепростоїв спостерігається для обсягів ремонту ПР2, ПР3 в меншому ступені ПР1, що обумовлено технологією виконання робіт та обсягів. Для технічного обслуговування простої $t_{ТО}^{np}$ зазвичай менші і відповідно вплив їх буде значно менший. Простої в результаті відмов тягової одиниці, $t_{вт}^{np}$ (тобто простої локомотивів та МВРС на непланових ремонтах), визначаються по статистичних даних та не регламентовані.

При розрахунку вартості життєвого циклу для тягових одиниць, які плануються до використання, при закупівлі, при складанні договорів лізингу, при порівнянні вартості життєвого циклу декількох нових тягових одиниць, потрібно обов'язково враховувати доступність запасних частин, їх технологічність, уніфікацію, особливо на довгих термінах. Залежність від постачання запасних частин для локомотивів зарубіжної побудови особливо чинить вплив на ефективність використання тягових одиниць

та час їх простою в очікуванні ремонту. Використання коефіцієнту $k_{\text{пер}}$ при розрахунках вартості життєвого циклу для нових тягових одиниць унеможливлена відсутністю статистичних даних про перепростої, тому матиме ймовірнісний характер. Але доцільність введення коефіцієнту, що враховує залежність простоїв тягових одиниць від постачання (доступності) запасних частин особливо через 20-30 років експлуатації є безсумнівною. Водночас потребує додаткових досліджень та розробки механізму, що враховує цей вплив на вартість життєвого циклу тягових одиниць, що пропонуються до використання та впровадження.

Одним з методів скорочення часу простою в очікуванні ремонту тягового рухомого складу є використання адитивних технологій, тобто 3D – друку деталей та запасних частин. Основною метою застосування адитивних технологій у локомотиворемонтне виробництво є скорочення непродуктивного часу простою тягового рухомого складу та МВРС в очікуванні ремонту через нестачу запасних частин. Так як стан парку локомотивів та вагонів, інфраструктури знаходиться в незадовільному стані через значне недофінансування галузі, нестачі коштів на оновлення основних фондів, недотримання графіків постановки на капітальні та планові види ремонтів, значні перепробіги між постановками на ремонт, що призводить до частих непланових ремонтів та непланових замін обладнання при планових видах ремонтів. Ситуація погіршується тим, що парк локомотивів та МВРС значно застарілий, деякі серії електровозів та тепловозів, вже відпрацювали свій нормативний термін служби, постачання запасних частин часто потребує значного часу, що призводить до затримок у поповненні складських запасів у локомотивних депо. Виготовлення хоча б частини деталей та запасних частин на власних підприємствах дозволить підвищити ефективність роботи з ремонту та утримання парку локомотивів та вагонів. До вторинних ефектів можна віднести зменшення витрат на ремонт локомотивів, за рахунок скорочення вартості самих деталей, створення архіву Cad -проектів, що створює передумови до розвитку модернізації деталей та складових частин тягового рухомого складу, можливість оновлення інструментальної бази ремонтних підприємств та допоміжних дільниць.

Розглянемо очікувані ефекти та проблемні місця від впровадження 3D – друку деталей та запасних частин для локомотиворемонтних підприємств (рис.16 – 17).

Основними проблемними місцями при впровадженні технологій 3D – друку деталей та запасних частин є обмеження технологій друку та матеріалів саме для залізничної галузі, обмеження у виборі технічних засобів для реалізації 3-D друку деталей в тому числі габаритних, жорсткі

вимоги до відповідності друкованих виробів вимогам санітарних, пожежних та вимог безпеки руху, що передбачені державними стандартами з якості продукції для залізничного транспорту, ще не налагоджена інфраструктура постачання сировини для певних технологій друку, бажано вітчизняного виробництва, сертифікація та надійність виробів виготовлених в процесі 3-D друку.

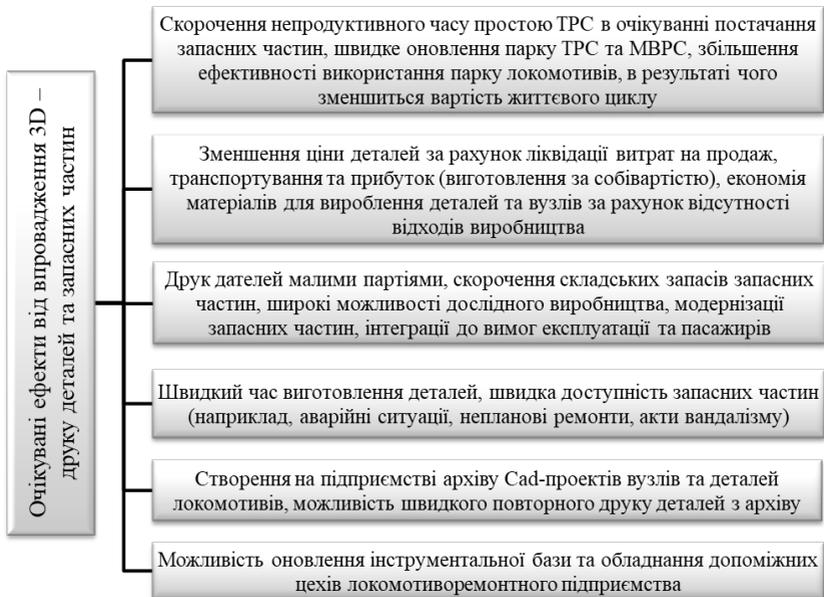


Рис. 16. Очікувані ефекти від впровадження 3D – друку деталей та запасних частин

Також потрібна розробка механізму впровадження технологій 3-D друку у процес ремонту залізничних транспортних засобів з урахуванням потреб локомотивних депо, розрахунку обсягів виробництва, технологій, методів, матеріалів, навчання операторів, розробки технології після друкарської обробки та доведення готових виробів.

Але перспективи впровадження адитивних технологій у залізничній галузі дуже широкі з поступовою розробкою нових методів 3D-друку особливо з використанням металів, розробки вогнестійких термопластів, що відповідатимуть галузевим стандартам пожежної безпеки, розробки вогнестійких композитних матеріалів на основі нейлону та ін.

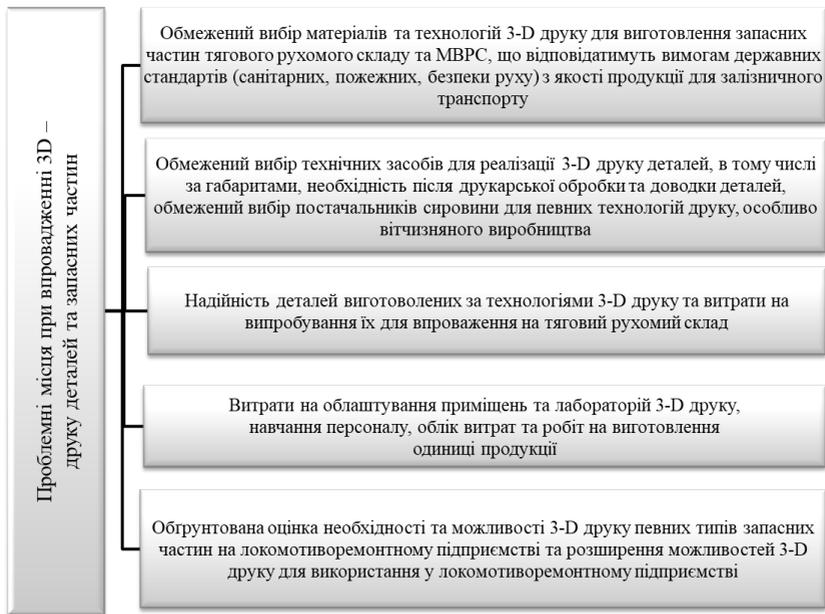


Рис. 17. Проблемні місця при впровадженні 3D – друк деталей та запасних частин

ВИСНОВКИ

В роботі досліджено питання впливу адитивних технологій на вартість життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць. Зношення інфраструктури залізниць, парків вагонів, локомотивів та МВРС, складна ситуація з постачання запасних частин і деталей, що впливає на ефективність функціонування транспорту спонукає до пошуку нових підходів та методів відновлення технічного стану транспорту, що підтверджує актуальність даних досліджень. В останні роки локомотивобудівельні та транспортні компанії для оновлення тягових одиниць використовують адитивні технології, а саме технологій 3-D друк деталей та запасних частин. Лідерами у впровадженні технологій 3-D друк для залізниць є компанії Siemens Mobility, Bombardier Transportation, Alstom та ін. Виготовляються методом 3-D друк такі деталі, як: кришка підшипника колісної пари, кришки електричних з'єднань, підлокітник з поручнями та стіл у спинці сидіння, знак поручня зі шрифтом Брайля, ланка гальмівної підвіски для гальмівного агрегату метро, вентиляційна система для прототипу поїзда з акумуляторним живленням. Для відновлення залізничних

рейок використовується технологія адитивного виробництва лазерного плавлення, для створення покращеного шару на верхніх поверхнях рейок. Технологію 3-D друку використовують для виготовлення гвинтів для кріплення залізничної колії, тривимірних друкованих георешіток, звукових бар'єрів для залізниці, композитних опор для верхньої будови колії, часток «розумного» баласту та інших.

Авторкою роботи проаналізовано різні технології 3-D друку, розглянуто особливості методів та матеріалів, що використовуються для друку в контексті використання їх для залізничної галузі. На думку авторки особливо актуальними до впровадження будуть методи обробки металів, таких як: спрямоване осадження енергії, плавлення у порошковому шарі, тому що основна частина конструкційних деталей локомотивів виготовлена з різних металів та сплавів. Для підприємств залізничного транспорту, які займаються ремонтом та виробництвом вагонів та моторвагонного рухомого складу актуальними будуть методи струминного нанесення сполучного, екструзії матеріалу, струминної обробки матеріалу, плавлення у порошковому шарі, листового ламінування.

Однією зі складових вартості життєвого циклу тягового рухомого складу залізниць є суми прямих виробничих витрат, що припадають на тягову одиницю. Ці витрати, в тому числі, залежать від часу простою в усіх видах ремонтів та технічного обслуговування локомотиву. Для врахування перевищення норм простою локомотивів (в тому числі простій від нестачі запасних частин та деталей для ремонту) при планових видах ремонтів запропоновано використання коефіцієнта перепростою – $k_{пер}$, який враховує фактичні дані часу простою тягової одиниці на планових видах ремонтів, що наблизить розрахунки прямих виробничих витрат в році t , життєвого циклу до реальних значень. Також для скорочення часу простою локомотивів в очікуванні постачання запасних частин пропонується впровадження технології 3-D друку для локомотиворемонтних та вагоноремонтних підприємств.

АНОТАЦІЯ

В останні роки технології тривимірного друку застосовуються майже у всіх галузях промисловості. Однак незважаючи на швидкий розвиток технологій та методів, створення деталей складних конфігурацій, швидкості 3-D друку застосування технологій адитивного виробництва для виготовлення вузлів тягових транспортних засобів та інфраструктурних елементів залізниць все ще знаходиться на етапі досліджень.

В представлений роботі досліджено використання адитивних технологій в залізничній галузі. Розглянуто досвід провідних залізничних компаній

у питанні використання 3-D друку деталей та запасних частин для тягового рухомого складу залізниць та інфраструктури. Проаналізовано технології, методи та матеріали для 3-D друку, що можуть бути застосовані у локомотиворемонтному та вагоноремонтному підприємстві, визначені їх переваги та недоліки. Окреслені проблемні місця при впровадженні 3D – друку деталей та запасних частин в процес ремонту залізничної техніки та очікувані ефекти від впровадження.

Література

1. Свириденко Ю. Щодо розвитку залізничної галузі та її впливу на економічне зростання. URL: https://cfts.org.ua/blogs/schodo_rozvitku_zaluznichno_galuzi_ta_vplivu_na_ekonomichne_zrostannya_561
2. Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20Ukr.pdf>
3. Krzyżanowski J. 3D printing in the Rail Industry. URL: <https://omni3d.com/3d-printing-in-the-rail-industry/>.
4. Dignan L. Siemens Mobility's rail service center bets on 3D printing. URL: <https://www.zdnet.com/article/siemens-mobilitys-rail-service-center-bets-on-3d-printing/>
5. Application Spotlight: 3D Printing in the Rail Industry. URL: <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>
6. DB begins 3D printing metal parts. URL: <https://www.railjournal.com/technology/db-begins-3d-printing-metal-parts/>
7. Boissonneault T. First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/>
8. Bombardier Transportation adopts Stratasys F900 to 3D print end-use rail parts. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/bombardier-transportation-stratasys-f900-end-use-rail/>
9. Boissonneault T. Stratasys focuses on 3D printing in transport with Rail Industry Solution. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/stratasys-focuses-on-3d-printing-in-transport-with-rail-industry-solution/>
10. Angel trains, DB ESG and Stratasys trial the UK's first 3d printed parts on passenger trains. URL: <https://railway-international.com/news/21446-angel-trains,-db-esg-and-stratasys-trial-the-uk%E2%80%99s-first-3d-printed-parts-on-passenger-trains>
11. Carbon fibre and 3D printing could make trains quieter and more comfortable. URL: <https://www.imeche.org/news/news-article/carbon-fibre-and-3d-printing-will-make-railways-quieter-and-more-comfortable1>

12. Alstom leverages Stratasys FDM 3D printing to create emergency spare parts and minimize downtime of sétif tramway network. URL: <https://railway-international.com/technical-articles/42721-alstom-leverages-stratasys-fdm-3d-printing-to-create-emergency-spare-parts-and-minimize-downtime-of-s%C3%A9tif-tramway-network>

13. Harnessing 3D printing technology to deliver fast and sustainable rail parts URL: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2023/11/harnessing-3d-printing-technology-deliver-fast-and-sustainable-rail-parts>

14. Sher D. UK's new high speed rail HS2 looks to concrete 3D printing to cut CO2. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/londons-new-high-speed-rail-hs2-looks-to-concrete-3d-printing-to-cut-co2/>

15. Boissonneault T. Could 3D printing revolutionize the UK rail industry? URL: <https://www.3dprintingmedia.network/amey-could-3d-printing-revolutionize-the-uk-rail-industry/>

16. Hao Fu, Sakdirat Kaewunruen. State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. J. Compos. Sci. 2022, 6(1), 7, <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>. URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/1/7>

17. ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. URL: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>

18. About Additive Manufacturing. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

Information about the author:

Karashchuk Viktoriia Oleksandrivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Electromechanics

and Railway Rolling Stock,

National Transport University,

1, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., Kyiv, 02000, Ukraine

NOTES

NOTES

NOTES

Izdevniecība “Baltija Publishing”
Avotu iela 8 k-1 - 25, Rīga, LV-1011
E-mail: office@baltijapublishing.lv

Iespiegts tipogrāfijā SIA “Izdevniecība “Baltija Publishing”
Parakstīts iespiešanai: 2026. gada 27. marts
Tirāža 300 eks.