ISSN: 2336-3630

STŘEDOEVROPSKÝ VĚSTNÍK PRO VĚDU A VÝZKUM

Vol. 1. № 6. 2026



Licencováno pod veřejnou mezinárodní licencí Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0)

STREDOEVROPSKY VESTNiK

PRO VEDU A VYZKUM

Vol. 1. № 6. 2026

Praha, České republika 2026

Multidisciplinární mezinárodní vědecký magazín “**Stredoevropsky vestnik pro vedu a vyzkum**” je registrován v České republice. Státní registrační číslo u Ministerstva kultury ČR: E 21425. Vol. 1. № 6. 2026. str. 109.

Vydavatel:

Publishing house Education and Science s.r.o. IČO : 271 56 877.
Frýdlanská 15/1314 , Praha 8. MS v Praze , oddíl C,vložka 100614

Editorial Board:

Editor-in-Chief –

Datsii O.I., Doctor of Economics, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine, President of the PO "Association of Scientists of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief –

Ekimov S.V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director of Publishing House Education and Science, Prague, Czech Republic

Romanenko E.O., Doctor of Public Administration, Professor, Honored Lawyer of Ukraine, President of the public scientific organization “All-Ukrainian Assembly of Doctors of Public Administration”, Kyiv, Ukraine

Editorial Board Members:

Shpachuk V.V., Doctor of Public Administration, Professor, Visiting Professor Newcastle University Business School, Newcastle, UK

Levchenko N.M., Doctor of Public Administration, Professor, Research scientist Berlin University of Economics and Law, Berlin, Germany

Khraschevskyi R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv, Ukraine

Mykolayets D.A., Doctor of Laws, Professor, Kyiv, Ukraine

Ulyanchenko Yu.O., Doctor of Public Administration, Associate Professor, Kyiv, Ukraine

Blyznyuk A.S., Doctor of Public Administration, Professor, Kyiv, Ukraine

Kartashov E.G., Doctor of Public Administration, Professor, Kyiv, Ukraine

Články jsou vyvěšeny v redakci autora. Za obsah a pravopis zaslaných materiálů odpovídají autoři

© Publishing house Education and Science s.r.o., Česká republika, 2026
© Public Organization "Association of Scientists of Ukraine", Ukraine, 2026
© autoři článků, 2026

CONTENT

Ryzhov Igor, Yashchuk Petro

INDIVIDUAL VITAL COMPETENCIES UNDER ENERGY COLLAPSE AS DETERMINANTS OF SECURITY: INSIGHTS FROM UKRAINE'S RESISTANCE TO MILITARY AGGRESSION 4

Чередниченко Володимир

АНАЛІТИЧНИЙ МАРКЕТИНГ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ 26

Корбут Денис

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВІДБОРУ ОЗНАК У ЗАДАЧАХ БАГАТОКЛАСОВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ КІБЕРАТАК З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ 39

Peduraru Serafym, Pecheriaha Svitlana

RH INCOMPATIBILITY AS A CURRENT PROBLEM IN MODERN OBSTETRICS 48

Сорока Ольга

КРИТИЧНЕ МИСЛЕННЯ МАЙБУТНЬОГО ВЧИТЕЛЯ В ЦИФРОВУ ЕПОХУ: ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ 59

Nabochenko Vasyl

TITANIUM CARBIDE SURFACE ENGINEERING: REVIEW OF RECENT ADVANCES IN APPLICATION METHODS AND TECHNIQUES 76

Олешко Олексій

ІННОВАЦІЙНА АКТИВНІСТЬ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЕЙ РЕГІОНУ ЯК ДРАЙВЕР ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ 95

Ryzhov Igor Mykolaiovych, Doctor of Juridical Sciences, Professor, Honored Lawyer of Ukraine, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8009-5895

Yashchuk Petro Volodymyrovych, Senior Lecturer at the Department of the Khmelnytskyi Regional Institute of Postgraduate Pedagogical Education named after Anatolii Nazarenko, Chair of the Board of the NGO "Association of Doctors of Khmelnytskyi," Head of the Scientific and Practical Center "Vital Security," Khmelnytskyi; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9367-0604

INDIVIDUAL VITAL COMPETENCIES UNDER ENERGY COLLAPSE AS DETERMINANTS OF SECURITY: INSIGHTS FROM UKRAINE'S RESISTANCE TO MILITARY AGGRESSION

Abstract

This article offers a conceptual and analytical examination of prolonged energy collapse in wartime and post-crisis environments as a form of *vital-crisis reality*, in which infrastructural instability becomes a multidimensional challenge at the individual level. The study focuses on **individual vital competencies** as key determinants of security, understood as an integrated system of resources enabling individuals to preserve vitality, sustain life, and maintain professional functionality under conditions of resource scarcity, disrupted communication, and persistent threat.

The research addresses a methodological gap in existing literature, where energy collapse is primarily analysed within technical and security frameworks, while the individual's competency-based capacity to function under prolonged instability remains insufficiently conceptualised. To address this gap, the article develops an integrated model of vital competencies encompassing physical-vital,

psychological-mental, cognitive-orientational, moral-value, and professional-functional dimensions.

Drawing on Ukraine's empirical experience of resistance to military aggression, the study demonstrates that energy collapse functions as a systemic condition requiring continuous mobilisation of individual resources. In this context, vital competencies act as practical determinants of security, ensuring life preservation and sustained professional responsibility.

The findings contribute to competence-based approaches within the European lifelong learning framework by introducing a crisis-oriented perspective grounded in real conditions of prolonged instability.

Keywords: vital competencies; vital security; energy collapse; individual resilience; life preservation; professional responsibility; military aggression.

Introduction. Contemporary wartime and post-crisis transformations necessitate a reassessment of established conceptions of security, as the vulnerability of critical infrastructure increasingly assumes not only material but directly life-sustaining significance for the population. Under such conditions, energy instability ceases to be merely a background technical factor and instead emerges as a systemic determinant that reshapes everyday life organisation, the structure of labour activity, communication regimes, and access to essential services, thereby exerting sustained pressure on the physical, psycho-emotional, cognitive, and moral-value resources of the individual [2; 3].

In contemporary scholarly discourse, the phenomenon of energy collapse is predominantly examined within technical, energy, managerial, and security-oriented research, with a primary focus on energy system stability, the protection of critical infrastructure, risk management, and the minimisation of socio-economic losses. At the same time, humanitarian and social approaches (resilience, human security, crisis management, psychosocial resilience)

significantly broaden the analytical framework; however, they tend to focus on isolated consequences of crisis conditions or stress responses rather than providing a comprehensive, integrative perspective [4; 6].

As a result, a methodological asymmetry emerges: while the infrastructural dimension of the problem has been extensively elaborated, the subject-centred dimension – namely, the individual's internal readiness to act under conditions of prolonged instability and their competency-based capacity to sustain both the individual's viability and professional functionality – remains insufficiently integrated into a coherent analytical framework.

Particular importance arises from the need to combine life-preserving tasks with the fulfilment of labour and professional responsibilities under conditions of limited access to time, heat, light, water, communication, and information. In such circumstances, professional responsibility transcends its purely normative character and becomes a practical capacity of the individual to maintain discipline, quality of performance, communicative reliability, and moral integrity under conditions of prolonged resource scarcity [4; 9].

Accordingly, the analysis of **individual vital competencies** should be conceptualised as the study of an integrated system of interrelated resources—physical, psycho-emotional, cognitive, moral-value, and professional-functional—that define the boundaries of human viability and socio-professional reliability under conditions of chronic instability.

Further analytical relevance is provided by the European competence-based approach to lifelong learning, which conceptualises competencies as an integrated set of knowledge, skills, abilities, and psychological dispositions developed through formal, non-formal, and informal learning. Under conditions of wartime infrastructural disruption, competencies acquire a pronounced security dimension, transforming into mechanisms of life preservation [1; 2].

In this context, Ukraine's experience of prolonged energy collapse, combined with conditions of resistance to military aggression, constitutes a unique empirical foundation for refining and advancing competence-based approaches within a broader European framework, with a particular emphasis on the individual's practical preparedness to act under conditions of systemic crises and multidimensional threats.

Purpose of the study. The purpose of this article is to provide a comprehensive analytical justification of **individual vital competencies** as systemic determinants of security that ensure the preservation of vitality, life sustainability, and professional functionality under conditions of energy collapse, as well as to develop an integrated model of individual vital competencies defining the individual's capacity to act under conditions of chronic vital-crisis instability.

Analysis of recent research and publications. The issue of blackouts (energy collapse) in contemporary scholarly discourse is predominantly examined within technical, energy, managerial, and security-oriented research, where primary attention is devoted to energy system stability, protection of critical infrastructure, risk management, and the minimisation of material and socio-economic losses. In studies on energy security, blackouts are interpreted as indicators of the vulnerability of national and regional systems, as well as factors threatening national and economic security. At the same time, individuals are typically represented as statistical units or passive consumers, lacking agency in responding to crisis situations in overcoming crisis consequences [2; 3].

Within the humanities and social sciences, crisis-related phenomena are analysed through the concepts of resilience, human security, crisis management, and psychosocial resilience. These approaches have significantly broadened the understanding of security by shifting the focus from institutional frameworks to human needs and vulnerabilities. However, most such studies remain conceptually fragmented, focusing either on psychological responses to stress or on community-

level adaptation mechanisms, without developing a comprehensive model of individual life competencies under conditions of prolonged energy instability (energy collapse) [6; 9].

The European competence-based approach to lifelong learning conceptualises competencies as an integrated combination of knowledge, skills, abilities, and psychological dispositions developed across diverse educational and social environments, including formal, non-formal, and informal learning [1].

Nevertheless, these frameworks have largely been formed under conditions of relative infrastructural stability and lack a sufficiently developed crisis-oriented profile“crisis profile” applicable to prolonged wartime infrastructural disruptions, in which competencies acquire not only an educational but also a directly vital-security function. In this regard, there is a growing need to integrate resilience-oriented humanitarian approaches with competency-based logic focused on practical mechanisms of life preservation and sustained professional functioning under conditions of chronic instability [1; 4].

A substantial body of research is devoted to the impact of emergency situations on mental health, professional burnout, and reduced work capacity. These studies emphasise the risks of chronic stress, emotional exhaustion, and maladaptation, which intensify under conditions of prolonged deprivation of essential life-support resources. However, such research typically is grounded in a reactive perspective, focusing on consequences rather than on the preventive development of life competencies as determinants of vital security [5; 7].

In legal and managerial studies, attention is directed towards ensuring the continuity of institutional and labour market functioning under crisis conditions. At the same time, professional responsibility is predominantly examined within a formal-normative framework, without sufficient consideration of the individual’s internal resources, moral-professional qualities, and capacity to maintain professional integrity under conditions of extreme strain. As a result, there remains

a lack of integration between formal requirements for professional performance and the individual's actual vital capacities under conditions of prolonged energy collapse [4; 2].

Overall, the analysis of existing research demonstrates that prolonged blackouts are predominantly conceptualised either as a technical-managerial challenge or as a psychological consequence of crisis conditions. At the same time, the integrated dimension of individual life competencies – that enable individuals to preserve vitality while maintaining professional functionality – remains insufficiently conceptualised. Existing approaches rarely integrate physical, psycho-emotional, cognitive, moral-value, and professional-functional dimensions into a unified analytical framework, despite the fact that these components interact as an interconnected system under conditions of prolonged resource scarcity [4; 9].

This necessitates a shift from a fragmented description of crisis consequences towards modelling an integrated competency-based profile for life preservation, which enables not only adaptation to episodic disruptions but also the maintenance of viability and socio-professional reliability under conditions of chronic instability, which, in wartime contexts, acquires the characteristics of energy collapse [4; 3].

Thus, the current state of research reveals a significant methodological gap between infrastructural, psychosocial, and professional analyses of crisis situations. The issue of comprehensively conceptualising individual life competencies as a systemic response to the multidimensional challenges of prolonged energy collapse remains insufficiently developed. This creates the need for an integrated analytical model that combines physical, psychological, cognitive, moral-value, and professional characteristics of the individual into a unified framework of vital security and life preservation [4; 6]

Problem Statement. Prolonged blackouts in the context of wartime and post-crisis environments should be understood not as episodic disruptions of the habitual rhythm of life, but as a systemic *vital-crisis condition* that transforms the fundamental conditions of individual existence. Within the framework of this study, in order to provide a more precise description of this situation, the term **“energy collapse”** is introduced as an author-defined analytical construct.

Energy collapse is defined as a prolonged or recurrent mode of systemic destabilisation of the energy-based life-support system, which extends beyond the mere interruption of electricity supply and encompasses associated disruptions in heating, water supply, digital infrastructure, as well as the functioning of medical and security services. In this sense, the term “blackout” is inherently limited, as it primarily denotes the absence of electricity supply, whereas “energy collapse” reflects the complex and multidimensional character of wartime infrastructural deprivation [2; 8].

The absence of electricity for a significant portion of the day, disruptions in water supply, limitations in thermal conditions, complications in communication, and restricted access to information generate a multi-layered pressure on the individual, within which their capacity for life preservation, self-regulation, and the performance of socially and professionally significant functions is tested. Under these conditions, the problem of blackouts / energy collapse extends beyond the infrastructural dimension and requires interpretation through the lens of **individual vital security**, encompassing the physical, psychological, moral, and professional dimensions of human existence [6; 9].

This issue becomes particularly acute in the contemporary Ukrainian context, where, during the period of martial law, prolonged blackouts with electricity outages lasting up to 18–20 hours per day have ceased to be isolated occurrences and have instead become a recurring and enforced reality of everyday life. As a result, the absence of light, heat, water supply, and stable communication

is no longer perceived as a temporary disruption of comfort, but is transformed into a persistent mode of existence that requires the continuous mobilisation of the individual's internal resources.

The **key determining factors** are the **duration and systemic nature of such outages,** which fundamentally alter the impact of blackouts on the individual, shifting the problem from the sphere of adaptation to an emergency event to the sphere of life preservation under conditions of chronic instability, which, by its characteristics, approaches the *regime of energy collapse* [3; 5].

The Ukrainian experience cannot be reduced solely to energy instability, as blackouts in Ukraine frequently coincide with other forms of wartime impact, including air raid alerts, missile and drone ("Shahed") attacks, threats to critical infrastructure, and the risk of renewed escalation even in rear regions. Under such conditions, individuals acquire vital competencies not so much from theoretical models as from the practice of everyday self-preservation, shaped under the pressure of real risks to life, health, and dignity.

The empirical dimension of this problem lies in the fact that the population is compelled to undergo a process of **"learning through crisis,"** in which each new wave of attacks and outages becomes a situation of accelerated formation of skills, attitudes, and behavioural algorithms aimed at preserving both individual viability and social functionality [3; 10].

As a consequence, Ukrainian society has been compelled to become a space of accelerated formation of life competencies that, in other European countries, have not yet been tested under conditions of a totalised vital-crisis reality. This assertion is not rhetorical in nature and does not claim normative or moral generalisation; rather, it reflects an empirically observable difference in the scale and duration of exposure to wartime infrastructural risks within the European context.

The Ukrainian experience thus objectively complements European competence frameworks, which have been formed under conditions of relative infrastructural stability and are not designed for systemic and prolonged crises of a wartime nature [1; 2]. Accordingly, within this study, Ukraine is conceptualised as a distinctive “laboratory” of life competencies, while the European Union may be regarded as a potential beneficiary of the generalised experience of life preservation and the maintenance of professional functionality under conditions of multidimensional threats.

This approach is consistent with the European understanding of competencies as an integrated combination of knowledge, skills, and psychological dispositions, as well as with the principle that key competencies are developed throughout life through formal, non-formal, and informal learning across diverse environments, including family, school, the workplace, and the community.

In the Ukrainian context, informal and non-formal learning has taken the form of the practical acquisition of self-preservation strategies, where real threats to infrastructure, prolonged outages, and recurring air raid alerts give rise to stable patterns of life organisation, resource management, time planning, and the maintenance of work capacity. This implies that the competence-based framework inherent in European educational discourse acquires a unique empirical dimension in the Ukrainian case, as life competencies are developed under conditions of enforced instability, where errors may carry direct consequences for health and life [1; 3].

Under these conditions, a significant proportion of the population is compelled to combine the provision of basic self-preservation needs with the fulfilment of labour and professional responsibilities, often in the absence of adequate infrastructural support. Work performed in darkness, in cold environments, and under conditions of limited access to information and

communication tools becomes an everyday practice, thereby bringing to the forefront the issue of the individual's internal readiness to act responsibly while maintaining professional functionality and social reliability.

In the absence of external guarantees of stability, it is precisely life competencies that determine the limits of work capacity, endurance, and the ability to prevent the degradation of professional roles, as well as to preserve moral integrity under conditions of scarcity, uncertainty, and heightened risk [4; 2].

Despite these risks, **the accumulated lived experience of individuals who have functioned over extended periods under conditions of systemic blackouts and wartime threats demonstrates the formation of informal yet practically effective behavioural models** grounded in self-discipline, responsible planning, moral maturity, and a readiness to accept constraints.

At the collective level, this experience manifests as the capacity for self-organisation, mutual support, rational allocation of resources, and rapid restoration of functioning following each new episode of destruction or disruption. At the individual level, these practices constitute manifestations of resilience that emerge "from below" and are validated through action rather than declarative norms, thereby conferring particular value upon this experience as an empirical foundation for the scientific conceptualisation of **individual vital competencies** [3; 10].

In this context, the central scientific problem lies in the absence of an integrated model of life competencies capable of ensuring not only physical survival, but also the preservation of personal integrity, dignity, and professional functionality under conditions of prolonged deprivation of essential life-support resources and persistent security threats.

A blackout thus functions as an anthropological test, within which the actual level of individual resilience is revealed, along with the individual's readiness for

responsible decision-making, their capacity to act under pressure, and, at the same time, to maintain social trust, professional discipline, and moral responsibility.

For this reason, within the framework of this study, there arises a need to develop a scientific and analytical model of life competencies as a **meta-competency framework** that integrates physical endurance, psycho-emotional regulation, moral responsibility, professional resilience, and the capacity to act under conditions of scarcity, conceptualising it as a **supra-systemic category of vital security** [6; 4].

The first logical block of the problem is associated with the **physical-vital dimension** of human functioning under conditions of prolonged energy collapse, which, in wartime, is intensified by additional risk factors, including the need for rapid relocation to shelters, disruption of sleep patterns due to air raid alerts, and physical exhaustion resulting from prolonged stress.

This refers to the body's capacity to adapt to decreased temperatures in residential and working environments, a lack of adequate lighting, limited access to water, and disruptions in nutrition and recovery routines. In this context, physical preparedness should not be reduced to athletic endurance; rather, it is understood as a fundamental life competency that includes the ability to rationally allocate energy, maintain a basic level of physical condition, avoid hypothermia and overexertion, prevent injuries in darkness or during forced movement, and ensure minimal conditions for bodily safety.

Failure to adapt at this level results in rapid exhaustion, reduced work capacity, and an increased risk of illness, which renders the fulfilment of professional responsibilities impossible and undermines the overall viability of the individual, thereby creating the preconditions for vital vulnerability [9; 5].

The second logical block of the problem encompasses the **psychological and mental dimension** of life competencies, which, under conditions of systemic energy collapse and wartime threat, acquires critical significance. Chronic

uncertainty, disruption of habitual life rhythms, lack of control over events, and the constant threat of repeated outages, air raid alerts, and attacks give rise to a state of prolonged psycho-emotional strain.

Under such conditions, psychological resilience ceases to be an abstract characteristic and becomes a practical capacity of the individual to maintain inner balance, regulate emotional responses, prevent panic, apathy, or aggressive breakdowns, and sustain the ability to engage in purposeful activity. Mental health should be understood as an integral capacity to maintain cognitive clarity, emotional stability, and motivation for action even in the absence of comfortable conditions, as well as the ability to preserve meaning-oriented frameworks and prevent the degradation of personal autonomy [5; 9].

Within the European competence-based approach, the importance of internal resilience, as well as the ability to manage uncertainty and stress, is explicitly recognised as part of personal and social competence; however, in the Ukrainian context, these capacities undergo particularly intensive practical testing. Volitional qualities, self-discipline, and the capacity for self-regulation become decisive factors that enable the individual to maintain their life trajectory and preserve readiness for the responsible fulfilment of professional functions under conditions of multidimensional exhaustion [1; 5].

The third logical block of the problem is associated with **cognitive-orientational competencies**, which, under conditions of blackouts and wartime threats, acquire particular significance due to the combination of information scarcity with information overload and manipulative influences. Disruptions of established communication channels, limited access to official information, instability of communication networks, as well as the spread of rumours and anxiety-inducing messages, create a situation in which the ability to orient oneself in time, space, and events becomes a critically necessary competency.

This involves not only physical orientation in darkness, in public spaces, or during movement to shelters, but also the cognitive capacity to correlate incoming information with reality, distinguish reliable data from manipulation, make well-informed decisions under conditions of uncertainty, and maintain rational judgement in critical situations [1; 6].

The ability to think critically, make decisions, overcome difficulties, and manage information is directly aligned with the European understanding of lifelong learning competencies; however, the Ukrainian context demonstrates that these abilities perform not only an educational but also a vital-security function. Within the sphere of professional activity, cognitive-orientational competencies ensure the capacity to maintain effectiveness, organise working time under unstable conditions, sustain reliable communication with colleagues and clients, and avoid errors caused by stress and information deficits [1; 4].

The fourth logical block of the problem concerns the **moral-value and ethical-professional dimension** of life competencies, which, in the context of war, acquires particular acuteness due to the risks of moral fatigue, social frustration, a decline in levels of trust, and the temptation to justify behaviour through a "survival mode" rationale. Under conditions of prolonged energy collapse and resource scarcity, the likelihood of moral disorientation, interpersonal conflict, violations of norms of mutual respect and mutual support, as well as the erosion of professional ethics, significantly increases [6; 3].

In this context, the moral and professional qualities of the individual should be conceptualised as a key element of **vital security**, determining the boundaries of acceptable behaviour under conditions of constraint, while at the same time ensuring the preservation of human dignity, social trust, and professional reputation. Moral responsibility, in this regard, manifests itself in the capacity to act with integrity in the absence of external control, to fulfil obligations, to refrain

from shifting responsibility for one's decisions onto circumstances, and to sustain cooperation and solidarity, which are critical for community resilience [4; 6].

The importance of attitudes such as cooperation, perseverance, integrity, as well as the willingness to overcome prejudice and seek compromise, is explicitly emphasised within the European understanding of social competence. This provides grounds for interpreting moral-professional qualities not as a secondary "ethical superstructure," but as a core component of practical life preservation in conditions of crisis.

The fifth logical block of the problem encompasses **professional-functional competencies** of the individual, which ensure the capacity to perform work-related responsibilities under crisis conditions. Prolonged blackouts significantly transform working conditions, complicating the organisation of working time, access to technical resources, and communication processes, while also creating new risks for the quality and safety of professional performance.

During the period of martial law, these challenges are often intensified by the need to respond to air raid alerts, interrupt work processes due to the threat of attacks, and combine professional responsibilities with caregiving functions and the provision of basic life-support needs for the family [2; 8].

Under such circumstances, professional responsibility acquires a renewed meaning, combining the requirement for performance outcomes with the need to adapt work processes to conditions of resource scarcity, while simultaneously preserving professional dignity and ethical standards under increased workload. The ability to maintain work capacity, plan activities under conditions of instability, adhere to labour discipline, and ensure an acceptable quality of outcomes becomes an indicator of both personal and professional maturity [4; 1].

Within this analytical framework, competencies of self-management, effective time and information management, internal resilience, as well as the ability to manage one's learning and career development—identified as

components of personal and social competence within the European framework – acquire, for Ukrainian workers, a distinctly practical dimension as instruments for maintaining professional functionality under conditions of blackouts / energy collapse.

A distinct component of the problem statement concerns the issue of the **institutionalisation of vitality and vital security** within the lifelong educational process of each individual as a mechanism for the transmission of life competencies. The European logic of key competencies is grounded in the premise that education and training should ensure the fullest possible development of each individual's potential, while states are encouraged to support high-quality education, schooling, vocational training, and continuous lifelong learning.

In the Ukrainian context of martial law, this principle acquires additional significance: education must encompass not only academic knowledge, but also life competencies related to self-preservation, psychological resilience, moral responsibility, and professional functionality under conditions of vital-crisis situations [1; 10].

Vital competence, as a supra-systemic category, may be conceptualised as a **meta-competency framework** capable of integrating physical endurance, psycho-emotional regulation, moral responsibility, professional resilience, and the capacity to act under conditions of scarcity, thereby ensuring not only adaptation to risk, but also the preservation of dignity, autonomy, and social reliability [4; 6].

In this regard, the Ukrainian experience of prolonged blackouts and wartime threats may be conceptualised as a practical basis for the development of recommendations within a broader European context, particularly with respect to preparing populations for crisis modes of life activity, enhancing individual and collective resilience, and strengthening self-preservation competencies under conditions of large-scale infrastructural disruption associated with prolonged interruptions in energy supply, water provision, heating, communication, and the

functioning of other vital systems that ensure the basic conditions of human existence and socio-professional activity [2; 3].

In this study, blackout is not treated as an end in itself or as the sole object of analysis, but rather as a representative example of **vital-crisis practice** that reveals a systemic need for an integrated model of individual life competencies capable of preserving vitality and professional functionality under prolonged conditions of resource scarcity and security threats, which, in its comprehensive manifestation, may be described as energy collapse [4; 9].

Thus, the formulation of the problem enables the development of a scientific and analytical model of **individual life competencies** capable of sustaining vitality and professional functionality under conditions of prolonged blackouts and related wartime infrastructural risks. This model is grounded in the integration of physical-vital, psychological, cognitive-orientational, moral-professional, and professional-functional components, complemented by an educational mechanism for the transmission and consolidation of these competencies throughout the lifespan.

Taken together, these components form the foundation of life preservation as a conscious, responsible, and socially significant process that ensures not only the reduction of vital vulnerability, but also the preservation of human dignity, professional reliability, and the resilience of communities in situations of multidimensional threats [4; 3].

Conclusions and Recommendations. As a result of the conducted scientific and analytical inquiry, it has been established that prolonged energy collapse in wartime and post-crisis environments should be understood not merely as an infrastructural failure, but as a multidimensional *vital-crisis condition* that simultaneously affects the physical conditions of existence, psycho-emotional balance, moral-value orientation, and professional functionality of the individual [3; 9].

In the Ukrainian context, energy collapse acquires particular intensity due to its overlap with air raid alerts, missile and drone attacks, threats to critical infrastructure, and the recurring nature of instability regimes, which leads to the formation of life competencies primarily not at the theoretical level, but through the practice of everyday self-preservation.

This experience demonstrates that **vital competencies** emerge as a form of applied knowledge-in-action that integrates survival skills, self-regulation, and the maintenance of socio-professional reliability, rather than as an abstract declaration of resilience [10; 5].

The obtained findings make it possible to substantiate the thesis that **individual vital competencies** constitute a key resource for the preservation of vitality, professional responsibility, and life sustainability under conditions of prolonged energy collapse, as well as to justify an integrated model of competencies that ensures both human viability and professional functionality in vital-crisis situations [4; 1].

The proposed model is meta-competency in nature and is structured around five interrelated components:

(1) **physical-vital competencies** (adaptation to cold, lack of adequate lighting, and limited access to water; maintenance of bodily safety; prevention of exhaustion);

(2) **psychological and mental competencies** (self-regulation, stress management, preservation of motivation and cognitive clarity);

(3) **cognitive-orientational competencies** (critical thinking, correlating information with reality, navigation in time, space, and events, decision-making under conditions of limited data);

(4) **moral-professional competencies** (ethical responsibility, professional integrity, social trust, and solidarity under conditions of resource scarcity);

(5) **professional-functional competencies** (adaptation of work processes, discipline, maintenance of work quality, and preservation of professional dignity under conditions of instability).

Taken together, these components form **vital competence** as a supra-systemic category that integrates physical endurance, psycho-emotional regulation, moral responsibility, professional resilience, and the capacity to act under conditions of scarcity.

Within the framework of European competence frameworks, it is substantiated that the Ukrainian experience of prolonged energy collapse and wartime infrastructural impacts objectively complements the competence-based approach, as it demonstrates practical scenarios for which frameworks developed under conditions of relative stability require further refinement and crisis-oriented "profiling" [1; 2].

The European understanding of key competencies as a combination of knowledge, skills, and psychological dispositions developed through formal, non-formal, and informal lifelong learning provides a methodological foundation for integrating components of **vital security** and practical preparedness for prolonged crises into educational policies [1; 3].

It is particularly important that, within the domain of personal and social competence, the need for resilience and the capacity to act under conditions of uncertainty and stress is explicitly articulated, with emphasis placed on effective time and information management, internal self-regulation, and the ability to manage one's own educational and professional trajectory—elements which, under conditions of energy collapse, are transformed from the domain of "useful skills" into determinants of life preservation.

On the basis of the foregoing, it is appropriate to formulate the following proposals.

First, for Ukraine, as well as for the European Union taking into account the Ukrainian empirical experience, it is advisable, at the level of national, regional, and institutional education and security policy, to institutionalise **vitality and vital security** as a practice-oriented, interdisciplinary component of lifelong learning, which should be integrated into school education, vocational training, corporate programmes, and civic education [1; 10]. The content of such a component should encompass: basic self-preservation algorithms (water, heat, nutrition, sleep, hygiene), psycho-emotional self-regulation under conditions of threat, practices of critical thinking and information hygiene, ethical standards of behaviour under conditions of resource scarcity, as well as the organisation of work under conditions of systemic infrastructural instability.

Second, it is advisable to develop a standardised **"profile of vital competence"** as a set of learning outcomes for different age and professional groups, which would enable the assessment of the formation of key elements of life preservation and professional functionality under crisis conditions [1; 4].

Third, it is necessary to establish mechanisms for supporting non-formal and informal learning that spontaneously emerges in crisis contexts through methodological guidelines, certification modules, and the training of educators and trainers, since in Ukraine the high effectiveness of **"learning through crisis"** has been empirically demonstrated and therefore requires scientific systematisation and broader dissemination [3; 10].

Fourth, within the context of European Union policies, it appears appropriate to develop a set of **competence-oriented recommendations** aimed at enhancing population preparedness for wartime infrastructural challenges, drawing on the Ukrainian practical experience of overcoming systemic crises. Within the structure of these recommendations, **energy collapse** should be defined as one of the baseline stress scenarios characterised by a deficit of essential life-support resources [2; 3].

The content of such recommendations should include: the development of resilience and coping skills for managing uncertainty and stress; the advancement of practices for effective time management and the regulation of information flows; the reinforcement of the capacity for critical thinking and decision-making under conditions of limited data; and the strengthening of moral-value foundations of social trust, cooperation, and integrity, which ensure the capacity of communities for coordinated and solidarity-based interaction under crisis conditions.

The proposed logic for structuring these recommendations makes it possible to utilise response models developed in Ukraine as a source of empirically validated practices and instructional case studies for assessing the effectiveness of competencies in situations of prolonged resource constraint.

Fifth, it is proposed to consider the inclusion, within European lifelong learning policies, of a distinct cross-sectoral domain provisionally defined as **"vital security and life preservation in vital-crisis situations,"** which would integrate educational, social, medical-psychological, and civil security components [1; 9].

Such a domain is logically aligned with the overarching objective of the competence-based approach – to ensure the full realisation of individual potential and to support systems of education and lifelong learning—while at the same time complementing them with practical dimensions of crisis preparedness.

Within this domain, it is advisable to develop adaptive modules tailored to different professional sectors (public administration, healthcare, education, critical services, business), given that professional responsibility in crisis conditions is not merely a legal requirement, but also a function of the individual's internal resources and moral-professional qualities.

Overall, the formulated conclusions and proposals confirm that energy collapse – as a representative example of prolonged infrastructural disruption in a

wartime environment—reveals the necessity of reorienting research and practice from post hoc response towards the preventive formation of life competencies within the framework of **vital security**.

On this basis, the integrated model of competencies substantiated in this article provides grounds for interpreting life preservation not as a situational response, but as a systemic capacity of individuals and communities to sustain vitality, dignity, and professional functionality under conditions of prolonged vital-crisis situations [4; 6].

References:

1. Council Recommendation of 22 May 2018 on key competences for lifelong learning (2018/C 189/01) // Official Journal of the European Union. 2018. C 189. P. 1–13. [Електронний ресурс]. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:C:2018:189:TOC (дата звернення: 13.04.2026).

2. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC // Official Journal of the European Union. 2022. L 333. P. 164–198. [Електронний ресурс]. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj (дата звернення: 13.04.2026).

3. Glenn H., Nichols D. Blackouts and alcohol use: a conceptual review // Substance Abuse Treatment, Prevention, and Policy. 2024. Vol. 19. Art. № 47. [Електронний ресурс]. URL: https://substanceabusepolicy.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13011-024-00607-5 (дата звернення: 13.04.2026).

4. Health Emergency and Disaster Risk Management (Health-EDRM) Framework // UNDRR. 2019. [Електронний ресурс]. URL: https://www.undrr.org/publication/health-emergency-and-disaster-risk-management-health-edrm-framework (дата звернення: 13.04.2026).

5. Human Development Report 1994: New Dimensions of Human Security. New York : Oxford University Press for UNDP, 1994. 189 p.

6. IASC Guidelines on Mental Health and Psychosocial Support in Emergency Settings. Geneva : IASC, 2007. 80 p. [Електронний ресурс]. URL: https://interagencystandingcommittee.org/system/files/legacy_files/IASC%20Manual%20MHPSS%20in%20emergencies%20eng-1.pdf (дата звернення: 13.04.2026).

7. ISO 22316:2017. Security and resilience — Organizational resilience — Principles and attributes. Geneva : ISO, 2017. 12 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/63082.html (дата звернення: 13.04.2026).

8. Resilient Hospitals: Hospitals and Power Outages (scenario-based / preparedness perspective) // International Journal of Emergency Services. 2011. Vol. 4, iss. 2. P. 124–139. [Електронний ресурс]. URL: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJES-05-2015-0028/full/html (дата звернення: 13.04.2026).

9. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva : UNDRR, 2015. 25 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030 (дата звернення: 13.04.2026).

10. Ящук П. В. Вітальна безпека вразливих верств населення в умовах загроз терористичного характеру та інших форм насильства : практичний порадник. Вінниця : ТОВ «Твори», 2025. 104 с.

Чередниченко Володимир Анатолійович, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій управління, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-5208-3110

Cherednychenko Volodymyr, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Integrated Management Technologies, Polytechnic National University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-5208-3110

АНАЛІТИЧНИЙ МАРКЕТИНГ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

ANALYTICAL MARKETING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Анотація. У статті досліджено трансформацію стратегічного маркетингового аналізу в умовах цифровізації через інтеграцію штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання. Обґрунтовано перехід від ретроспективних підходів до проактивних аналітичних моделей. На основі праць із Scopus та Web of Science систематизовано ключові напрями застосування ШІ: поведінкова сегментація, моделювання customer journey, автоматизований моніторинг конкурентів та сценарне прогнозування ринку.

Приділено увагу ризикам упровадження AI-інструментів (алгоритмічна упередженість, проблема «чорної скриньки», етичність використання даних) та методологічним прогалинам інтеграції ШІ в маркетингову стратегію. Описано практичний досвід аналітики в e-commerce, ритейлі та фінтех-секторі. Доведено, що ШІ виконує системоутворюючу функцію, пов’язуючи інсайти з ROI та конкурентоспроможністю. Ефективність підходу

досягається лише за умови синергії алгоритмів з експертизою та стратегічним мисленням менеджменту.

Ключові слова: маркетинг, цифрове середовище, маркетинговий аналіз, штучний інтелект, машинне навчання, аналітика даних.

Abstract. This article provides a comprehensive theoretical and methodological investigation into the fundamental transformation of strategic marketing analysis within the contemporary digital environment, driven by the rapid integration of artificial intelligence (AI) technologies and machine learning algorithms. The author addresses a critical systemic challenge faced by modern enterprises: the explosive growth of available digital marketing data coupled with the decreasing efficiency of traditional, retrospective market research tools that fail to handle real-time market dynamics, consumer fragmentation, and extreme information saturation. By reviewing peer-reviewed academic literature indexed in prominent global databases like Scopus and Web of Science, the study synthesizes contemporary scientific approaches to AI-driven data analytics in strategic management. It systematically categorizes the core functional domains where AI operates not merely as an isolated technical tool, but as a strategic organizational capability that establishes sustainable, long-term competitive advantages in a digitized economy.

The research demonstrates that machine learning models fundamentally revolutionize consumer behavior analysis by shifting from static demographic segmentation to dynamic, multidimensional behavioral and psychographic profiling, which enables precise mapping of complete customer journeys and predictive modeling of customer responses to marketing stimuli. In the realm of competitive intelligence, AI architectures introduce automated, continuous monitoring of competitors' pricing actions, product portfolio adjustments, and communication campaigns, effectively replacing rigid positioning matrices with highly agile, dynamic strategic maps. Furthermore, the predictive capacity of

neural networks and advanced algorithms elevates forecasting from historic descriptive statistics into complex, proactive scenario planning that adapts to unexpected macro-environmental shifts and minimizes operational risks.

The article firmly concludes that achieving optimal analytical efficacy requires a balanced, synergistic combination of advanced automated data processing capabilities and deeply seasoned human managerial expertise, ensuring long-term resilience, strategic flexibility, and sustainable corporate growth in the digital economy.

Keywords: marketing, digital environment, marketing analysis, artificial intelligence, machine learning, data analytics.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку економіки характеризується масштабною цифровізацією бізнес-процесів, зростанням ролі інформаційних технологій та активним використанням даних у системі управління підприємствами. За цих умов маркетинг як функціональна складова управління зазнає суттєвих трансформацій, оскільки традиційні підходи до аналізу ринку, споживчої поведінки та конкурентного середовища дедалі частіше виявляються недостатніми для обґрунтування стратегічних рішень. Особливої актуальності набуває необхідність адаптації стратегічного маркетингового аналізу до умов цифрового середовища, що характеризується високою динамічністю, інформаційною насиченістю та невизначеністю.

Таким чином, дослідження стратегічного маркетингового аналізу в цифровому середовищі з використанням штучного інтелекту є актуальним як з теоретичного, так і з практичного погляду, оскільки спрямоване на вирішення ключових проблем адаптації маркетингового управління до умов цифрової економіки та підвищення результативності діяльності підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика стратегічного маркетингового аналізу в умовах цифрового середовища останніми роками набула широкого висвітлення у зарубіжних наукових дослідженнях, індексованих у базах Scopus та Web of Science. У центрі уваги дослідників перебувають питання трансформації маркетингових функцій під впливом цифровізації, зростання ролі великих даних та інтеграції технологій штучного інтелекту в систему стратегічного управління підприємством.

У концептуальних працях з маркетингової теорії штучний інтелект розглядається як чинник переходу від традиційного до аналітико-орієнтованого та клієнтоцентричного стратегічного маркетингу. Зокрема, в дослідженнях акцентується на тому, що використання інтелектуальних алгоритмів дозволяє автоматизувати значну частину аналітичних процедур та підвищити обґрунтованість рішень у процесі сегментації, таргетингу та позиціонування. У цьому контексті штучний інтелект трактується не лише як інструмент, а як стратегічна організаційна здатність, що формує довгострокові конкурентні переваги [1].

Значний масив наукових публікацій присвячено питанням маркетингової аналітики в умовах цифрового середовища. Дослідники відзначають, що ключовою відмінністю сучасного маркетингового аналізу є використання великих обсягів реальних поведінкових даних, які формуються в онлайн-каналах взаємодії зі споживачами. Саме ці дані стають основою для побудови прогностичних моделей попиту, оцінювання життєвої цінності клієнтів і моделювання споживчих шляхів [2].

Окремий напрям досліджень зосереджений на аналізі споживчої поведінки в цифровому середовищі з використанням алгоритмів машинного навчання. У працях наголошується, що інтелектуальні аналітичні системи дозволяють перейти від традиційної демографічної сегментації до глибинної поведінкової та психографічної сегментації, що значно підвищує точність

маркетингових прогнозів. При цьому стратегічний маркетинговий аналіз набуває персоналізованого характеру, що відповідає сучасним тенденціям розвитку ринку [3, 4, 5].

У межах конкурентного аналізу дослідники акцентують увагу на зростанні прозорості цифрових ринків та можливостях автоматизованого моніторингу діяльності конкурентів. У наукових працях зазначається, що технології штучного інтелекту розширюють межі класичного конкурентного аналізу, забезпечуючи безперервне відстеження змін у ціноутворенні, асортиментній політиці та комунікаційній активності конкурентів [5, 6]. Це створює основу для формування динамічних стратегічних моделей позиціонування у цифровому середовищі [1, 5, 6].

Важливим напрямом досліджень є також прогностичний та сценарний аналіз у стратегічному маркетингу. У науковій літературі наголошується, що традиційні методи прогнозування дедалі частіше поступаються місцем інтелектуальним моделям, здатним обробляти складні нелінійні залежності та враховувати вплив зовнішніх факторів. Використання штучного інтелекту, за висновками дослідників, сприяє підвищенню адаптивності стратегічних маркетингових рішень в умовах нестабільного середовища [6, 7, 8].

Водночас у наукових публікаціях порушуються питання обмежень застосування штучного інтелекту в маркетинговому аналізі. Серед основних проблем називаються ризики алгоритмічної упередженості, складність інтерпретації результатів моделей, а також етичні аспекти використання персональних даних [9, 10]. Це підтверджує необхідність поєднання інтелектуальних аналітичних інструментів із класичними методами стратегічного аналізу та управлінською експертизою [10].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про формування стійкого наукового інтересу до проблеми стратегічного

маркетингового аналізу в цифровому середовищі з використанням штучного інтелекту. Разом з тим недостатньо систематизованими залишаються питання методологічної інтеграції інтелектуальних аналітичних систем у стратегічне управління маркетингом підприємств, що зумовлює доцільність подальших досліджень у цьому напрямі.

Метою статті є теоретико-методологічне обґрунтування ролі, функцій та напрямів використання штучного інтелекту в системі стратегічного маркетингового аналізу підприємств у цифровому середовищі, а також визначення його впливу на підвищення обґрунтованості стратегічних і інвестиційно орієнтованих управлінських рішень, формування стійких конкурентних переваг і забезпечення довгострокового розвитку бізнесу в умовах цифрової економіки.

Виклад основного матеріалу. Маркетинговий аналіз у цифровому середовищі зазнає суттєвих трансформацій під впливом розвитку інформаційних технологій та зростання ролі даних у процесах управління. Традиційні підходи до аналізу ринку, які ґрунтувалися переважно на вибіркових дослідженнях, статистичних узагальненнях і ретроспективній оцінці результатів діяльності, в умовах цифрової економіки поступово втрачають свою ефективність. Це зумовлено високою динамічністю ринкових процесів, фрагментацією споживчого попиту та зростанням конкуренції в глобальному цифровому просторі. У цьому контексті штучний інтелект виступає ключовим інструментом поглиблення стратегічного маркетингового аналізу, оскільки дозволяє обробляти значні обсяги структурованих і неструктурованих даних, виявляти приховані закономірності та формувати прогнози розвитку ринку в режимі, близькому до реального часу. Використання алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж і методів інтелектуальної аналітики забезпечує якісно новий рівень обґрунтованості стратегічних маркетингових рішень.

Одним із ключових напрямів застосування штучного інтелекту є стратегічний аналіз споживчої поведінки. Цифрове середовище формує унікальну інформаційну базу, яка включає поведінкові дані користувачів, історію транзакцій, взаємодію зі цифровими каналами комунікації, а також контент, створений споживачами. На відміну від класичних методів сегментації, інтелектуальні алгоритми дозволяють здійснювати багатовимірну та динамічну сегментацію ринку з урахуванням індивідуальних характеристик споживачів.

Застосування штучного інтелекту в аналізі споживчої поведінки дає змогу моделювати повні споживчі шляхи (customer journey), ідентифікувати ключові точки взаємодії з брендом і прогнозувати ймовірну реакцію клієнтів на маркетингові стимули. У стратегічному аспекті це сприяє формуванню персоналізованих ціннісних пропозицій та підвищенню довгострокової клієнтської цінності, що є важливим чинником конкурентоспроможності підприємства.

Окрему роль у стратегічному маркетинговому аналізі відіграє прогностична функція штучного інтелекту. Алгоритми машинного навчання дають змогу будувати складні прогностичні моделі попиту, оцінювати життєвий цикл продуктів та прогнозувати ефективність альтернативних стратегічних рішень. На відміну від традиційних методів прогнозування, інтелектуальні моделі враховують не лише історичні дані, а й поточні ринкові сигнали, що підвищує точність передбачень. Застосування прогностичного та сценарного аналізу на основі штучного інтелекту сприяє трансформації стратегічного маркетингового аналізу з ретроспективного інструменту оцінювання результатів у проактивний механізм управління майбутнім розвитком підприємства. Це особливо важливо в умовах нестабільного економічного середовища та високих інвестиційних ризиків.

Водночас інтеграція штучного інтелекту в систему стратегічного маркетингового аналізу потребує врахування низки обмежень і ризиків. Серед них — якість і релевантність даних, ризики алгоритмічної упередженості, складність інтерпретації результатів інтелектуальних моделей, а також етичні аспекти використання персональних даних споживачів. Тому ефективний стратегічний маркетинговий аналіз у цифровому середовищі має ґрунтуватися на поєднанні аналітичних можливостей штучного інтелекту з управлінською експертизою та стратегічним баченням керівництва підприємства.

Практика провідних компаній свідчить, що інтеграція штучного інтелекту в систему стратегічного маркетингового аналізу дозволяє суттєво підвищити результативність управлінських рішень у цифровому середовищі. Найбільш поширеними сферами практичного застосування інтелектуальної аналітики є прогнозування попиту, аналіз споживчої поведінки, управління взаємовідносинами з клієнтами та оптимізація маркетингових стратегій у конкурентному середовищі.

Так, у практиці електронної комерції алгоритми машинного навчання активно використовуються для аналізу великих масивів поведінкових даних споживачів. На основі інформації про перегляди, покупки, час взаємодії з контентом та реакцію на маркетингові стимули формуються персоналізовані рекомендаційні моделі. У стратегічному вимірі це дозволяє компаніям не лише підвищувати короткострокові показники продажів, а й формувати довгострокову клієнтську лояльність, що безпосередньо впливає на інвестиційну привабливість бізнесу.

Практичний інтерес становить також використання штучного інтелекту у стратегічному конкурентному аналізі. У цифровому середовищі інтелектуальні системи здійснюють автоматизований моніторинг цінових стратегій конкурентів, змін у продуктових лінійках та комунікаційної

активності в онлайн-каналах. Отримані аналітичні результати дозволяють оперативно коригувати власне стратегічне позиціонування, що знижує рівень стратегічних ризиків і підвищує адаптивність підприємства.

У фінансовому та інвестиційному контексті штучний інтелект використовується для оцінювання ефективності маркетингових стратегій і прогнозування їхнього впливу на фінансові показники. Інтелектуальні аналітичні моделі дозволяють пов’язувати маркетингові індикатори з показниками прибутковості, рентабельності інвестицій та вартості бізнесу. Таким чином стратегічний маркетинговий аналіз трансформується на інструмент, що безпосередньо підтримує інвестиційні рішення.

У практиці підприємств сфери послуг застосування штучного інтелекту сприяє стратегічному управлінню клієнтським досвідом. Аналіз текстових відгуків, соціальних мереж і звернень клієнтів дозволяє виявляти ключові фактори задоволеності та незадоволеності споживачів. Використання таких аналітичних інсайтів у стратегічному маркетингу забезпечує підвищення якості сервісу та зміцнення ринкових позицій підприємства.

Наведені приклади практики підтверджують, що штучний інтелект у стратегічному маркетинговому аналізі виконує не допоміжну, а системоутворюючу функцію. Його використання дозволяє підприємствам формувати більш обґрунтовані, гнучкі та інвестиційно орієнтовані маркетингові стратегії, що відповідають вимогам цифрової економіки.

Висновки. У процесі дослідження стратегічного маркетингового аналізу в цифровому середовищі з використанням штучного інтелекту отримано такі основні висновки.

1. Встановлено, що цифровізація економіки зумовлює кардинальну трансформацію традиційних підходів до стратегічного маркетингового аналізу. Зростання обсягів доступних маркетингових даних, підвищення динамічності ринкових процесів та загострення конкурентної боротьби

обмежують ефективність класичних аналітичних інструментів і потребують впровадження інтелектуальних аналітичних систем.

2. Обґрунтовано, що штучний інтелект виступає ключовим інструментом підвищення аналітичних можливостей стратегічного маркетингу, забезпечуючи обробку великих масивів структурованих і неструктурованих даних, виявлення прихованих закономірностей та формування прогностичних моделей розвитку ринку. Це дозволяє підвищити обґрунтованість стратегічних маркетингових рішень у цифровому середовищі.

3. Доведено, що використання штучного інтелекту в аналізі споживчої поведінки сприяє переходу від агрегованої сегментації до індивідуалізованих клієнтських стратегій. Моделювання споживчих шляхів та прогнозування поведінкових реакцій клієнтів створюють передумови для формування довгострокової клієнтської цінності та зміцнення конкурентних позицій підприємств.

4. Визначено, що інтеграція інтелектуальної аналітики у конкурентний аналіз дозволяє підприємствам здійснювати безперервний моніторинг ринкового середовища та оперативно адаптувати стратегії позиціонування. Перехід від статичних до динамічних моделей стратегічного аналізу знижує рівень стратегічних ризиків та підвищує інвестиційну привабливість бізнесу.

5. Установлено, що застосування штучного інтелекту у прогностичному та сценарному аналізі сприяє трансформації стратегічного маркетингового аналізу з ретроспективного інструменту оцінювання в проактивний механізм управління майбутнім розвитком підприємства. Це є особливо важливим в умовах нестабільності економічного середовища та зростання інвестиційних ризиків.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує, що стратегічний маркетинговий аналіз у цифровому середовищі з використанням штучного

інтелекту є важливим чинником підвищення ефективності маркетингового та інвестиційного управління підприємствами та створює передумови для їх сталого розвитку в умовах цифрової економіки.

Список використаних джерел

1. Huang M.-H., Rust R. T. A strategic framework for artificial intelligence in marketing // *Journal of the Academy of Marketing Science*. – 2021. – Vol. 49, No. 1. – P. 30–50.DOI: 10.1007/s11747-020-00749-9.

2. Vlačić B., Corbo L., Costa e Silva S., Dabić M. The evolving role of artificial intelligence in marketing: A review and research agenda // *Journal of Business Research*. – 2021. – Vol. 128. – P. 187–203.DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.01.055.

3. Ziakis C., Vlachopoulou M. Artificial intelligence in digital marketing: Insights from a comprehensive review // *Information*. – 2023. – Vol. 14, No. 12. – Article 664.DOI: 10.3390/info14120664.

4. Verma S., Sharma R., Deb S., Maitra D. Artificial intelligence in marketing: Systematic review and future research directions // *International Journal of Information Management: Data Insights*. – 2021. – Vol. 1. – Article 100002.DOI: 10.1016/j.jjimei.2020.100002.

5. Chintalapati S., Pandey S. Artificial intelligence in marketing: A systematic literature review // *International Journal of Market Research*. – 2022. – Vol. 64, No. 1. – P. 3–68.DOI: 10.1177/14707853211018428.

6. Koubaa H., Ben Said F. Marketing strategy and artificial intelligence: State of the art and research agenda // *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – P. 538–574.

7. Wang J., Yu L. Application and practice of artificial intelligence in marketing strategy // *Discover Artificial Intelligence*. – 2025. – Vol. 5. – Article 103.DOI: 10.1007/s44163-025-00346-1.

8. Pu Y., Li H., Hou W., Pan X. The analysis of strategic management decisions and corporate competitiveness based on artificial intelligence // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 17942.DOI: 10.1038/s41598-025-02842-x.

9. Ribeiro A., López Rivero A. J., Abrantes J. L. The impact of artificial intelligence on consumer behavior towards brands: A systematic review // *Electronic Commerce Research*. – 2025.DOI: 10.1007/s10660-025-10063-7.

10. Theodorakopoulos L., Theodoropoulou A., Klavdianos C. Big data analytics and AI for consumer behavior in digital marketing // *Big Data and Cognitive Computing*. – 2026. – Vol. 10, No. 2. – Article 46.DOI: 10.3390/bdcc10020046.

References

1. Huang M.-H., Rust R. T. A strategic framework for artificial intelligence in marketing // *Journal of the Academy of Marketing Science*. – 2021. – Vol. 49, No. 1. – P. 30–50.DOI: 10.1007/s11747-020-00749-9.

2. Vlačić B., Corbo L., Costa e Silva S., Dabić M. The evolving role of artificial intelligence in marketing: A review and research agenda // *Journal of Business Research*. – 2021. – Vol. 128. – P. 187–203.DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.01.055.

3. Ziakis C., Vlachopoulou M. Artificial intelligence in digital marketing: Insights from a comprehensive review // *Information*. – 2023. – Vol. 14, No. 12. – Article 664.DOI: 10.3390/info14120664.

4. Verma S., Sharma R., Deb S., Maitra D. Artificial intelligence in marketing: Systematic review and future research directions // *International Journal of Information Management: Data Insights*. – 2021. – Vol. 1. – Article 100002.DOI: 10.1016/j.jjimei.2020.100002.

5. Chintalapati S., Pandey S. Artificial intelligence in marketing: A systematic literature review // *International Journal of Market Research*. – 2022. – Vol. 64, No. 1. – P. 3–68.DOI: 10.1177/14707853211018428.

6. Koubaa H., Ben Said F. Marketing strategy and artificial intelligence: State of the art and research agenda // *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – P. 538–574.

7. Wang J., Yu L. Application and practice of artificial intelligence in marketing strategy // *Discover Artificial Intelligence*. – 2025. – Vol. 5. – Article 103.DOI: 10.1007/s44163-025-00346-1.

8. Pu Y., Li H., Hou W., Pan X. The analysis of strategic management decisions and corporate competitiveness based on artificial intelligence // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 17942.DOI: 10.1038/s41598-025-02842-x.

9. Ribeiro A., López Rivero A. J., Abrantes J. L. The impact of artificial intelligence on consumer behavior towards brands: A systematic review // *Electronic Commerce Research*. – 2025.DOI: 10.1007/s10660-025-10063-7.

10. Theodorakopoulos L., Theodoropoulou A., Klavdianos C. Big data analytics and AI for consumer behavior in digital marketing // *Big Data and Cognitive Computing*. – 2026. – Vol. 10, No. 2. – Article 46.DOI: 10.3390/bdcc10020046.

Корбут Денис, науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна, https//orcid.org/0009-0007-5160-0136

Korbut Denys, researcher at the Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine, https//orcid.org/0009-0007-5160-0136

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВІДБОРУ ОЗНАК У ЗАДАЧАХ БАГАТОКЛАСОВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ КІБЕРАТАК З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF FEATURE SELECTION IN MULTI-CLASS CYBERATTACK CLASSIFICATION PROBLEMS USING MACHINE LEARNING: A SYSTEMATIC ANALYSIS OF METHODS AND TECHNOLOGIES

Анотація

Дослідження присвячено комплексному аналізу сучасних методів відбору ознак (feature selection) у задачах багатокласової класифікації кібератак. У роботі систематизовано шість основних категорій методів: filter-based, wrapper-based, embedded, метаевристичні, XAI-керовані та RL-керовані підходи. Проведено аналіз 31 наукової публікації 2022–2026 років, що демонструє еволюцію від класичних статистичних методів до гібридних AI-driven підходів. Особливу увагу приділено викликам багатокласової постановки: severe class imbalance, class-specific feature relevance та cross-feature effects. Досліджено 12 benchmark-датасетів від legacy (NSL-KDD) до

найсучасніших (GeNIS-2025, CICIoMT2024). Практичні рекомендації включають готовий technology stack та методологію валідації для production-grade систем. У контексті загроз наступного покоління (на прикладі Anthropic Mythos Preview) обґрунтовано критичність edge-deployable, interpretable та adversarially-robust feature selection для масштабованої кіберзахисту.

Ключові слова: вибір ознак, багатокласова класифікація, кібератаки, machine learning, NIDS, метаевристика, XAI, SHAP.

Abstract

This research presents a comprehensive analysis of contemporary feature selection methods in multiclass cyberattack classification tasks. The study systematizes six primary categories: filter-based, wrapper-based, embedded, metaheuristic, XAI-driven, and RL-driven approaches. Analysis of 31 scientific publications from 2022–2026 demonstrates evolution from classical statistical methods to hybrid AI-driven approaches. Special attention is given to multiclass challenges: severe class imbalance, class-specific feature relevance, and cross-feature effects. We examine 12 benchmark datasets from legacy (NSL-KDD) to state-of-the-art (GeNIS-2025, CICIoMT2024). Practical recommendations include a ready-to-use technology stack and validation methodology for production-grade systems. In the context of next-generation threats (exemplified by Anthropic Mythos Preview), we justify the criticality of edge-deployable, interpretable, and adversarially-robust feature selection for scalable cybersecurity.

Keywords: feature selection, multiclass classification, cyberattacks, machine learning, NIDS, metaheuristics, XAI, SHAP.

Постановка проблеми. Експоненціальне зростання кіберзагроз у

сучасному цифровому середовищі висуває критичні вимоги до систем виявлення вторгнень (Network Intrusion Detection Systems (далі – NIDS)). Особливу складність представляє багатокласова класифікація атак, де система повинна не лише детектувати аномальну активність, а й точно ідентифікувати тип атаки: DDoS, PortScan, Brute-force, Botnet, Infiltration, Web-attacks тощо.

Центральним викликом у побудові ефективних NIDS є відбір ознак (feature selection) – процес ідентифікації найбільш інформативних характеристик мережевого трафіку з великорозмірного простору ознак. Сучасні flow-based датасети містять від 41 (UNSW-NB15) до 78 (CICIDS-2017) ознак, що створює проблеми curse of dimensionality, особливо критичні для edge-deployment сценаріїв IoT/IIoT.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ранні роботи у сфері NIDS зосереджувалися на класичних filter-методах. Rehman et al. (2025) [1] продемонстрували ефективність Fisher Score, Mutual Information та Information Gain для IoMT-мереж, досягнувши F1-score до 97% на CICIoMT2024. Silva et al. (2025) [2] розширили цей підхід, комбінуючи п’ять filter-методів (Information Gain, Chi-Squared Test, Recursive Feature Elimination, Mean Absolute Deviation, Dispersion Ratio) для GeNIS-датасету.

Революційний напрямок 2024-2026 років – інтеграція Explainable AI у feature selection. Chen et al. (2024) [4] запропонували SHAP-based підхід для IoT NIDS, де Shapley values використовуються як критерій відбору ознак замість статистичних метрик. Wang et al. (2025) [5] розробили архітектуру з SHAP-guided pruning + knowledge distillation, яка зменшує модель на три порядки при збереженні macro-F1 > 0.986.

Fathi et al. (2025) [7] представили перший RL-driven feature selector, де агент максимізує reward = Δ(AUC) − penalty(subset_size). На RT-IoT2022 і Android Malware datasets алгоритм досягнув AUC 0.91-0.93 за 20

тренувальних епох, демонструючи потенціал автономної оптимізації feature subsets.

Мета статті. Представити систематичний аналіз сучасного стану методів feature selection у багатокласовій класифікації кібератак, базований на аналізі наукових публікацій 2022-2026 років та практичному досвіді впровадження production-grade NIDS у enterprise-середовищі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Аналіз поточного стану.

1.1 Таксономія методів:

Категорія	Основні методи	Характеристики
Filter-based	Fisher Score, MI, IG, Chi-Squared	Швидкі, model-agnostic, ігнорують feature interactions
Metaheuristic	GWO, PSO, WOA, HHO, GTO, гібриди	95-99% accuracy при 5-15 ознаках
XAI-driven	SHAP, LIME, Integrated Gradients	Інтерпретовані, class-specific patterns

1.2 Benchmark-датасети.

Аналіз показує еволюцію від legacy-датасетів (KDD99, NSL-KDD) до сучасних IoT/IIoT-орієнтованих наборів. CICIDS-2017 і UNSW-NB15 залишаються; gold standard; для порівняльного аналізу, проте нові датасети відображають реалістичніші сценарії:

– CICIoMT2024 − 18 типів атак на IoMT-пристрої, 19 класів включно з benign traffic;

– GeNIS (2025) − модульні сценарії для SME-організацій;

– ToN-IoT, BoT-IoT − edge-deployment focus;

– IEC 60870-5-104 − промислові протоколи OT/ICS.

1.3 Виклики багатокласової класифікації.

Severe class imbalance. У CICIDS-2017 Heartbleed становить <0.01% датасету, що робить класичні метрики (accuracy) неінформативними. Panda et al. (2025) [8] демонструють, що адаптивна feature selection з TF-IDF weighting покращує macro-F1 рідкісних класів з 0.84 до 0.94.

Cross-feature effects. Традиційні SHAP/LIME припускають feature independence, що неадекватно для multi-stage attacks. Lv et al. (2025) [9] адресують цю проблему через Decision Tree-enhanced Deep Attention Networks, які моделюють feature interactions експліцитно.

2. Методологічний фреймворк.

2.1 Production-ready pipeline.

Базуючись на аналізі 31 публікації та практичному досвіді, пропонується наступний technology stack для production-grade NIDS:

– Flow extraction: CICFlowMeter, Zeek/Bro для real-time обробки;

– Preprocessing: scikit-learn StandardScaler, imbalanced-learn SMOTE;

– Feature Selection: гібрид Mutual Information + XGBoost importance + SHAP global ranking;

– Classifiers: XGBoost (primary), LightGBM (backup), BiGRU+Attention (experimental);

– MLOps: MLflow для model versioning, Apache Spark для scale-out.

2.2 Валідаційна методологія.

Критично важливо виключити data leakage. Silva et al. (2025) [2] підкреслюють необхідність видалення features, що дозволяють інферити клас за топологією тестового середовища замість behavioral patterns.

Рекомендовані метрики: macro-F1 (основна), per-class precision/recall, inference latency (ms), model size (MB). Balanced accuracy ховає погану performance на мінорних класах і не підходить для baggage-critical security applications.

3. Майбутні виклики та перспективи.

3.1 Загрози наступного покоління.

Звіт Anthropic (7 квітня 2026 року) про Claude Mythos Preview демонструє quantum leap у automated vulnerability discovery. Модель автономно виявляє zero-day в OS/браузерах/VMM, включаючи 27-річний баг у OpenBSD SACK і пише повноцінні RCE-експлойти для FreeBSD NFS [10]. У 89% випадків експертна валідація підтвердила severity assessment моделі.

Це кардинально змінює operational context для NIDS: обсяг інцидентів зросте на порядок, patch window звузиться до годин, домінантним стане клас N-day exploitation. Feature selection pipeline має оптимізуватися не тільки за accuracy, а й за edge-deployment latency, MITRE ATT&CK mappability, adversarial robustness.

3.2 Технологічні пріоритети.

Edge-deployable architectures. Wang et al. (2025) [5] демонструють SHAP-guided pruning + knowledge distillation для отримання student-моделей, менших за teacher на три порядки при macro-F1 > 0.986 та inference latency 18–22 мс.

MITRE ATT&CK integration. Zhang et al. (2025) [11] розробили RADAR-X framework, що mapped кожну detection на ATT&CK tactic, SHAP-evidence summary та SOAR playbook trigger. Це essential для automated SOC workflows у high-volume incident environments.

Висновки. Дослідження виявило шість еволюційних етапів у feature selection для багатокласової класифікації кібератак: від filter-методів до AI-driven підходів. Ключові висновки:

1. Гібридні підходи (filter + metaheuristic + XAI) демонструють найкращий ROI у production environments.

2. XAI-driven selection стає mandatory для interpretable security operations.

3. Edge-deployment вимоги кардинально змінюють architecture trade-offs.

4. Майбутні LLM-генеровані загрози потребують adversarially-robust feature selection.

Рекомендується focus на practice-oriented досліджень: temporal robustness, concept drift adaptation, MITRE ATT&CK compliance, real-world adversarial testing. Академічна спільнота має переходити від benchmark-driven до deployment-driven evaluation protocols.

Список використаних джерел

1. Rehman, M. U., Kalakoti, R., & Bah¸si, H. (2025). Comprehensive Feature Selection for Machine Learning-Based Intrusion Detection in Healthcare IoMT Networks. Proceedings of ICISSP 2025, 248-259.

2. Silva, M., Pinto, D., Vitorino, J., Maia, E., Praça, I., Amorim, I., & Viamonte, M. J. (2025). Binary and Multiclass Cyberattack Classification on GeNIS Dataset. arXiv:2511.08660.

3. Abd Elaziz, M., et al. (2022). An Effective Feature Selection Model Using Hybrid Metaheuristic Algorithms for IoT Intrusion Detection. Sensors, 22(4), 1396.

4. Chen, L., et al. (2024). Explainable Deep Learning-Based Feature Selection and Intrusion Detection Method on the Internet of Things. Sensors, 24(16), 5223.

5. Wang, X., et al. (2025). Lightweight Intrusion Detection in IoT via SHAP-Guided Feature Pruning. arXiv:2512.19488.

6. Zhang, Y., et al. (2026). An XGBoost-Based Intrusion Detection Framework with Interpretability Analysis for IoT Networks. Applied Sciences, 16(2), 980.

7. Fathi, H., et al. (2025). Reinforcement learning-driven feature selection for enhanced classification in cybersecurity. International Journal of Data and Network Science, 9.

8. Panda, B., Bisoyi, S. S., Panigrahy, S., & Mohanty, P. (2025). Machine learning techniques for imbalanced multiclass malware classification through adaptive feature selection. PeerJ Computer Science, 11, e2752.

9. Lv, J. (2025). An Interpretable Network Intrusion Detection Model via Decision Tree Enhanced Deep Attention Network. IET Information Security, 19.

10. Carlini, N., et al. (2026, April 7). Assessing Claude Mythos Preview's cybersecurity capabilities. Anthropic Research Blog. Retrieved from https://red.anthropic.com/2026/mythos-preview/

11. Zhang, L., et al. (2025). RADAR-X: A Robust Adversarial-Resilient Dual-Stream Network Intrusion Detection Framework. Research Square.

References

1. Rehman, M. U., Kalakoti, R., & Bah¸si, H. (2025). Comprehensive Feature Selection for Machine Learning-Based Intrusion Detection in Healthcare IoMT Networks. Proceedings of ICISSP 2025, 248-259.

2. Silva, M., Pinto, D., Vitorino, J., Maia, E., Praça, I., Amorim, I., & Viamonte, M. J. (2025). Binary and Multiclass Cyberattack Classification on GeNIS Dataset. arXiv:2511.08660.

3. Abd Elaziz, M., et al. (2022). An Effective Feature Selection Model Using Hybrid Metaheuristic Algorithms for IoT Intrusion Detection. Sensors, 22(4), 1396.

4. Chen, L., et al. (2024). Explainable Deep Learning-Based Feature Selection and Intrusion Detection Method on the Internet of Things. Sensors, 24(16), 5223.

5. Wang, X., et al. (2025). Lightweight Intrusion Detection in IoT via SHAP-Guided Feature Pruning. arXiv:2512.19488.

6. Zhang, Y., et al. (2026). An XGBoost-Based Intrusion Detection Framework with Interpretability Analysis for IoT Networks. Applied Sciences, 16(2), 980.

7. Fathi, H., et al. (2025). Reinforcement learning-driven feature selection for enhanced classification in cybersecurity. International Journal of Data and Network Science, 9.

8. Panda, B., Bisoyi, S. S., Panigrahy, S., & Mohanty, P. (2025). Machine learning techniques for imbalanced multiclass malware classification through adaptive feature selection. PeerJ Computer Science, 11, e2752.

9. Lv, J. (2025). An Interpretable Network Intrusion Detection Model via Decision Tree Enhanced Deep Attention Network. IET Information Security, 19.

10. Carlini, N., et al. (2026, April 7). Assessing Claude Mythos Preview's cybersecurity capabilities. Anthropic Research Blog. Retrieved from https://red.anthropic.com/2026/mythos-preview/

11. Zhang, L., et al. (2025). RADAR-X: A Robust Adversarial-Resilient Dual-Stream Network Intrusion Detection Framework. Research Square.

Peduraru Serafym, 5th year student, specialty 222 “Medicine”, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

Pecheriaha Svitlana, Candidate of Medical Sciences, Assistant Department of Obstetrics, Gynecology and Perinatology, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-3884-9109

RH INCOMPATIBILITY AS A CURRENT PROBLEM IN MODERN OBSTETRICS

Abstract

Rh incompatibility remains one of the current challenges in modern obstetrics and perinatology, as it may lead to the development of Hemolytic disease of the fetus and newborn, intrauterine hypoxia, hydrops fetalis, and severe perinatal complications, including fetal death. Despite significant progress in the prevention of Rh alloimmunization, this condition continues to be clinically relevant due to delayed diagnosis, insufficient prophylactic coverage, and the complexity of managing sensitized pregnancies.

The article analyzes contemporary approaches to the prevention, diagnosis, and management of pregnant women at risk of Rh alloimmunization. The main pathogenetic mechanisms of Rh incompatibility, risk factors for maternal sensitization, and the role of the maternal immune response in the development of fetal hemolytic anemia are discussed. Particular attention is paid to modern methods of prenatal diagnosis, including determination of anti-D antibody titers, ultrasonography, Doppler assessment of the fetal middle cerebral artery, and noninvasive fetal RhD genotyping using analysis of cell-free fetal DNA in maternal blood.

The study emphasizes the importance of timely fetal monitoring for early detection of hemolytic anemia and prevention of severe forms of fetal hemolytic

disease. It is highlighted that the timely administration of anti-D immunoglobulin during pregnancy and after delivery remains the most effective method for preventing Rh alloimmunization. The implementation of modern preventive protocols, improvement of molecular genetic diagnostic methods, and a personalized approach to pregnancy management contribute to reducing severe perinatal complications and improving perinatal outcomes.

Keywords: Rh incompatibility, Rh alloimmunization, Hemolytic disease of the fetus and newborn, anti-D immunoglobulin, prenatal diagnosis, Doppler assessment, pregnancy.

Problem statement. Rh incompatibility is one of the most important causes of Hemolytic disease of the fetus and newborn, which may lead to severe perinatal complications, including intrauterine fetal death. Despite significant advances in the prevention of Rh alloimmunization, this issue remains relevant due to insufficient coverage of preventive measures, delayed diagnosis, and the complexity of managing sensitized pregnant women.

Rh alloimmunization remains a serious medical and social problem because severe forms of hemolytic disease may result in fetal anemia, hydrops fetalis, preterm birth, neurological complications, and increased perinatal mortality. In many cases, the disease develops progressively and may remain asymptomatic until significant fetal impairment occurs. Therefore, timely identification of women at risk and regular prenatal monitoring are essential components of effective obstetric care.

Modern obstetrics is focused on the early identification of women at risk of developing Rh incompatibility, the implementation of timely preventive measures, and careful monitoring of fetal condition. Particular importance is given to the use of advanced diagnostic methods, including antibody screening, ultrasonography, Doppler assessment, and molecular genetic technologies for fetal RhD genotyping.

The improvement of diagnostic technologies and the standardization of preventive protocols are key strategies for reducing the incidence of hemolytic disease of the fetus and newborn.

In addition, the widespread use of anti-D immunoglobulin prophylaxis has significantly decreased the frequency of Rh sensitization and improved perinatal outcomes worldwide. However, further optimization of screening programs, accessibility of modern diagnostic methods, and adherence to international clinical guidelines remain important priorities in contemporary obstetric practice.

Analysis of recent research and publications. Contemporary studies indicate that Rh incompatibility remains an important issue in obstetrics and perinatology despite the significant reduction in the incidence of severe forms of Hemolytic disease of the fetus and newborn due to the implementation of anti-D prophylaxis [1, 2]. Scientific publications extensively describe the pathogenetic mechanisms of Rh alloimmunization, the role of fetomaternal transfusion, and the maternal immune response in the development of hemolytic disease of the fetus and newborn [1, 3]. It has been proven that the entry of Rh-positive fetal erythrocytes into the bloodstream of an Rh-negative mother triggers the synthesis of IgG antibodies, which cross the placenta and cause hemolysis of fetal erythrocytes [4, 7].

Modern research pays considerable attention to the risk factors for the development of Rh alloimmunization, among which previous pregnancies, abortions, invasive prenatal procedures, bleeding during pregnancy, and transfusion of incompatible blood are of primary importance [3, 8, 9]. Authors emphasize that the absence of timely prophylaxis significantly increases the risk of developing hemolytic disease of the fetus and severe perinatal complications [2, 8].

A separate area of contemporary research is devoted to improving methods of prenatal diagnosis and fetal monitoring. Scientific studies confirm the high

diagnostic value of determining anti-D antibody titers, ultrasonography, and Doppler assessment of the fetal middle cerebral artery for the early detection of hemolytic anemia [7, 11, 14]. Significant progress in the management of Rh-incompatible pregnancy is associated with the introduction of noninvasive fetal RhD genotyping using analysis of cell-free fetal DNA in maternal blood, which allows the personalization of prophylactic strategies and helps avoid unnecessary administration of anti-D immunoglobulin [12].

Modern literature also actively investigates the effectiveness of anti-D immunoglobulin as the primary method for preventing Rh alloimmunization. It has been demonstrated that timely administration of anti-D immunoglobulin during pregnancy and after delivery significantly reduces the risk of sensitization and the development of hemolytic disease of the fetus [2, 8]. At the same time, authors emphasize the need to improve monitoring algorithms for sensitized pregnant women and to enhance access to modern diagnostic and preventive methods [7, 13].

Purpose of the study. To analyze contemporary approaches to the prevention of Rh incompatibility and Hemolytic disease of the fetus and newborn, and to determine the effectiveness of modern methods of diagnosis, monitoring, and preventive management of pregnant women at risk of Rh alloimmunization.

Presentation of the main material. Rh incompatibility is one of the most important immunological complications of pregnancy that occurs due to incompatibility between maternal and fetal blood according to the Rh factor. The condition most commonly develops when a pregnant woman has Rh-negative blood and the fetus inherits the Rh-positive antigen from the father. According to epidemiological studies, approximately 10–15% of the population is Rh-negative, while the risk of delivering an Rh-positive child in Rh-negative mothers is about 60–70%, depending on the paternal genotype [1].

Before the introduction of specific immunoprophylaxis, hemolytic disease of the fetus and newborn was one of the leading causes of perinatal mortality. In the mid-20th century, the rate of sensitization among Rh-negative women after pregnancy with an Rh-positive fetus reached 13–16%, whereas the modern use of anti-D immunoglobulin has reduced this rate to less than 1% [2].

Pathogenetically, Rh incompatibility develops as a result of the entry of Rh-positive fetal erythrocytes into the maternal bloodstream. Even a minimal volume of fetomaternal transfusion, approximately 0.1 mL of fetal blood, may trigger a maternal immune response [3].

During the initial exposure, the immune system predominantly produces IgM antibodies, which are unable to cross the placental barrier. However, immunological memory subsequently develops, and upon repeated exposure to the Rh antigen, IgG antibodies are rapidly synthesized. These antibodies can cross the placenta and induce hemolysis of fetal erythrocytes [4]. As a result of massive erythrocyte destruction, anemia, tissue hypoxia, and impairment of fetal hepatic and cardiovascular function develop. With progression of the hemolytic process, extramedullary hematopoiesis is activated, the fetal liver and spleen enlarge, and decreased oncotic pressure leads to generalized edema and the development of hydrops fetalis [5].

One of the most severe consequences of Rh incompatibility is Hemolytic disease of the fetus and newborn. The severity of the condition depends on the concentration of maternal antibodies and the intensity of hemolysis. Mild forms are characterized by moderate hyperbilirubinemia after birth, whereas severe forms are accompanied by hydrops fetalis, generalized edema, heart failure, and multiple organ dysfunction [6].

Hydrops fetalis is a critical condition in which mortality without treatment may exceed 50–80%. According to contemporary studies, severe forms of alloimmunization remain associated with a high risk of preterm birth, the need for

intrauterine transfusions, and perinatal complications [15]. As a consequence of chronic hypoxia and hyperbilirubinemia, newborns may develop central nervous system damage, including bilirubin encephalopathy, hearing impairment, seizure syndrome, and persistent neurological disorders [7].

The risk of Rh alloimmunization significantly increases in the presence of factors associated with fetomaternal transfusion. Sensitization most commonly occurs after delivery of an Rh-positive fetus; however, spontaneous and induced abortions, ectopic pregnancy, invasive procedures, bleeding during pregnancy, placental abruption, and abdominal trauma are also important contributing factors [8].

After spontaneous abortion, the risk of sensitization is approximately 1.5–2%; after invasive procedures, up to 5%; and after delivery without prophylaxis, it may exceed 15%. Particularly high risk is observed in women with repeated pregnancies and a complicated obstetric history. In addition, the risk of sensitization increases after cesarean section, manual removal of the placenta, and obstetric manipulations associated with disruption of the placental barrier [8].

Modern approaches to the diagnosis of Rh incompatibility are based on the early identification of women at risk. All pregnant women undergo determination of blood group and Rh status during their first prenatal visit [10]. Rh-negative women are обязательно tested for anti-D antibody titers. In the absence of sensitization, antibody screening is repeated at 18–20 weeks, 28 weeks, and before delivery. An antibody titer of 1:16 or higher is considered critical, as it is associated with a high risk of severe Hemolytic disease of the fetus and newborn. An increase in antibody titers requires more frequent monitoring and comprehensive examination. Contemporary practice also includes the determination of IgG antibody subclasses, since IgG1 and IgG3 possess the highest hemolytic activity [11].

An important achievement of modern perinatology has been the introduction of noninvasive fetal RhD genotyping through analysis of cell-free fetal DNA in maternal blood [9]. This method has a sensitivity exceeding 99% and allows determination of fetal Rh status as early as the 10th week of pregnancy [13]. This approach helps avoid unnecessary administration of anti-D immunoglobulin in cases where the fetus is also Rh-negative. The use of this technology significantly reduces the number of invasive procedures and contributes to personalized pregnancy management. Furthermore, the application of molecular genetic methods enables timely prediction of the risk of severe hemolytic disease of the fetus and optimization of monitoring strategies [13].

Ultrasonography remains the primary method for assessing fetal condition in Rh incompatibility. It allows evaluation of fetal size, placental thickness, amniotic fluid volume, and the presence of signs of hydrops fetalis [14].

Characteristic ultrasound signs of severe hemolytic disease include ascites, pleural effusion, subcutaneous edema greater than 5 mm, cardiomegaly, and hepatosplenomegaly. Significant placental thickening also indicates fetal decompensation and severe disease progression. In cases of progressive anemia, signs of heart failure and impaired placental circulation may be observed, requiring immediate adjustment of pregnancy management strategies.

The most effective method for preventing hemolytic disease of the fetus is the timely administration of Rh(D) anti-D immunoglobulin. Current recommendations include routine antenatal prophylaxis for Rh-negative women, as well as administration of the drug after delivery, invasive procedures, abortions, bleeding episodes, and other situations associated with the risk of fetomaternal transfusion. The use of anti-D immunoglobulin after delivery and during pregnancy significantly reduces the risk of Rh alloimmunization and the development of hemolytic disease of the fetus [12].

Due to the implementation of modern preventive methods, molecular genetic diagnostics, and careful fetal monitoring, the incidence of severe forms of Hemolytic disease of the fetus and newborn has significantly decreased, leading to improved perinatal outcomes.

Conclusions. Rh incompatibility remains one of the most significant immunological complications in modern obstetrics, as it may lead to the development of Hemolytic disease of the fetus and newborn, intrauterine hypoxia, hydrops fetalis, and severe perinatal complications, including fetal death. Despite considerable progress in preventive strategies, the problem continues to be clinically relevant due to the risk of maternal sensitization and the complexity of managing alloimmunized pregnancies.

Contemporary diagnostic approaches, including determination of anti-D antibody titers, ultrasonography, Doppler assessment of the fetal middle cerebral artery, and noninvasive fetal RhD genotyping using cell-free fetal DNA, enable early identification of pathological changes and accurate evaluation of fetal condition. These methods contribute to timely risk stratification, optimization of pregnancy management, and reduction in the incidence of severe fetal complications.

The timely administration of Rh(D) anti-D immunoglobulin remains the most effective method for preventing Rh alloimmunization. Routine antenatal and postnatal prophylaxis significantly decreases the risk of maternal sensitization and improves perinatal outcomes. Therefore, further improvement of screening programs, accessibility of modern diagnostic technologies, and adherence to standardized preventive protocols are essential for reducing the incidence of hemolytic disease of the fetus and newborn and improving maternal and neonatal health outcomes.

References

1. Neamţu, S. D., Novac, M. B., Neamţu, A. V., Stanca, I. D., Boldeanu, M. V., Gluhovschi, A., Stanca, L., Dijmărescu, A. L., Manolea, M. M., Trăistaru, M. R., Mateescu, G. O., & Siminel, M. A. (2022). Fetal-maternal incompatibility in the Rh system. Rh isoimmunization associated with hereditary spherocytosis: case presentation and review of the literature. *Romanian journal of morphology and embryology = Revue roumaine de morphologie et embryologie*, *63*(1), 229–235. https://doi.org/10.47162/RJME.63.1.26

2. Sarwar, A., & Citla Sridhar, D. (2024). Rh Hemolytic Disease(Archived). In *StatPearls*. StatPearls Publishing.

3. Benavides-Serralde, J. A., Buitrago-Leal, M., Molina Giraldo, S., Benavides Calvache, J. P., Rivera Tobar, I., López Rodríguez, M. J., Miranda, J., & Valencia, C. (2024). Colombian consensus for the diagnosis, prevention, and management of Rhesus disease. Consenso colombiano de diagnóstico, prevención y manejo de la enfermedad Rh. *Revista colombiana de obstetricia y ginecologia*, *75*(3), 4142. https://doi.org/10.18597/rcog.4142

4. Zhu, D., Zhou, Q., Yu, B., & Chen, C. (2026). The influence of early intravenous immunoglobulin administration on the prognosis of severe hemolytic disorders in neonates. *BMC pediatrics*, *26*(1), 167. https://doi.org/10.1186/s12887-025-06508-5

5. Novoselac, J., Buzina Marić, K., Rimac, V., Selak, I., Raos, M., & Golubić Ćepulić, B. (2023). Significance of immunohematologic testing in mother and newborn ABO incompatibility. Immunohematology, 39(2), 55–60. https://doi.org/10.21307/immunohematology-2023-009

6. Zakerihamidi, M., Moradi, A., & Boskabadi, H. (2023). Comparison of severity and prognosis of jaundice due to Rh incompatibility and G6PD deficiency. *Transfusion and apheresis science: official journal of the World Apheresis*

Association : official journal of the European Society for Haemapheresis, *62*(4), 103714. https://doi.org/10.1016/j.transci.2023.103714

7. de Winter, D. P., Kaminski, A., Tjoa, M. L., & Oepkes, D. (2023). Hemolytic disease of the fetus and newborn: systematic literature review of the antenatal landscape. *BMC pregnancy and childbirth*, *23*(1), 12. https://doi.org/10.1186/s12884-022-05329-z

8. Fung-Kee-Fung, K., Wong, K., Walsh, J., Hamel, C., & Clarke, G. (2024). Guideline No. 448: Prevention of Rh D Alloimmunization. *Journal of obstetrics and gynaecology Canada: JOGC = Journal d'obstetrique et gynecologie du Canada: JOGC*, *46*(4), 102449. https://doi.org/10.1016/j.jogc.2024.102449

9. Moise, K. J., Jr, & Abels, E. A. (2024). Rh Sensitization and Induced Abortion. *JAMA*, *331*(5), 444. https://doi.org/10.1001/jama.2023.25014

10. Maheshwari, A., Zubair, M., & Maheshwari, A. (2024). Kell Blood Group System. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.

11. Minuk, L., Clarke, G., & Lieberman, L. (2020). Approach to red blood cell antibody testing during pregnancy: Answers to commonly asked questions. *Canadian family physician Medecin de famille canadien*, *66*(7), 491–498.

12. Jayashankar, S. S., Nasaruddin, M. L., Hassan, M. F., Dasrilsyah, R. A., Shafiee, M. N., Ismail, N. A. S., & Alias, E. (2023). Non-Invasive Prenatal Testing (NIPT): Reliability, Challenges, and Future Directions. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, *13*(15), 2570. https://doi.org/10.3390/diagnostics13152570

13. Maurice, P., McCallion, J., Fitzgibbon, M., Barthelmes, J. N., Karmous, W., Hardy, E. J., Mitchell, S. A., Mitchell, C. R., Lee, J., Noel, W., Borsi, A., & Jouannic, J. M. (2025). Patient experience and burden of haemolytic disease of the foetus and newborn: a systematic review. *BMC pregnancy and childbirth*, *25*(1), 114. https://doi.org/10.1186/s12884-025-07208-9

14. Franchinard, L., Maisonneuve, E., Friszer, S., Toly Ndour, C., Huguet-Jacquot, S., Maurice, P., Mailloux, A., Cortey, A., & Jouannic, J. M. (2022).

Perinatal risk factors associated with severity of haemolytic disease of the foetus and newborn due to Rhc maternal-foetal incompatibility: A retrospective cohort study. *Vox sanguinis*, *117*(4), 570–579. https://doi.org/10.1111/vox.13215

Сорока Ольга Олексіївна, доктор філософії, старший викладач кафедри технологічної і професійної освіти, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, м. Глухів, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8177-3499

Soroka Olha Oleksiivna, PhD, senior lecturer of the Department of Technological and Professional Education, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Hlukhiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8177-3499

КРИТИЧНЕ МИСЛЕННЯ МАЙБУТНЬОГО ВЧИТЕЛЯ В ЦИФРОВУ ЕПОХУ: ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

CRITICAL THINKING OF THE FUTURE TEACHER IN THE DIGITAL AGE: THE IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Анотація

У статті досліджено проблему розвитку критичного мислення майбутніх учителів в умовах цифровізації освіти та активного впровадження технологій штучного інтелекту в освітній процес. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю професійної підготовки педагогів, здатних ефективно діяти в умовах інформаційної невизначеності, критично оцінювати результати роботи AI-систем та забезпечувати педагогічно доцільне використання цифрових технологій у навчанні. У сучасному науковому дискурсі критичне мислення розглядається як одна з ключових компетентностей XXI століття та важлива професійна якість сучасного вчителя.

У результаті дослідження встановлено, що використання технологій штучного інтелекту має амбівалентний характер. З одного боку, AI відкриває нові можливості для персоналізації навчання, автоматизації освітніх процесів, підтримки дослідницької діяльності та адаптації освітніх траєкторій. З іншого боку, надмірна залежність від генеративних AI-систем може призводити до зниження рівня самостійного мислення, формування ілюзії компетентності, когнітивного «розвантаження» та некритичного сприйняття інформації.

Обґрунтовано, що в умовах AI-опосередкованого освітнього середовища критичне мислення набуває нових функцій, пов’язаних із оцінюванням результатів діяльності інтелектуальних систем, перевіркою достовірності згенерованої інформації, виявленням алгоритмічних упереджень та здійсненням епістемічного оцінювання знань. Визначено, що важливою складовою професійної підготовки майбутніх учителів є формування AI-грамотності, яка охоплює здатність критично взаємодіяти з цифровими системами, усвідомлювати обмеження алгоритмів та етично використовувати технології штучного інтелекту.

У статті охарактеризовано педагогічні підходи до розвитку критичного мислення майбутніх учителів, серед яких проблемно-орієнтоване навчання, кейс-метод, порівняльний аналіз інформації, рефлексивні практики та проєктна діяльність із використанням AI як інструменту підтримки навчання.

Ключові слова: критичне мислення, майбутні вчителі, штучний інтелект, цифровізація освіти, AI-грамотність, професійна підготовка, епістемічне оцінювання, цифрове освітнє середовище.

Abstract

The article examines the problem of developing critical thinking in future teachers in the context of the digitalization of education and the active integration of artificial intelligence technologies into the educational process. The relevance of the study is determined by the need for professional training of teachers capable of effectively functioning under conditions of informational uncertainty, critically evaluating the results generated by AI systems, and ensuring the pedagogically appropriate use of digital technologies in education. In contemporary scientific discourse, critical thinking is considered one of the key competencies of the 21st century and an essential professional quality of a modern teacher.

The study found that the use of artificial intelligence technologies has an ambivalent character. On the one hand, AI opens new opportunities for personalized learning, automation of educational processes, support for research activities, and adaptation of educational trajectories. On the other hand, excessive dependence on generative AI systems may lead to a decline in independent thinking, the formation of an illusion of competence, cognitive offloading, and uncritical perception of information.

It is substantiated that in an AI-mediated educational environment, critical thinking acquires new functions related to evaluating the results of intelligent systems, verifying the reliability of generated information, identifying algorithmic biases, and performing epistemic evaluation of knowledge. It is determined that an important component of future teachers' professional training is the development of AI literacy, which includes the ability to critically interact with digital systems, understand the limitations of algorithms, and ethically use artificial intelligence technologies.

The article characterizes pedagogical approaches to developing critical thinking in future teachers, including problem-based learning, case-study methods,

comparative analysis of information, reflective practices, and project-based activities using AI as a learning support tool.

Keywords: critical thinking, future teachers, artificial intelligence, digitalization of education, AI literacy, professional training, epistemic evaluation, digital educational environment.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток цифрових технологій та активне впровадження систем штучного інтелекту в освітній процес зумовлюють глибоку трансформацію сучасної освіти й професійної підготовки майбутніх учителів. Сьогодні технології штучного інтелекту використовуються не лише як допоміжний інструмент для пошуку інформації чи автоматизації окремих педагогічних завдань, а як чинник, що впливає на характер пізнавальної діяльності, способи взаємодії з інформацією та логіку організації навчання [1]. У цих умовах особливої актуальності набуває проблема розвитку критичного мислення, яке розглядається як одна з ключових компетентностей сучасного педагога.

Цифрова епоха характеризується надмірною кількістю інформації, високою швидкістю її поширення та посиленням впливу алгоритмічних систем на інформаційне середовище людини. Сучасні цифрові платформи дедалі активніше впливають на формування інформаційних уподобань користувачів, способи сприйняття інформації та процеси прийняття рішень. Водночас системи генеративного штучного інтелекту здатні створювати переконливі, але потенційно неточні, неповні або упереджені відповіді, що актуалізує потребу у здатності критично оцінювати джерела інформації, перевіряти достовірність тверджень та здійснювати епістемічне оцінювання знань [2; 3].У сучасному цифровому середовищі критичне мислення стає необхідною умовою ефективної та безпечної взаємодії людини з інформацією й технологіями штучного інтелекту.

Особливої значущості проблема розвитку критичного мислення набуває у професійній підготовці майбутніх учителів. Традиційна функція педагога як основного джерела передачі знань поступово трансформується під впливом цифровізації освіти та поширення AI-технологій. Сучасний учитель має виконувати ролі наставника, фасилітатора, організатора освітнього середовища та координатора пізнавальної діяльності учнів [1]. У зв'язку з цим майбутній педагог повинен володіти здатністю критично оцінювати результати роботи систем штучного інтелекту, виявляти алгоритмічні упередження, аналізувати достовірність інформації та формувати в учнів навички відповідальної взаємодії з цифровими технологіями.

Інтеграція технологій штучного інтелекту в освіту відкриває значні можливості для персоналізації навчання, адаптації освітніх траєкторій, автоматизації рутинних педагогічних процесів та створення інтерактивного освітнього середовища [4]. Водночас дослідники наголошують і на низці потенційних ризиків, пов'язаних із надмірною залежністю від AI-систем. Зокрема, використання штучного інтелекту може сприяти так званому «когнітивному розвантаженню», коли здобувачі освіти отримують готові відповіді без достатнього рівня самостійного аналізу, інтелектуальних зусиль і рефлексії, необхідних для глибокого засвоєння знань [1; 5]. Надмірна опора на AI також потенційно створює ризики формування ілюзії компетентності, зниження рівня самостійності мислення та послаблення аналітичної діяльності студентів [3].

У сучасних умовах особливого значення набуває формування AI-грамотності майбутніх учителів, яка охоплює не лише вміння користуватися цифровими інструментами, а й здатність критично оцінювати результати роботи AI, розуміти обмеження алгоритмічних систем, усвідомлювати етичні аспекти їх використання та забезпечувати педагогічно доцільну інтеграцію штучного інтелекту в освітній процес [2]. Відтак проблема

розвитку критичного мислення майбутнього вчителя в умовах цифрової епохи та активного впровадження технологій штучного інтелекту потребує ґрунтовного теоретичного й методичного осмислення, що й зумовлює актуальність обраної теми дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема розвитку критичного мислення в умовах цифровізації освіти та поширення технологій штучного інтелекту активно досліджується як українськими, так і зарубіжними науковцями. У сучасному науковому дискурсі особлива увага приділяється трансформації освітнього середовища під впливом AI, зміні ролі вчителя, розвитку AI-грамотності та формуванню здатності критично взаємодіяти з цифровими системами.

У міжнародних дослідженнях суттєву увагу приділено переосмисленню професійної ролі педагога в умовах стрімкого розвитку AI-технологій. У доповіді OECD «Reimagining Teaching in an Accelerating World» підкреслюється, що сучасна освіта має орієнтуватися не лише на передачу знань, а насамперед на розвиток критичного мислення, творчості, адаптивності та здатності учнів діяти в умовах невизначеності [1]. Дослідники OECD наголошують, що в умовах поширення генеративного штучного інтелекту особливого значення набувають професійне судження вчителя, рефлексія, емпатія та здатність підтримувати інтелектуальну автономію учнів.

Педагогічні аспекти використання AI в освіті ґрунтовно аналізує V. Charisi, яка акцентує увагу на необхідності людиноцентричного підходу до інтеграції штучного інтелекту в освітнє середовище. Дослідниця підкреслює, що AI-системи можуть генерувати переконливі, але недостовірні або упереджені відповіді, тому ключового значення набувають критичне мислення, епістемічне оцінювання інформації та AI-грамотність здобувачів освіти [2]. У роботах F.Borgonovi, F. Bastagli, M. Ochojska та G. Piumatti

розглядаються можливості персоналізації навчання за допомогою AI, трансформація оцінювання освітніх результатів та ризики надмірної залежності від генеративних систем штучного інтелекту [4].

Проблему взаємозв'язку критичного мислення та штучного інтелекту досліджують також A. S. Wazan, M. M. Bari, A. Mas-Tur, N. Roig-Tierno та інші зарубіжні науковці. Зокрема, A. S. Wazan обґрунтовує доцільність створення педагогічних ситуацій невизначеності як засобу стимулювання критичного мислення студентів в умовах використання AI [5]. M. M. Bari та співавтори акцентують увагу на ризиках формування ілюзії компетентності, послаблення самостійного мислення та зниження рівня аналітичної діяльності через надмірне використання генеративного AI [3]. N. Chaparro-Banegas, A. Mas-Tur та N. Roig-Tierno досліджують нові педагогічні парадигми використання AI та їхній вплив на розвиток критичного мислення й автономності здобувачів освіти [6].

Серед українських науковців проблему розвитку критичного мислення в освітньому процесі досліджують Ю. П. Герасимчук, С. С. Давидович, В. О. Коваленко, І. Р. Махновська, які розглядають можливості інтерактивних методів навчання у формуванні аналітичних, рефлексивних та комунікативних умінь студентів [7]. Питання використання інноваційних технологій як засобу розвитку критичного мислення здобувачів вищої освіти висвітлено у працях А. Сустрєтова, Ю. Добришина та С. Сидоренка [8]. Значний внесок у дослідження формування критичного мислення в освітньому процесі здійснює Л. Шевцова, яка акцентує увагу на розвитку критичного мислення у процесі мовленнєвої діяльності та професійної комунікації [9].

Попри значну кількість наукових праць, проблема трансформації критичного мислення майбутнього вчителя в умовах використання технологій штучного інтелекту потребує подальшого дослідження.

Недостатньо висвітленими залишаються питання зміни функцій критичного мислення в AI-опосередкованому освітньому середовищі, формування AI-грамотності майбутніх педагогів, розвитку епістемічного оцінювання інформації та визначення ефективних педагогічних підходів до формування здатності критично взаємодіяти з інтелектуальними системами.

Попри значну кількість наукових праць, проблема трансформації критичного мислення майбутнього вчителя в умовах використання технологій штучного інтелекту залишається недостатньо розробленою. Потребують подальшого дослідження питання зміни функцій критичного мислення в цифровому середовищі, формування AI-грамотності майбутніх педагогів та визначення ефективних педагогічних підходів до розвитку здатності критично взаємодіяти з інтелектуальними системами.

Мета статті – проаналізувати вплив технологій штучного інтелекту на формування критичного мислення майбутніх учителів та обґрунтувати педагогічні підходи до його розвитку в умовах цифровізації освіти

Виклад основного матеріалу дослідження. В умовах цифровізації освіти та активного поширення технологій штучного інтелекту критичне мислення набуває особливого значення у професійній підготовці майбутніх педагогів. У сучасній педагогічній науці критичне мислення доцільно розглядати як інтегративну здатність особистості, що охоплює аналіз інформації, оцінювання її достовірності, виявлення логічних зв’язків, аргументацію власної позиції та рефлексію результатів пізнавальної діяльності. У документах OECD критичне мислення визначається як одна з ключових компетентностей XXI століття, необхідна для ефективної діяльності в умовах невизначеності та швидких суспільних змін [1].

M. Bouckaert наголошує, що сучасна система вищої освіти має орієнтуватися не лише на передачу знань, а й на розвиток творчого та критичного мислення здобувачів освіти, здатних аналізувати інформацію,

приймати обґрунтовані рішення та адаптуватися до нових викликів [10]. Для майбутнього вчителя критичне мислення виступає не лише когнітивною характеристикою, а й професійною необхідністю, оскільки забезпечує відбір навчального контенту, інтерпретацію інформації, організацію пізнавальної діяльності учнів та формування в них аналогічних умінь.

У сучасних умовах педагог уже не може виконувати лише функцію транслятора знань. Під впливом цифрових технологій роль учителя трансформується у бік наставництва, фасилітації та підтримки інтелектуальної автономії здобувачів освіти [1]. У зв'язку з цим критичне мислення стає основою професійного судження педагога, його здатності оцінювати достовірність інформації, аналізувати цифрові ресурси та приймати педагогічно доцільні рішення.

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту суттєво змінює сучасне освітнє середовище. AI-системи дедалі активніше використовуються для автоматизації рутинних педагогічних процесів, адаптації навчального контенту, створення персоналізованих освітніх траєкторій та забезпечення оперативного зворотного зв'язку. F. Borgonovi, F. Bastagli, M. Ochojska та G. Piumatti підкреслюють, що використання AI відкриває нові можливості для персоналізації навчання та підвищення ефективності освітнього процесу [4].

У доповіді OECD зазначається, що штучний інтелект може допомагати вчителям зосереджуватися на творчих та комунікативних аспектах педагогічної діяльності, автоматизуючи частину адміністративних завдань та підтримуючи індивідуалізацію навчання [1]. Крім того, сучасні AI-технології сприяють розвитку дослідницької діяльності студентів, забезпечують швидкий доступ до інформації та розширюють можливості цифрової взаємодії.

Водночас інтеграція AI в освіту супроводжується низкою ризиків. V. Charisi наголошує, що генеративні системи штучного інтелекту можуть

створювати переконливі, але недостовірні або упереджені відповіді, тому їх використання потребує критичного оцінювання результатів роботи цифрових систем [2]. Дослідниця підкреслює, що AI має оцінюватися не лише з позиції технічних можливостей, а й з огляду на його педагогічні наслідки для розвитку автономії, критичного мислення та соціальної взаємодії здобувачів освіти.

Одним із найбільш суттєвих ризиків є так зване «когнітивне розвантаження», коли здобувачі освіти використовують AI для отримання готових відповідей без достатнього рівня самостійного аналізу та інтелектуальних зусиль. A. S. Wazan зазначає, що надмірна визначеність і швидке отримання готової інформації можуть знижувати рівень критичного мислення студентів та послаблювати процес глибокого осмислення навчального матеріалу [5]. Подібну позицію висловлюють M. M. Bari та співавтори, які вказують на ризики формування ілюзії компетентності та зниження рівня аналітичного мислення через надмірну залежність від генеративних AI-систем [3].

Таким чином, штучний інтелект виступає амбівалентним чинником: з одного боку, він відкриває нові можливості для розвитку освіти, а з іншого – створює виклики, пов’язані з необхідністю збереження самостійності мислення та інтелектуальної активності здобувачів освіти.

Поширення технологій штучного інтелекту спричиняє зміну функцій критичного мислення у сучасному освітньому середовищі. Якщо традиційно критичне мислення було пов’язане насамперед із пошуком, аналізом та інтерпретацією інформації, то в умовах AI-опосередкованого навчання особливого значення набувають оцінювання результатів роботи інтелектуальних систем, перевірка достовірності згенерованих відповідей, аналіз алгоритмічних упереджень та здатність формулювати ефективні запити до AI-систем.

У сучасному цифровому середовищі критичне мислення доцільно розглядати як здатність аналізувати не лише інформацію, а й результати діяльності інтелектуальних систем. Особливого значення набуває епістемічне оцінювання, тобто здатність визначати надійність інформації, перевіряти її відповідність науковим даним та усвідомлювати межі достовірності результатів роботи AI. V. Charisi підкреслює, що AI-грамотність сучасного педагога повинна охоплювати не лише технічні навички використання цифрових інструментів, а й критичне оцінювання інформації, розуміння обмежень алгоритмів та усвідомлення етичних аспектів їх застосування [2]

У доповіді OECD наголошується, що в умовах поширення AI особливого значення набувають людські якості педагога – професійне судження, рефлексія, здатність підтримувати автономію учнів та організовувати навчання, орієнтоване на розвиток мислення, а не механічне відтворення інформації [1]. N. Chaparro-Banegas, A. Mas-Tur та N. Roig-Tierno також підкреслюють, що сучасна освіта має орієнтуватися на розвиток автономності, рефлексивності та дослідницького мислення здобувачів освіти, а використання AI повинно сприяти посиленню цих процесів, а не їх заміщенню [6].

Отже, в умовах цифрової епохи критичне мислення майбутнього вчителя трансформується у здатність свідомо та відповідально взаємодіяти з AI-системами, критично оцінювати результати їхньої роботи та забезпечувати педагогічно доцільне використання цифрових технологій в освітньому процесі.

У процесі професійної підготовки майбутніх педагогів особливого значення набуває використання таких педагогічних підходів, які стимулюють активну інтелектуальну діяльність студентів та формують здатність критично взаємодіяти з AI-системами. Ю. П. Герасимчук, С. С.

Давидович, В. О. Коваленко та І. Р. Махновська наголошують на ефективності інтерактивних методів навчання, які сприяють розвитку аналітичного мислення, аргументації, рефлексії та комунікативних умінь студентів [7].

Одним із найбільш ефективних підходів є проблемно-орієнтоване навчання, що передбачає аналіз і перевірку відповідей генеративного AI, розв'язання проблемних ситуацій та формування здатності аргументовано оцінювати інформацію. Значний потенціал має також кейс-метод, у межах якого студенти аналізують помилкові або суперечливі відповіді AI-систем, визначають причини неточностей та пропонують власні обґрунтовані рішення.

Ефективним педагогічним інструментом є порівняльний аналіз інформації, згенерованої AI, із науковими джерелами та академічними публікаціями. Такий підхід сприяє формуванню навичок перевірки достовірності інформації, розвитку епістемічного судження та усвідомлення обмежень генеративних систем штучного інтелекту.

Важливу роль у розвитку критичного мислення відіграють рефлексивні практики, спрямовані на оцінювання власного процесу мислення, аналіз способів розв'язання проблем та усвідомлення впливу AI на пізнавальну діяльність студентів. A. S. Wazan підкреслює, що створення ситуацій інтелектуальної невизначеності є необхідною умовою активізації критичного мислення та подолання пасивного сприйняття готових відповідей [5]/

А. Сустрєтов, Ю. Добришин та С. Сидоренко зазначають, що використання інноваційних технологій у вищій освіті сприяє розвитку здатності студентів аналізувати інформацію, оцінювати альтернативні позиції та формулювати обґрунтовані висновки [8]. У цьому контексті доцільним є використання проєктної діяльності, у межах якої AI виступає

інструментом підтримки навчання, а не заміною самостійного мислення студентів.

Таким чином, розвиток критичного мислення майбутніх учителів в умовах цифровізації освіти потребує використання педагогічних підходів, орієнтованих на активну пізнавальну діяльність, рефлексію, дослідницьке навчання та критичну взаємодію з технологіями штучного інтелекту.

Висновки. Умови цифрової трансформації освіти та активне впровадження технологій штучного інтелекту зумовлюють суттєві зміни у професійній підготовці майбутніх учителів і переосмислення ролі критичного мислення у сучасному освітньому середовищі. У ході дослідження встановлено, що критичне мислення є не лише важливою когнітивною характеристикою особистості, а й необхідною професійною якістю сучасного педагога, яка забезпечує здатність аналізувати інформацію, оцінювати її достовірність, аргументувати власну позицію, здійснювати рефлексію та приймати педагогічно доцільні рішення.

З'ясовано, що використання технологій штучного інтелекту має амбівалентний характер. З одного боку, AI відкриває нові можливості для персоналізації навчання, автоматизації рутинних процесів, підтримки дослідницької діяльності та адаптації освітніх траєкторій. З іншого боку, надмірна залежність від генеративних AI-систем може сприяти зниженню рівня самостійного мислення, формуванню ілюзії компетентності, когнітивному «розвантаженню» та некритичному сприйняттю інформації.

Установлено, що в умовах AI-опосередкованого освітнього середовища критичне мислення набуває нових функцій і змістових характеристик. Якщо традиційно його основними функціями були пошук, аналіз та інтерпретація інформації, то сьогодні особливого значення набувають оцінювання результатів роботи інтелектуальних систем, перевірка достовірності згенерованих відповідей, виявлення алгоритмічних упереджень та

здійснення епістемічного оцінювання інформації. У зв'язку з цим критичне мислення доцільно розглядати як здатність аналізувати не лише інформацію, а й результати діяльності AI-систем.

Доведено, що ефективний розвиток критичного мислення майбутніх учителів в умовах цифровізації освіти потребує використання педагогічних підходів, орієнтованих на активну пізнавальну діяльність студентів, рефлексію, проблемно-орієнтоване навчання, аналіз відповідей генеративного AI, порівняльне оцінювання інформації з різних джерел та проєктну діяльність. Особливого значення набуває формування AI-грамотності майбутніх педагогів, яка охоплює здатність критично взаємодіяти з цифровими системами, розуміти обмеження алгоритмів та забезпечувати педагогічно доцільне використання штучного інтелекту в освітньому процесі.

Перспективи подальших досліджень убачаємо у розробленні методик діагностики рівня критичного мислення майбутніх учителів в умовах використання технологій штучного інтелекту, а також у створенні педагогічних моделей розвитку AI-грамотності та епістемічного оцінювання інформації у процесі професійної підготовки педагогічних кадрів.

Література

1. OECD. *Reimagining Teaching in an Accelerating World*. International Summit on the Teaching Profession. Paris : OECD Publishing, 2026. DOI: https://doi.org/10.1787/d0edfe8c-en.

2. Charisi V. Artificial Intelligence in Classrooms: Pedagogical Dimensions. Brussels : European Parliament, 2026. URL: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/784574/IUST_BRI(2026)784574_EN.pdf (дата звернення: 14.05.2026)

3. Bari M. M., Islam A., Ameen M. R., Miah A. S. M., Shin J. Critical Thinking in the Age of Artificial Intelligence: A Survey-Based Study with Machine Learning Insights. *arXiv preprint*. 2026. arXiv:2604.18590.

4. Borgonovi F., Bastagli F., Ochojska M., Piumatti G. AI adoption in the education system: International insights and policy considerations for Italy. *OECD Artificial Intelligence Papers*. 2025. OECD Publishing.

5. Wazan A. S. Strategies for Creating Uncertainty in the AI Era to Trigger Students Critical Thinking: Pedagogical Design, Assessment Rubric, and Exam System. *arXiv preprint*. 2026. arXiv:2602.00026.

6. Chaparro-Banegas N., Mas-Tur A., Roig-Tierno N. Challenging critical thinking in education: new paradigms of artificial intelligence. *Cogent Education.* 2024. Vol. 11, № 1. DOI: https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2437899.

7. Герасимчук Ю. П., Давидович С. С., Коваленко В. О., Махновська І. Р. Стимулювання критичного мислення студентів через інтерактивні методи викладання. *Інноваційна педагогіка*. 2025. Вип. 82, т. 1. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/82.1.6.

8. Сустрєтов А. С., Добришин Ю. Є., Сидоренко С. М. Інноваційні технології як інструмент розвитку критичного мислення у здобувачів вищої освіти. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2024. № 96. DOI: https://doi.org/10.32782/1992-5786.2024.96.12.

9. Шевцова Л. С. Розвиток критичного мислення у процесі мовленнєвої діяльності. *Інноваційна педагогіка*. 2025. Вип. 86, т. 2. DOI: https://doi.org/10.32782/ip/86.2.7.

10. Bouckaert M. The assessment of students' creative and critical thinking skills in higher education across OECD countries: A review of policies and related practices. *OECD Education Working Papers*. 2023. OECD Publishing.

References

1. OECD Publishing. (2026). *Reimagining teaching in an accelerating world*. Paris, France: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/d0edfe8c-en

2. Charisi, V. (2026). *Artificial intelligence in classrooms: Pedagogical dimensions*. Brussels, Belgium: European Parliament. Retrieved from https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/784574/IUST_BRI(2026)784574_EN.pdf

3. Bari, M. M., Islam, A., Ameen, M. R., Miah, A. S. M., & Shin, J. (2026). *Critical thinking in the age of artificial intelligence: A survey-based study with machine learning insights*. arXiv preprint arXiv:2604.18590. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2604.18590

4. Borgonovi, F., Bastagli, F., Ochojska, M., & Piumatti, G. (2025). *AI adoption in the education system: International insights and policy considerations for Italy*. Paris, France: OECD Publishing.

5. Wazan, A. S. (2026). *Strategies for creating uncertainty in the AI era to trigger students critical thinking: Pedagogical design, assessment rubric, and exam system*. arXiv preprint arXiv:2602.00026. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2602.00026

6. Chaparro-Banegas, N., Mas-Tur, A., & Roig-Tierno, N. (2024). Challenging critical thinking in education: New paradigms of artificial intelligence. *Cogent Education, 11*(1). https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2437899

7. Herasymchuk, Yu. P., Davydovych, S. S., Kovalenko, V. O., & Makhnovska, I. R. (2025). Stymuliuvannia krytychnoho myslennia studentiv cherez interaktyvni metody vykladannia [Stimulating students' critical thinking through interactive teaching methods]. *Innovatsiina pedahohika – Innovative Pedagogy, 82*(1). https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/82.1.6 [in Ukrainian].

8. Sustrietov, A. S., Dobryshyn, Yu. Ye., & Sydorenko, S. M. (2024). Innovatsiini tekhnolohii yak instrument rozvytku krytychnoho myslennia u zdobuvachiv vyshchoi osvity [Innovative technologies as a tool for developing critical thinking in higher education students]. *Pedahohika formuvannia tvorchoi osobystosti u vyshchii i zahalnoosvitnii shkolakh – Pedagogy of Creative Personality Formation in Higher and Secondary Schools, 96*. https://doi.org/10.32782/1992-5786.2024.96.12 [in Ukrainian].

9. Shevtsova, L. S. (2025). Rozvytok krytychnoho myslennia u protsesi movlennievoi diialnosti [Development of critical thinking in the process of speech activity]. *Innovatsiina pedahohika – Innovative Pedagogy, 86*(2). https://doi.org/10.32782/ip/86.2.7 [in Ukrainian].

10. Bouckaert, M. (2023). *The assessment of students' creative and critical thinking skills in higher education across OECD countries: A review of policies and related practices*. OECD Education Working Papers. Paris, France: OECD Publishing.

Nabochenko Vasyl, PhD Student, Department of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv, https//orcid.org/0009-0002-8809-3602

TITANIUM CARBIDE SURFACE ENGINEERING: REVIEW OF RECENT ADVANCES IN APPLICATION METHODS AND TECHNIQUES

Abstract

Titanium carbide remains a cornerstone of modern surface engineering, distinguished by its face-centered cubic NaCl-type crystal structure and a suite of exceptional refractory properties. With a high melting point of 3067°C, an elastic modulus between 410 and 450 GPa, and a hardness reaching 3200 HV, TiC is uniquely positioned to enhance the durability of substrates in demanding industrial environments. This review article provides a systematic and comprehensive survey of the latest advancements in TiC deposition and application techniques, spanning literature of recent years. By investigating the intersection of microstructural tailoring and tribological performance, the paper offers a high-level roadmap for researchers aiming to mitigate TiC's inherent brittleness while maximizing its protective capabilities.

The investigation encompasses a broad spectrum of sophisticated application methods, categorizing them by their deposition mechanisms and resulting coating characteristics. Key techniques analyzed include diffusion and in-situ methods, such as the In-situ Solid-phase Diffusion Method, which leverages cast iron as a carbon source to create gradient TiC-Fe coatings on titanium substrates with a volume fraction exceeding 95% [1]. Thermal and plasma deposition processes, such as High-Velocity Oxy-Fuel thermal spraying, are evaluated for their efficacy in protecting SS316 steel, alongside Air Pulsed

Plasma Deposition, which utilizes electro-thermal axial accelerators to synthesize particle-reinforced metal matrix composites. Significant attention is paid to laser and arc-based technologies, including laser cladding and Tungsten Inert Gas welding, which are noted for their industrial scalability and ability to refine substrate microstructures from pearlite to high-hardness phases [2]. Advanced sputtering and vapor deposition techniques are also explored, such as Dual-Ion Beam Sputtering for nano-coatings and Chemical Vapor Deposition for complex geometries, highlighting the formation of metastable TiC phases and supersaturated solid solutions [3].

The article further provides a comparative analysis of mechanical performance across diverse substrates, including Ti6Al4V alloys, AISI 1020 steel, and YG8 cemented carbides. It quantifies the influence of process parameters such as discharge voltages, pulse rates, and vacuum levels on interfacial adhesion and wear volume reduction. For instance, specific chemical reactions such as $2CO\rightarrow CO_{2}\uparrow+[C]$ and $8Ti+5[C]\longrightarrow Ti_{8}C_{5}$ are identified as critical mechanisms in salt bath carburizing that lead to a 55.9% reduction in friction coefficients.

By synthesizing these findings into a comparative framework, the review highlights the trade-offs between high-conformality techniques and high-speed scalable methods. This work serves as a short review summarizing recent advances in TiC surface engineering strategies to extend the service life of critical components in the aerospace, biomedical, and manufacturing sectors.

Keywords: Titanium Carbide, Surface Engineering, Laser Cladding, Diffusion Coatings, Hardness, Wear Resistance, Microstructure.

Introduction

Titanium carbide is a refractory transition metal carbide with a face-centered cubic NaCl-type crystal structure[1], exhibits properties such as high

hardness (up to 3200 HV), elevated melting point (3067°C), substantial elastic modulus (410–450 GPa), low density (4.93 g/cm³), good thermal and chemical stability, low friction coefficient, and great wear and corrosion resistance, making it a good option for enhancing the durability of substrates in demanding environments, though its relative brittleness and lower fracture toughness compared to metals pose challenges in high-impact applications [2], [3]. TiC's coatings are widely adopted in modern industries, such as cutting tools and molds in manufacturing for extended tool life and reduced friction [2], [3], aerospace components for lightweight high-temperature performance [4], biomedical implants on titanium alloys like Ti6Al4V to improve tribocorrosion resistance and biocompatibility [3], [5], automotive and marine parts for abrasion protection [3], and chemical processing equipment for oxidation and corrosion mitigation [2]. This review systematically surveys the advancements in TiC surface engineering, encompassing a detailed analysis of conventional and cutting-edge deposition techniques, microstructural characterization, and the resulting enhancements in mechanical and tribological performance [3].

Methodology

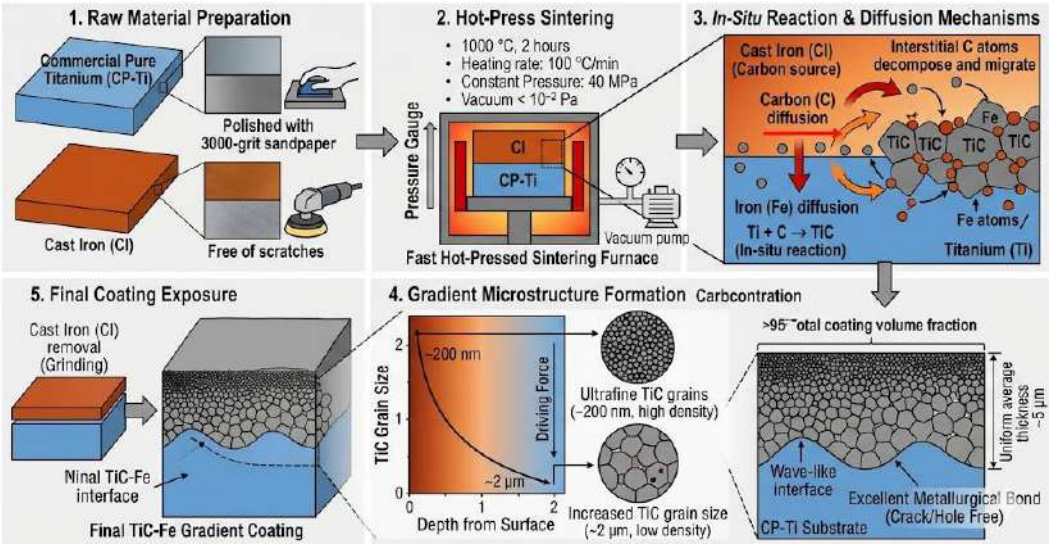
This review was conducted by systematically analyzing peer-reviewed literature, including journal articles and conference proceedings, published between 2000 and 2026, with a focus on titanium carbide coating methodologies, property enhancements, and industrial applications. The search strategy employed keywords such as "titanium carbide coatings," "TiC deposition techniques" (e.g., CVD, PVD), "mechanical properties of TiC," "tribological performance," and "surface modification." The gathered information was then critically synthesized to identify emerging trends, significant breakthroughs, and existing challenges in the field. AI tools were used to assist in the preliminary screening and thematic categorization of the extensive literature. Manual review was conducted to verify and edit any AI-generated content for accuracy and relevance.

Results

Significant research attention has been paid to laser cladding for TiC coatings, while techniques such as CVD and PVD are also critical for tailoring TiC coatings to specific industrial requirements[3], [6]. New advances continue to emerge in these areas as well[6]. This review covers only select advances of particular interest to the authors, with a breakdown by technique provided below. Other emerging vectors, such as high-entropy carbides and metal matrix composites, will be addressed later in the discussion.

The ISDM (In-situ Solid-phase Diffusion Method) was utilized to fabricate a TiC–Fe gradient coating on a pure titanium substrate using cast iron as the carbon source [7]. The process was conducted at a temperature of 1000 °C for a duration of 2 hours under a constant pressure of 40 MPa and a vacuum degree lower than 10^{-2} Pa [7]. The resulting coating achieved an average thickness of approximately 5 μm and was characterized by a TiC volume fraction exceeding 95% [7]. Key results included a superior surface hardness of 42.9 ± 2.6 GPa and an elastic modulus of 557.4 ± 10.3 GPa, which respectively represent a 7.4-fold and 2.4-fold increase compared to the cast iron reference [7]. Interfacial adhesion strength was measured to be greater than 225 ± 10 MPa, facilitated by the gradient transition of the microstructure and excellent atomic-scale bonding at the coating/substrate interface[7]. While the treatment was shown to significantly improve load-bearing capacity and reduce residual indentation depth, a specific numerical value for the friction coefficient was not explicitly reported in the results, although the gradient design was specifically implemented to address poor wear resistance [7]. The coating exhibited inward grain growth, with TiC grain sizes increasing from 200 nm at the surface to 2 μm towards the substrate, leading to a fracture mechanism transition from intergranular to transgranular along the coating thickness [7].

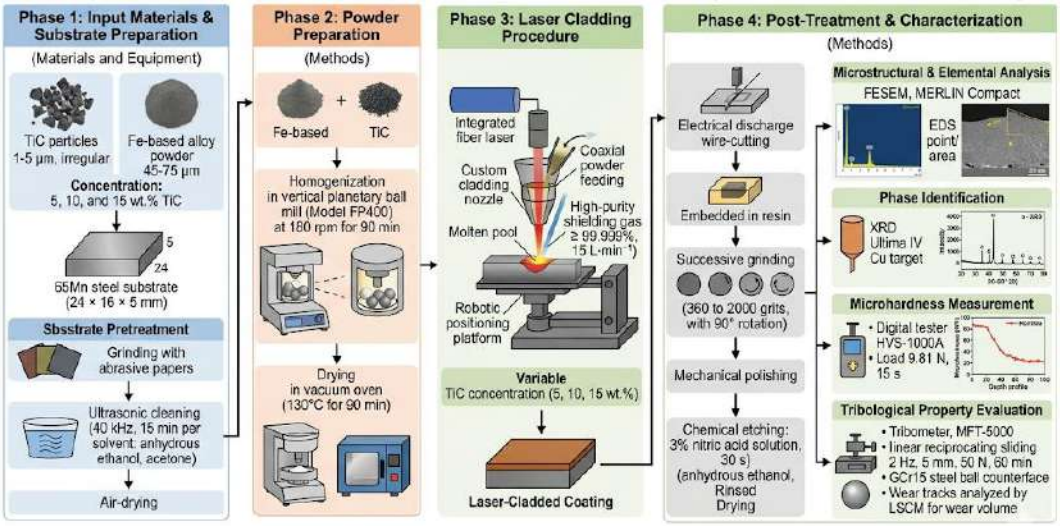
Figure 1. ISDM process illustration



Laser cladding process was utilized to synthesize TiC–Fe-based composite coatings on a 65Mn steel substrate to enhance its surface hardness and wear resistance [6]. Numerical simulations revealed that the addition of 15 wt.% TiC induced surface temperatures reaching approximately 3449 °C, creating localized thermal islands that intensified cooling rates and promoted high-hardness phases such as $(Cr, Fe)_7C_3$ [6]. The process successfully mitigated crack formation through the uniform dispersion of TiC particles, which also refined the microstructure from pearlite to feather-like bainite [6]. Significant improvements in mechanical properties were achieved; specifically, the 15 wt.% TiC coating yielded an average microhardness of 890 HV and a peak of 912.24 HV nearly 3.9 times the substrate hardness of 230.3 HV with the maximum hardness layer located approximately 0.6 mm beneath the surface [6]. Regarding tribological performance, the substrate exhibited a coefficient of friction of 0.4399, while the 5 wt.% TiC coating demonstrated the lowest coefficient at 0.3811 and the 15 wt.% TiC coating showed a coefficient of 0.4468 with improved frictional stability [6]. The 15 wt.% TiC variant achieved the most favorable results with a minimal wear

mass loss of 0.1 mg and a specific wear track depth of 82 μm and width of 800 μm [6].

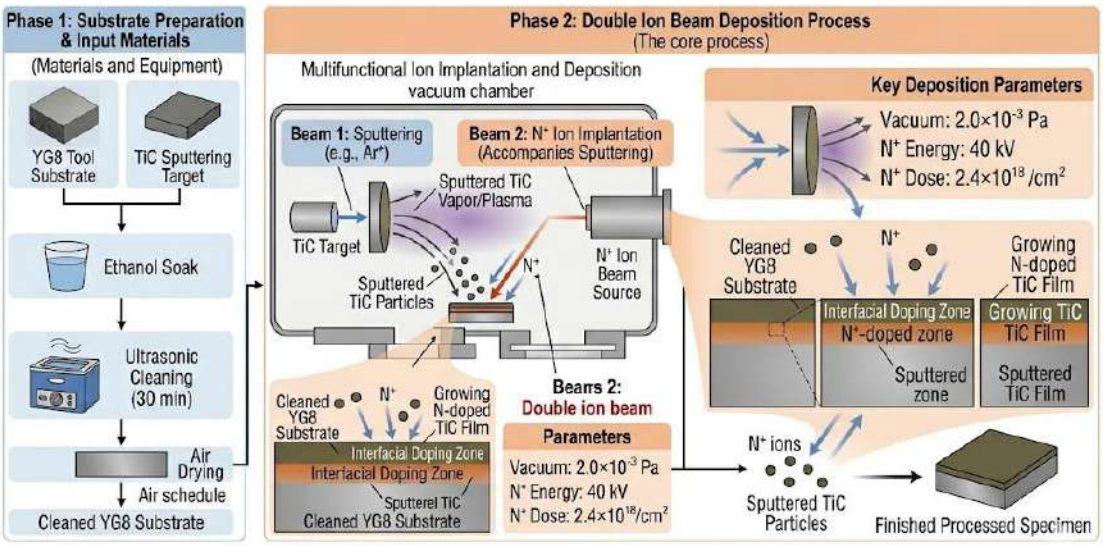
Figure 2. Laser cladding process illustration



Dual-Ion Beam Sputtering deposition by Dou Zhongyu et al., a TiC nano-coating was prepared on the surface of YG8 cemented carbide substrate where N-ion implantation was utilized to assist the sputtering process [8]. This non-thermal equilibrium process allowed for the precise adjustment of ion dose and energy to create a highly supersaturated solid solution and metastable TiC phase, specifically exhibiting, and crystal surface diffraction peaks [8]. The resulting surface modification significantly enhanced the mechanical properties of the substrate, increasing the surface hardness from an untreated value of 1672 HV to 2238 HV [8]. Tribological evaluations conducted under dry friction conditions using a 50N load at a speed of 100 r/min with an aluminum oxide ball demonstrated that the TiC coating effectively reduced the friction coefficient and wear volume compared to the uncoated tool [8]. Furthermore, the deposition improved the anti-crack ability and reduced surface roughness by minimizing fracture surface cracks and scratches, ultimately leading to higher bonding

strength and extended tool service life [8]. Although the specific processing temperature was not detailed, the injection process successfully bypassed traditional solid solubility limits to form a uniform coating with superior wear resistance [8].

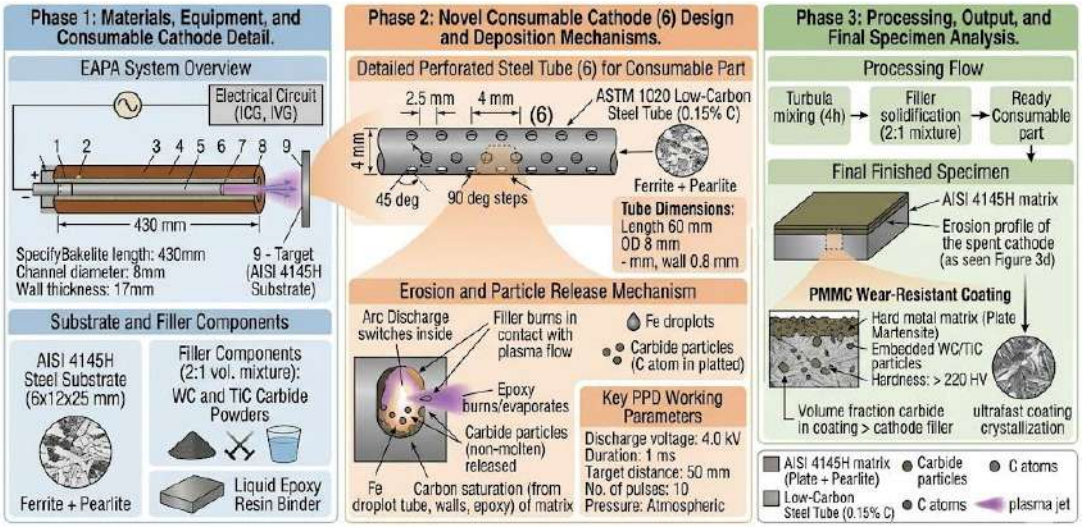
Figure 3. Dual-Ion Beam sputtering deposition process



Air pulsed plasma deposition employs an electro-thermal axial plasma accelerator with a consumable cathode [9]. The process involves 10 plasma pulses at a discharge voltage of 4.0 kV, a discharge duration of 1 ms, and atmospheric pressure[9]. Middle-carbon steel substrates with an initial "Ferrite + Pearlite" structure and hardness of 220 HV were used[9]. The resulting particle-reinforced metal matrix composite coating, composed of (TiC + WC) in a hardened steel matrix, achieved a thickness of 24–31 μm [9]. Hardness values ranged from 500–1044 HV in the matrix and 1516–2029 HV in the carbide particles [9]. The coefficient of friction was 0.52 against a 100Cr6 ball and 0.10 against a SiC ball [9]. Deposition occurred under atmospheric conditions [9], with tribological testing at ambient temperature[9]. Wear resistance improved significantly, with volumetric wear reduced by 4.4 times against 100Cr6 steel and by 16 times against SiC compared to the substrate [9]. The structure featured successful direct plasma

transfer of carbides without substantial melting into a matrix of 57 vol.% austenite and 43 vol.% martensite [9]. Minor oxide phases formed during the process acted as a solid lubricant, inhibiting adhesion and lowering the coefficient of friction[9].

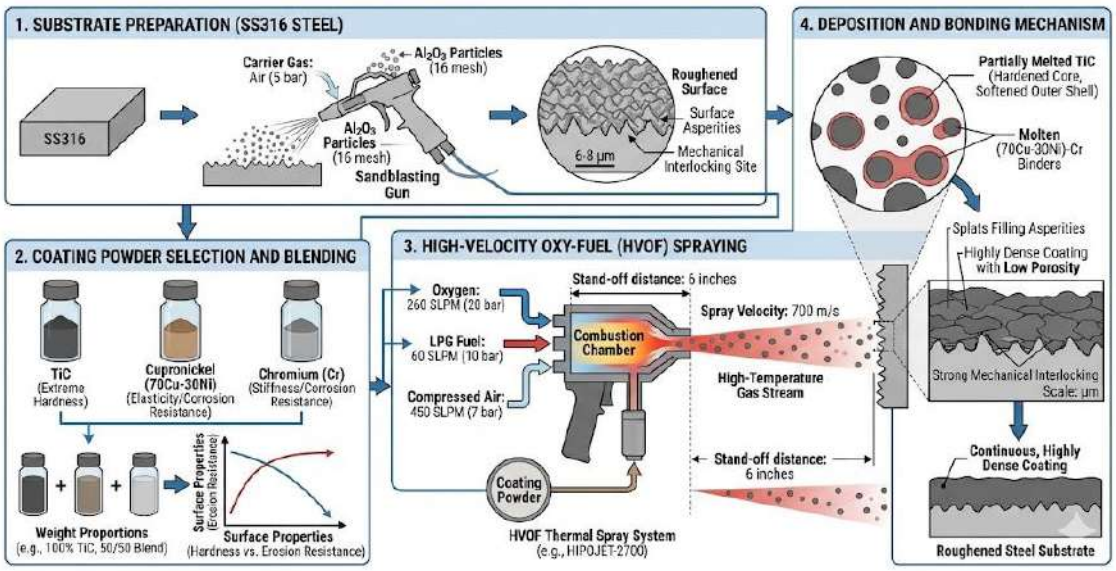
Figure 4. Air pulsed plasma deposition illustration



HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) thermal spraying was utilized to deposit composite coatings consisting of Titanium Carbide with (70Cu-30Ni)-Cr binders onto SS316 stainless steel substrates to enhance cavitation erosion resistance [10]. Prior to deposition, the substrate was sand-blasted at 5 bar pressure with Al2O3 particles to achieve a surface roughness of 6–8 µm for optimal mechanical interlocking [10]. The process utilized a high-temperature gas stream to deposit powders in three specific proportions: pure TiC, a TiC+50%(70Cu-30Ni)-Cr blend, and pure (70Cu-30Ni)-Cr [10]. Characterization revealed that the pure TiC coating achieved an average microhardness of 1154 ± 21 HV9.81N and a thickness of 229 ± 21 µm with 1.45% porosity [10]. The TiC+50%(70Cu-30Ni)-Cr composite reached a maximum layer thickness of 281 ± 28 µm, a microhardness of 845 ± 35 HV9.81N, and a porosity of 1.87% [10]. The pure (70Cu-30Ni)-Cr coating exhibited the lowest microhardness at 407 ± 16 HV9.81N and a thickness of 223 ± 19 µm [10]. While specific friction coefficients and gas temperatures were not quantified, the experimental results demonstrated that the

TiC+50%(70Cu-30Ni)-Cr composite was the most effective at resisting cavitation erosion under critical test conditions, including stream velocities of 40 m/s and an angle of attack of 60° [10].

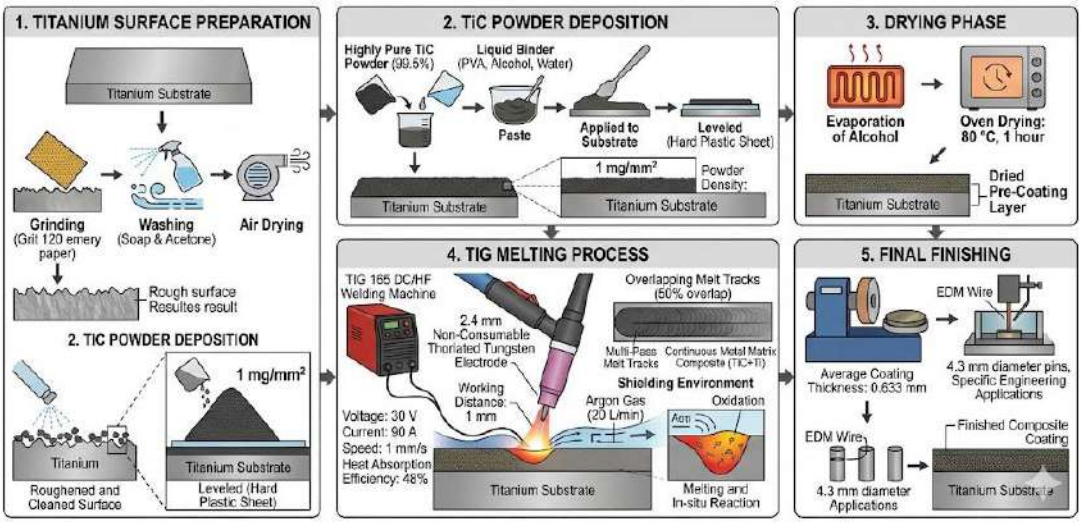
Figure 5. HVOF process illustration



TIG (Tungsten Inert Gas) welding torch melting process was employed to synthesize titanium carbide composite coatings on a commercially pure titanium substrate [4]. The coating material consisted of 99.5% pure TiC powder with a particle size between 45 and 100 microns, applied as a paste and pre-heated in an oven at 80°C for one hour to ensure moisture removal [4]. The deposition process utilized a 2.4 mm diameter thoriated tungsten electrode at a working distance of 1 mm, operating at 30 V and 90 A with a table traveling speed of 1 mm/s [4]. Argon shielding gas was supplied at 20 L/min to minimize oxidation during the melting phase, which was characterized by a 48% heat absorption efficiency [4]. Post-processing results indicated a finished coating layer thickness of 0.633 mm and a Vickers hardness of 383 HV5, with an average surface roughness (R_a) of 0.367 µm [4],[4]. Performance evaluations conducted between 0.38 and 1.5 m/s sliding speeds under loads of 20 to 50 N showed that while TiC is inherently characterized by a low coefficient of friction, increased operational intensity led to elevated flash temperatures and frictional heating that influenced wear transitions

[4]. The coatings successfully achieved a "very mild" wear rate - defined as less than or equal to $0.1 \times 10^{-12} \text{ m}^3\text{ m}^{-1}$- under most test conditions due to the formation of protective mechanically mixed and iron oxide layers [4].

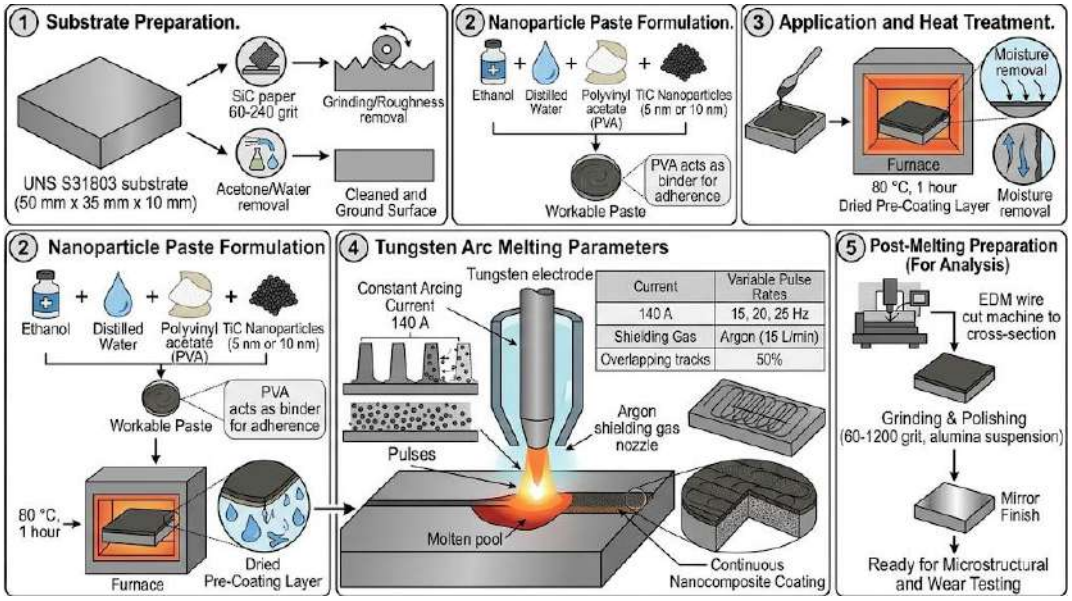
Figure 6. TIG welding TiC coating process illustration



Tungsten arc melting was employed as the surface modification process to deposit TiC nanoparticles, in sizes of 5 nm and 10 nm, onto a UNS S31803 duplex stainless steel substrate [11]. The methodology involved pre-treating a TiC paste at 80 °C for one hour before arc melting at a constant current of 140 A with varying pulse rates of 15 Hz, 20 Hz, and 25 Hz under a 15 L/min argon shielding gas flow using a 50% overlapping track scheme [11]. Some improvements in surface properties were achieved, with the 5 nm nanoparticle deposition at a 25 Hz pulse rate yielding a maximum microhardness of 415.96 HV, representing a substantial increase over the 259 HV substrate baseline [11]. The highest wear resistance was achieved with 5 nm at 25 Hz with a wear rate of 1.01 x 10^{-5} mm^3/Nm with the superior ability to reduce wear rates and enhance surface hardness among larger particles[11]. While specific friction coefficient values were not explicitly quantified, the optimal 25 Hz pulse rate facilitated a maximum elemental TiC concentration of 91.60% and enhanced penetration of nanoparticles into the substrate depth profile, effectively reducing material removal and resulting in

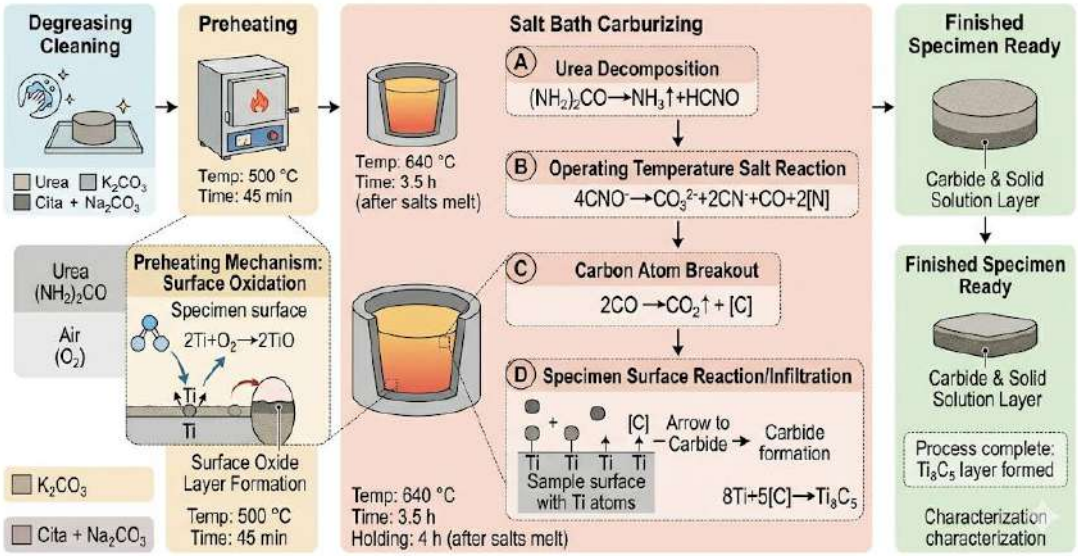
shallow worn grooves rather than the deep spalling craters and intensive abrasive wear observed in less optimal configurations like 10 nm particles at 20 Hz [11]

Figure 7. Tungsten arc melting process illustration



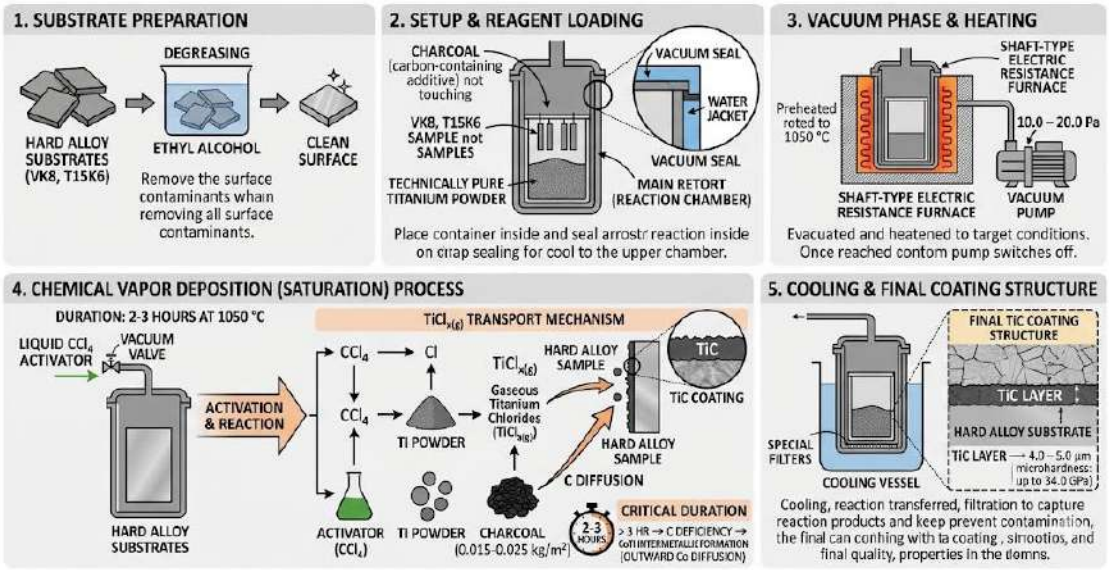
Salt bath carburizing at a low temperature of 640 °C was performed on a Ti6Al4V alloy substrate to synthesize a titanium carbide thin film for improved tribological performance [5]. The procedure included a 45-minute preheating phase at 500 °C followed by a 3.5-hour immersion in a salt bath composed of urea and carbonates, which facilitated carbon infiltration and the formation of a high-hardness Ti8C5 carbide phase [5]. This surface treatment increased the substrate hardness from an initial 370.65 HV to a peak of 953.28 HV, with the hardness profile indicating an effective infiltrated layer depth of approximately 40 μm before the values stabilized at the matrix hardness [5],[5]. Results from dry friction tests conducted at room temperature revealed that the friction coefficient was reduced by 55.9%, dropping from 0.34 to 0.15 under a 300 N load [5]. Additionally, the treatment significantly enhanced wear resistance, achieving a mass wear loss that was 29 times lower than that of the untreated Ti6Al4V alloy when tested under a 100 N load[5].

Figure 8. Salt bath carburizing process illustration



CVD Titanizing via diffusion metallization was performed on VK8 and T15K6 hard alloy substrates to form protective carbide coatings [12]. The process was conducted at a temperature of 1050 °C for a duration of 2 to 3 hours within a closed reaction chamber under reduced pressure, utilizing technically pure titanium powder, a carbon-containing additive, and carbon tetrachloride (CCl_4) as a chemical activator [12]. Results achieved under optimal conditions (2 hours of saturation) include the formation of a titanium carbide layer with a thickness of 4.0–5.0 μm and a high microhardness ranging from 33.0 GPa for VK8 to 34.0 GPa for T15K6 [12]. While a significant improvement in wear resistance was observed, increasing the saturation time to 3 hours or more led to the formation of a CoTi intermetallic surface layer and a carbon-depleted sublayer containing the Co_3W_3C phase, which can negatively impact the coating's properties [12]. Although specific friction coefficient values were not explicitly detailed, the study confirmed that the resulting TiC layer effectively enhances tool material performance by providing a well-defined, hard boundary with the substrate [12].

Figure 9. CVD CarboTitanizing process illustration



Gas carburizing followed by **thermo-reactive diffusion** salt bath processing was employed to deposit a titanium carbide coating onto an AISI 1020 steel substrate [13]. The process initiated with gas carburizing at 950 °C for 15 hours at a pressure of 200–300 Pa using methane to enrich the surface carbon content, after which TRD was performed in a salt bath at 900 °C for 3 hours [13]. The resulting coating achieved a thickness of 7.5 ± 0.3 μm and an average surface micro-hardness of 1885 ± 121 HV0.025, which represents a significant enhancement over the 185 ± 21 HV0.025 hardness of the bare substrate [13]. Tribological evaluations indicated a friction coefficient ranging from 0.45 to 0.56, which averaged 0.49 for the duplex-treated sample, and a high critical adhesion failure load of approximately 52 N [13]. Furthermore, this duplex treatment resulted in a 78% reduction in specific wear volume loss compared to the untreated low-carbon steel [13].

Figure 10. TRD with pre gas carburizing process illustration

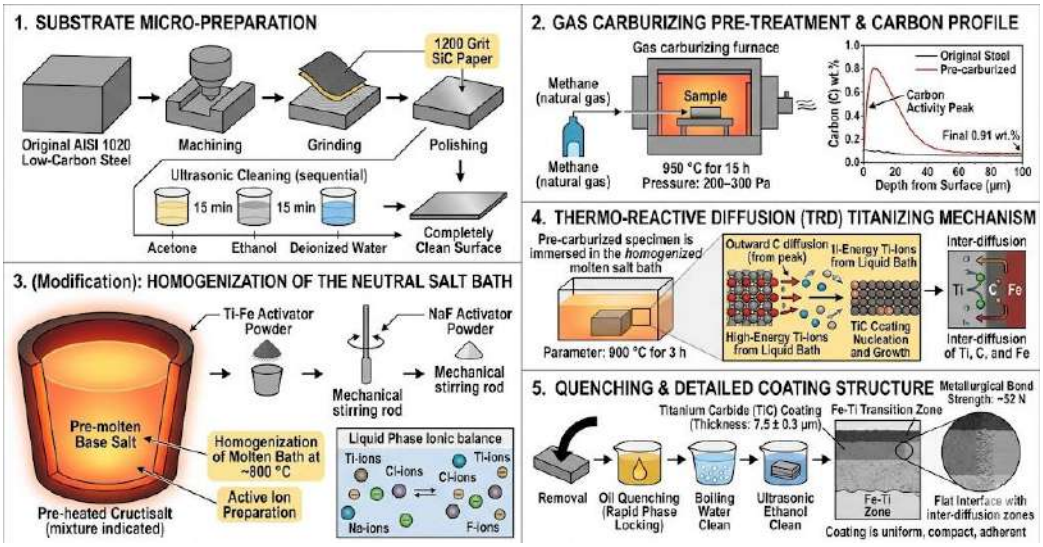


Table 1 Summary comparison ok key characteristics

Process	Substrate	Specs	Results	Ref.
ISDM	Commercial Pure Titanium (CP-Ti) and Cast Iron	1000 °C; 2 hours; 40 MPa constant pressure; Vacuum $< 10^{-2}$ Pa.	Thickness: ~5 µm; Hardness: 16.2–42.9 GPa; El. modulus: 557.4 GPa Adhesion: > 225 MPa; TiC Vol%: > 95%.	[5]
Laser cladding	65Mn steel	Cleaning: 40 kHz ultrasonic (15 min/solvent). Powder: TiC (5, 10, 15 wt.%) + Fe-based alloy. Milling: 180 rpm / 90 min. Drying: 130°C / 90 min. Atmosphere: Ar gas (≥ 99.999%) at 15 L/min.	**Microhardness:** 890 HV (Avg), 912.24 HV (Peak); **CoF:** 0.3811–0.4468; **Hardness depth:** 0.6 mm	[6]
Dual-Ion Beam Sputtering	YG8 cemented carbide	pre-coated with PVD-TIC **Cleaning:** Aqueous ethanol ultrasonic (30 min). **Vacuum:** 2.0×10^{-3} Pa. **N-Ion Injection Energy:** 40 kV. **Injected Dose:**	Microhardness: 2238 HV (Substrate: 1672 HV). Avg CoF: 0.283 (Substrate: 0.482). Wear Mark Area: 90.535 μm^2 (97.6% reduction vs	[7]

		$2.4 \times 10^{18}/cm^2$	substrate). Friction Load: 50 N at 100 **r/min.**	
Air pulsed plasma deposition	AISI 4145H	10 pulses; 4.0 kV discharge; 1 ms duration; Atmospheric pressure.	Thickness**:** 24–31 µm; Hardness**:** 1516–2029 HV (carbides); CoF**:** 0.10 (vs SiC) to 0.52 (vs 100Cr6). TiC + WC	[8]
HVOF thermal spraying	SS316 stainless steel	Pre-treatment: Sand-blasting (Al_2O_3, 16 mesh) at 5 bar for 6–8 μm roughness. Pure TiC or TiC+NiCr powders. O_2 (260 SLPM, 7 bar); LPG Fuel (60 SLPM, 10 bar); Air (450 SLPM, 6 bar); N_2 carrier (20 SCFH) Spray Velocity: 700 m/s; Distance: 6 inches	Pure TiC Coating: Thickness 229 ± 21 μm**;** Microhardness 1154 ± 21 $HV_{9.81N}$**;** Porosity 1.45 ± 0.08**%.** TiC+50% Binder: Thickness 281 ± 28 μm**;** Microhardness 845 ± 35 $HV_{9.81N}$**;** Porosity 1.87 ± 0.09**%.** Max Erosion Conditions: 40 m/s stream velocity, 8 cm SOD, and 60˚ attack angle.	[9]
TIG welding	Commercial Pure Titanium	30 V; 90 A; 1 mm/s speed; Argon gas (20 L/min); Pre-heat: 80 °C (1h).	Thickness**:** 0.633 mm; Microhardness**:** 383 HV5; Roughness **(R_a):** 0.367 µm; Wear rate**:** $\leq 0.1 \times 10^{-12} m^3 m^{-1}$.	[3]
Tungsten arc melting	UNS S31803 duplex stainless steel	140 A; 15–25 Hz pulses; Argon gas (15 L/min); Pre-heat: 80 °C (1h).	Max Microhardness**:** 415.96 HV (at 25 Hz); Wear rate**:** 1.01×10^{-5} (Al_2O_3 ball); TiC conc: 91.60%.	[10]
Salt bath carburiz	Ti6Al4V alloy	640 °C; 3.5 hours; Pre-heat: 500 °C (45 min); Urea + Carbonate bath.	Depth**:** ~40 µm; Peak Hardness**:** 953.28 HV; CoF**:** 0.15	[4]

ing			(under 300 N load); Wear loss: 29x reduction.	
CVD Titanizing	VK8 & T15K6 hard alloys	1050 °C; 2–3 hours; Reduced pressure; CCl_4 chemical activator.	Thickness**:** 4.0–5.0 µm; Microhardness**:** 33.0 GPa (VK8) to 34.0 GPa (T15K6).	[11]
Gas carburizing	AISI 1020 steel	Stage 1: 950 °C, 15h, 200–300 Pa (CH_4); Stage 2: 900 °C, 3h (Salt bath).	Thickness**:** 7.5 ± 0.3 µm; Avg Microhardness**:** 1885 ± 121 HV0.025; CoF**:** 0.49; Adhesion**:** ~52 N.	[12]

Discussion

Based on analysis we can observe that there is still research work around TiC coatings, especially when it is combined as composite with other materials to use the best of two worlds, when substrate and coating improves each other. Each technique has its pros and cons, Laser cladding and TIG looks easy for scaling for industrial usage but laser cladding requires special equipment and cannot cover out of sight surfaces, same for TIG welding. ISDM requires some postprocessing to remove unnecessary cast iron layer, otherwise TiC will be sandwiched between CI layers and will have limited application. Conversely, methodologies such as chemical vapor deposition and thermal diffusion methods offer excellent conformality, enabling deposition on complex geometries and internal surfaces, albeit often requiring higher processing temperatures[3]. For example, chemical deposition and diffusion boron and titanium methods can yield reinforced layers up to 400–500 µm thick with microhardness values reaching 20,000 MPa for TiC [14]. That novel combination of chemical pretreatment and subsequent thermochemical treatment presents the possibility of achieving composite TiC coating, but the chemical pre treatment stage requires to conduct additional experimental research to develop best recipe and process parameters.

Conclusion

The advancement of hard coatings, particularly those incorporating titanium carbide, is crucial for enhancing the service life and reducing maintenance costs of components exposed to harsh environments, thereby directly addressing limitations such as low hardness and poor wear resistance [7]. This comprehensive review highlights the diverse application methods and sophisticated techniques employed for TiC surface engineering, demonstrating significant improvements in microhardness, wear resistance, and friction reduction across various substrates[3]. All analyzed recent researches of TiC coating was synthesized into a summary table 1 to highlight most important data.

References

[1] D. Ni *et al.* , "Advances in ultra-high temperature ceramics, composites, and coatings," *Journal of Advanced Ceramics* , vol. 11, no. 1, pp. 1–56, Dec. 2021, doi: 10.1007/s40145-021-0550-6.

[2] M. Mhadhbi, "Titanium Carbide: Synthesis, Properties and Applications," *Brilliant Engineering* , vol. 2, no. 2, pp. 1–11, Aug. 2020, doi: 10.36937/ben.2021.002.001.

[3] S. Kavishwar, V. Bhaiswar, S. Kochhar, A. Fande, and V. Tandon, "State-of-the-Art titanium carbide hard coatings: a comprehensive review of mechanical and tribological behaviour," *Engineering Research Express* , vol. 6, no. 4, pp. 42401–42401, Sep. 2024, doi: 10.1088/2631-8695/ad7fb7.

[4] G. Rasool, S. Mridha, and M. M. Stack, "Mapping wear mechanisms of TiC/Ti composite coatings," *Wear* , pp. 498–508, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.wear.2015.03.022.

[5] X. Liu, L. Liu, B. Sun, B. Li, and X. Ke, "The preparation of titanium carbide thin film of Ti6Al4V at low temperature and study of friction and wear

properties," *Journal of Measurements in Engineering* , vol. 4, no. 3, pp. 167–172, Sep. 2016, doi: 10.21595/jme.2016.17563.

[6] W. Ding, Y. Yu, X. Wang, and D. Mo, "Fabrication of TiC–Fe-Based Composite Coating on 65Mn Steel Surface by Laser Cladding Technology," *Journal of Materials Engineering and Performance* , vol. 35, no. 14, pp. 14018–14030, Nov. 2025, doi: 10.1007/s11665-025-12604-5.

[7] H. Bai, L. Kang, Z. Wang, L. Zhong, and Y. Xu, "TiC–Fe gradient coating on pure titanium fabricated by in-situ solid-phase diffusion: toward superior hardness and interfacial adhesion strength," *Journal of Materials Research and Technology* , vol. 25, pp. 1141–1149, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.013.

[8] D. Zhongyu, Zhangfaguang, Guoyinglu, and Chenshaobo, "TiC nano-coating and their tribological properties were deposited by doal-ion beam sputtering on the tool surface," *Journal of Physics Conference Series* , vol. 1748, no. 6, pp. 62029–62029, Jan. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1748/6/062029.

[9] Yu. G. Chabak *et al.* , "Structural and Tribological Studies of '(TiC + WC)/Hardened Steel' PMMC Coating Deposited by Air Pulsed Plasma," *Metals* , vol. 12, no. 2, pp. 218–218, Jan. 2022, doi: 10.3390/met12020218.

[10] R. Sharma *et al.* , "Development, Characterization, and Cavitation Erosion Analysis of High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) sprayed TiC and (70Cu-30Ni)-Cr Based Composite Coatings on SS316 Steel," *Research Square* , May 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-2860707/v1.

[11] A. Q. Shamsuri *et al.* , "Effect of TiC Nanoparticles Deposition on UNS S31803 Surface Using Tungsten Arc Melting Method," *International Journal of Nanoelectronics and Materials (IJNeaM)* , vol. 18, pp. 75–83, Dec. 2025, doi: 10.58915/ijneam.v18idecember.2811.

[12] A. Dehula, N. F. Kharchenko, T. Hovorun, V. Sitnikov, V. Hryb, and D. Pakhnenko, "Structure and Properties of Diffusion Titanium Coatings Based on

Hard Alloys," *Journal of Nano- and Electronic Physics* , vol. 17, no. 6, pp. 6008–1, Jan. 2025, doi: 10.21272/jnep.17(6).06008.

[13] J. Zhang *et al.* , "Anti-wear titanium carbide coating on low-carbon steel by thermo-reactive diffusion," *Surface and Coatings Technology* , vol. 364, pp. 265–272, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.085.

[14] A. E. Stetsko and V. Korendiy, "Complex Method of Ni-Co-P Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Titanium," in *Springer proceedings in physics* , Springer Nature, 2024, pp. 275–285. doi: 10.1007/978-3-031-67519-5_19.

Олешко Олексій Юрійович, аспірант, Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна, https://orcid.org/0009-0004-6834-1669

Oleshko Oleksii, Postgraduate Student, National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine, https://orcid.org/0009-0004-6834-1669

ІННОВАЦІЙНА АКТИВНІСТЬ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЕЙ РЕГІОНУ ЯК ДРАЙВЕР ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

INNOVATION ACTIVITY OF HIGH-TECH INDUSTRIES OF THE REGION AS A DRIVER OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PUBLIC ADMINISTRATION AND THE NATIONAL ECONOMY

Анотація

Статтю присвячено дослідженню інноваційної активності високотехнологічних галузей регіону як драйвера цифрової трансформації державного управління та національної економіки на прикладі оборонно-промислового комплексу України. Обґрунтовано, що в умовах воєнного стану саме оборонно-промисловий комплекс є тим каталізатором, який стимулює впровадження цифрових технологій у сферу державного управління, створює попит на інноваційну продукцію та формує нові ринки. Проаналізовано динаміку інноваційної активності в оборонній сфері України, включаючи показники створення та впровадження інноваційних зразків озброєння та військової техніки (безпілотні літальні апарати, роботизовані платформи, системи радіоелектронної боротьби, засоби кіберзахисту). Розглянуто класифікацію високотехнологічних галузей за

критерієм відношення витрат на науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи до валової доданої вартості: високотехнологічні (біотехнології, фармацевтика, авіабудування, космічна техніка, приладобудування), середньотехнологічні високого рівня, середньотехнологічні низького рівня та низькотехнологічні галузі. Визначено структуру внутрішніх витрат на дослідження та розробки в секторі інформаційно-комунікаційних технологій, які за останнє десятиліття зросли в п'ять разів у діючих цінах та в два з половиною рази в постійних цінах. Проведено порівняльний аналіз динаміки експорту та імпорту високотехнологічних товарів в Україні, виявлено позитивну тенденцію зростання експорту (в 2,5 раза за 2013-2023 роки) при відносно стабільному імпорті. Досліджено показники підготовки кадрів у сфері інформаційно-комунікаційних технологій, включаючи середню професійну освіту, вищу освіту (бакалаврат, спеціалітет, магістратуру) та підготовку науково-педагогічних кадрів в аспірантурі. Виявлено, що в Україні частка зайнятих у секторі ІКТ становить лише 2,5% від загальної чисельності зайнятих, що втричі менше, ніж у Фінляндії та Швеції (7,6% та 7,5% відповідно). На основі проведеного аналізу запропоновано напрями підвищення інноваційної активності оборонно-промислового комплексу України як інструменту цифрової трансформації державного управління, включаючи створення інтеграційної платформи для координації діяльності державних військових структур, наукових установ, приватного бізнесу та громадських інституцій; запровадження механізму прискореного впровадження інноваційних розробок (скорочення циклу «ідея – прототип – серійний зразок» з 3-5 років до 6-12 місяців); забезпечення підготовки кваліфікованих кадрів за спеціальностями у сфері інформаційних технологій з акцентом на дуальну форму освіти (поєднання теоретичного навчання з практичною роботою на підприємствах оборонно-промислового комплексу).

Ключові слова: інноваційна активність, високотехнологічні галузі, оборонно-промисловий комплекс, цифрова трансформація державного управління, кадрове забезпечення, ІКТ-сектор, дослідження та розробки, високотехнологічний експорт.

Abstract. The article is devoted to the study of the innovation activity of high-tech industries of the region as a driver of digital transformation of public administration and the national economy on the example of the defense industrial complex of Ukraine. It is substantiated that under martial law, it is the defense industrial complex that is the catalyst that stimulates the introduction of digital technologies into public administration, creates demand for innovative products, and forms new markets. The dynamics of innovation activity in the defense sector of Ukraine are analyzed, including indicators of creation and implementation of innovative samples of weapons and military equipment (unmanned aerial vehicles, robotic platforms, electronic warfare systems, cyber protection means). The classification of high-tech industries according to the criterion of the ratio of research and development costs to gross value added is considered: high-tech (biotechnology, pharmaceuticals, aircraft construction, space technology, instrumentation), medium-high-tech, medium-low-tech, and low-tech industries. The structure of internal expenditures on research and development in the information and communication technology sector is determined, which has increased fivefold in current prices and two and a half times in constant prices over the last decade. A comparative analysis of the dynamics of exports and imports of high-tech goods in Ukraine is carried out, a positive trend of export growth (2.5 times over 2013-2023) with relatively stable imports is revealed. Indicators of personnel training in the field of information and communication technologies are studied, including secondary vocational education, higher education (bachelor's, specialist's, master's degrees) and training of scientific and

pedagogical staff in postgraduate studies. It is revealed that the share of employed in the ICT sector in Ukraine is only 2.5% of the total number of employed, which is three times less than in Finland and Sweden (7.6% and 7.5%, respectively). Based on the analysis, directions for increasing the innovation activity of the defense industrial complex of Ukraine as a tool for digital transformation of public administration are proposed, including the creation of an integration platform for coordinating the activities of state military structures, scientific institutions, private business, and public institutions; introduction of a mechanism for accelerated implementation of innovative developments (reducing the cycle from idea to prototype to serial sample from 3-5 years to 6-12 months); ensuring the training of qualified personnel in information technology specialties with an emphasis on dual education (combining theoretical training with practical work at defense industrial complex enterprises).

Keywords: innovation activity, high-tech industries, defense industrial complex, digital transformation of public administration, personnel training, ICT sector, research and development, high-tech export.

Постановка проблеми

В умовах воєнного стану та повоєнної відбудови України особливого значення набуває інноваційна активність високотехнологічних галузей, яка є критичним драйвером цифрової трансформації державного управління та національної економіки. Саме оборонно-промисловий комплекс (ОПК) виступає тим каталізатором, який стимулює впровадження цифрових технологій у сферу державного управління, створює попит на інноваційну продукцію, формує нові ринки та забезпечує технологічний суверенітет держави [1]. Досвід війни російської федерації проти України переконливо доводить, що ефективність ведення бойових дій напряму залежить від здатності держави швидко створювати, випробовувати та масштабувати

інноваційні зразки озброєння та військової техніки (безпілотні літальні апарати різних типів, роботизовані платформи, системи радіоелектронної боротьби, засоби кіберзахисту, системи зв'язку на базі технологій штучного інтелекту). Ці технології, створені для оборонних потреб, знаходять все ширше застосування в системі державного управління – від забезпечення кібербезпеки державних реєстрів до моніторингу надзвичайних ситуацій за допомогою безпілотних авіаційних систем.

Однак інноваційна активність оборонно-промислового комплексу України як інструмент цифрової трансформації державного управління стикається з низкою системних проблем, що потребують негайного вирішення. По-перше, це критичний дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). В Україні частка зайнятих у секторі ІКТ становить лише 2,5% від загальної чисельності зайнятих, що втричі менше, ніж у Фінляндії та Швеції (7,6% та 7,5% відповідно) [2]. Це створює значні перешкоди для впровадження цифрових технологій як в оборонній сфері, так і в системі державного управління в цілому. По-друге, це тривалий цикл впровадження інноваційних розробок – від ідеї до серійного зразка в Україні проходить 3-5 років, тоді як в країнах НАТО цей цикл скорочено до 6-12 місяців, що унеможливлює оперативне реагування системи державного управління на нові виклики.

По-третє, недостатньою є інтеграція інноваційних розробок оборонно-промислового комплексу в систему державного управління. Безпілотні системи, технології штучного інтелекту, системи кіберзахисту, створені для потреб армії, можуть бути ефективно використані для моніторингу довкілля, охорони державного кордону, реагування на надзвичайні ситуації, забезпечення кібербезпеки державних інформаційних ресурсів, однак відсутній дієвий механізм трансферу таких технологій у цивільну сферу державного управління [3]. По-четверте, спостерігається значне відставання

України від провідних країн за обсягами експорту високотехнологічної продукції, що свідчить про недостатню конкурентоспроможність вітчизняного оборонно-промислового комплексу на світових ринках.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених інноваційній діяльності в оборонній сфері, комплексного дослідження, яке б розглядало інноваційну активність оборонно-промислового комплексу саме як драйвер цифрової трансформації державного управління та національної економіки, досі не проводилося. Відсутність такого дослідження унеможливлює ефективне використання потенціалу оборонних інновацій для модернізації системи державного управління.

Отже, актуальним науковим завданням є аналіз інноваційної активності високотехнологічних галузей регіону на прикладі оборонно-промислового комплексу України, визначення її впливу на цифрову трансформацію державного управління та національної економіки, а також розробка практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності використання оборонних інновацій у системі державного управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Теоретичні засади інноваційної активності високотехнологічних галузей досліджували багато зарубіжних вчених. Й. Шумпетер обґрунтував теорію інновацій та підприємництва, довівши, що саме інновації є рушійною силою економічного розвитку. Г. Менш розробив класифікацію інновацій (базисні, покращуючі, псевдоінновації) та досліджував закономірності їх появи. А. Кляйнкнехт досліджував формування кластерів нововведень на різних фазах технологічного циклу. В Україні проблематику інноваційної активності в оборонній сфері досліджували Н.П. Гусаков (інноваційні системи в умовах нестабільності), І.В. Андронова (державна підтримка науки, технологій та інновацій), В.М. Борисов (інноваційно-насичені інвестиції в машинобудуванні) [4]. Окремі питання кадрового забезпечення

цифрової трансформації державного управління досліджували І.В. Рибов, О.Г. Кебадзе (управління людськими ресурсами наукоємних підприємств), К.В. Єкимова (ефективні інструменти фінансового менеджменту в умовах цифрової економіки) [5]. Однак комплексного дослідження інноваційної активності оборонно-промислового комплексу як драйвера цифрової трансформації державного управління в українській науці досі не проводилося.

Мета статті

На основі аналізу інноваційної активності високотехнологічних галузей регіону на прикладі оборонно-промислового комплексу України визначити її вплив на цифрову трансформацію державного управління та національної економіки, виявити проблемні аспекти та розробити практичні рекомендації щодо підвищення ефективності використання оборонних інновацій у системі державного управління.

Виклад основного матеріалу

Цифрова трансформація державного управління нерозривно пов'язана з інноваційною активністю високотехнологічних галузей, які створюють технологічну основу для модернізації публічних сервісів, забезпечення кібербезпеки державних інформаційних ресурсів та оперативного реагування на надзвичайні ситуації. В умовах воєнного стану саме оборонно-промисловий комплекс стає тим локомотивом, який стимулює розвиток цифрових технологій та їх впровадження в систему державного управління [1].

Згідно з класифікацією Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), високотехнологічні галузі визначаються за критерієм відношення витрат на науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НДДКР) до валової доданої вартості. До високотехнологічних галузей належать ті, в яких це відношення перевищує 8%: біотехнології,

фармацевтика, виробництво літальних апаратів (включаючи космічні), виробництво електронних компонентів, апаратури для радіо, телебачення та зв'язку, виробництво медичних виробів та приладів. У структурі оборонно-промислового комплексу України до високотехнологічних належать підприємства авіабудування (ДП «Антонов»), ракетно-космічної галузі (ДП «Південне», ДП «Південмаш»), радіоелектронної промисловості (концерн «Укроборонпром»), виробництва засобів зв'язку та кіберзахисту [2].

Структура внутрішніх витрат на дослідження та розробки в секторі інформаційно-комунікаційних технологій свідчить про позитивну динаміку. За останнє десятиліття (2013-2023 роки) ці витрати зросли в п'ять разів у діючих цінах та в два з половиною рази в постійних цінах, що є свідченням зростаючої ролі ІКТ в інноваційному розвитку державного управління. Частка сектору ІКТ в загальному обсязі внутрішніх витрат на дослідження та розробки збільшилася за цей період з 1,3% до 3,7%, що також є позитивною тенденцією. Найбільшу частку в структурі витрат складає придбання обладнання, пов'язаного з цифровими технологіями (близько 46%), оплата послуг електрозв'язку (близько 21%), придбання та адаптація програмного забезпечення (близько 18%) [3].

Аналіз динаміки експорту та імпорту високотехнологічних товарів в Україні за 2013-2023 роки демонструє позитивну тенденцію зростання експорту (в 2,5 раза) при відносно стабільному імпорті. Якщо у 2013 році частка високотехнологічних товарів в загальному обсязі експорту України становила менше 3%, то у 2023 році цей показник перевищив 7%, що свідчить про структурну перебудову українського експорту в бік високотехнологічної продукції, зокрема продукції оборонно-промислового комплексу (безпілотні літальні апарати, системи радіоелектронної боротьби, засоби кіберзахисту). Частка імпорту високотехнологічних товарів за цей же

період зросла незначно – з 62% до 67%, що свідчить про певну залежність України від імпорту критичних технологій [4].

Дослідження показників підготовки кадрів у сфері інформаційно-комунікаційних технологій виявило суттєвий розрив між потребами цифрової трансформації державного управління та наявними кадровими ресурсами. Станом на 2023 рік в Україні налічувалося близько 200 тисяч здобувачів вищої освіти за спеціальностями галузі знань «Інформаційні технології», що становить приблизно 7% від загального контингенту студентів. Випуск бакалаврів, спеціалістів та магістрів за цими спеціальностями у 2023 році перевищив 50 тисяч осіб. Однак лише третина з них працевлаштовується за фахом, а частка тих, хто працює в органах державного управління, становить менше 5%. Це свідчить про низьку привабливість державної служби для ІТ-фахівців через неконкурентоспроможний рівень оплати праці та застарілі форми організації роботи [5].

Випуск аспірантів за спеціальностями у сфері ІКТ (комп'ютерні та інформаційні науки, інформатика та вимірювальна техніка, електроніка та телекомунікації) у 2023 році становив близько 1500 осіб, з яких лише 300 осіб захистили дисертації. Це свідчить про проблеми з підготовкою науково-педагогічних кадрів вищої кваліфікації, які могли б забезпечити підготовку фахівців для цифрової трансформації державного управління. Показовою є вікова структура ІТ-фахівців в Україні: близько 50% з них молодші 35 років, тоді як у Швеції та Фінляндії цей показник не перевищує 30%. З одного боку, це свідчить про привабливість ІТ-сфери для молоді, з іншого – про відсутність досвідчених фахівців старшого віку, які могли б передавати знання та забезпечувати наступність поколінь у цифровій трансформації державного управління [1].

На основі проведеного аналізу запропоновано такі напрями підвищення інноваційної активності оборонно-промислового комплексу України як інструменту цифрової трансформації державного управління.

Перший напрям – створення інтеграційної платформи для координації діяльності державних військових структур, наукових установ, приватного бізнесу та громадських інституцій. Пропонується створити на базі Міністерства цифрової трансформації України Агентство оборонних інновацій (за зразком DARPA), яке б забезпечувало трансфер технологій з оборонної сфери в систему державного управління. Основними завданнями Агентства мають стати: виявлення перспективних оборонних розробок, які можуть бути використані в цивільній сфері державного управління; фінансування пілотних проєктів з адаптації таких розробок до потреб державних органів; координація діяльності учасників інноваційного процесу; моніторинг результатів впровадження [2].

Другий напрям – запровадження механізму прискореного впровадження інноваційних розробок в систему державного управління. Пропонується скоротити цикл «ідея – прототип – серійний зразок» з 3-5 років до 6-12 місяців шляхом впровадження «регулятивних пісочниць» – спеціального правового режиму, який дозволяє тестувати інноваційні рішення в системі державного управління без отримання повного пакета дозвільних документів (за умови дотримання базових вимог безпеки). Для реалізації цього механізму необхідно внести зміни до Закону України «Про інноваційну діяльність» та підзаконних нормативно-правових актів, які регулюють порядок впровадження нових технологій в діяльність органів державної влади [3].

Третій напрям – забезпечення підготовки кваліфікованих кадрів для цифрової трансформації державного управління. Пропонується запровадити дуальну форму освіти за спеціальностями у сфері інформаційних технологій,

яка передбачає поєднання теоретичного навчання у закладах вищої освіти з практичною роботою на підприємствах оборонно-промислового комплексу та в органах державної влади. Крім того, пропонується створити систему безперервного підвищення кваліфікації державних службовців з питань цифрової трансформації та кібербезпеки з обов'язковим навчанням не рідше одного разу на два роки.

Четвертий напрям – створення системи моніторингу та оцінювання впливу інноваційної активності оборонно-промислового комплексу на цифрову трансформацію державного управління. Пропонується запровадити щорічне оцінювання рівня цифрової зрілості органів державної влади за методикою, що включає показники використання інноваційних розробок оборонного призначення (безпілотні системи для моніторингу, технології штучного інтелекту для аналізу даних, системи кіберзахисту критичної інфраструктури). Результати оцінювання мають оприлюднюватися у відкритому доступі та використовуватися для коригування державної політики [4].

П'ятий напрям – стимулювання розвитку оборонного IT-сектору та його інтеграції в систему державного управління. Пропонується запровадити податкові пільги для підприємств оборонно-промислового комплексу, які створюють робочі місця для IT-фахівців, та механізми державно-приватного партнерства для реалізації проєктів цифрової трансформації державного управління з використанням оборонних інновацій [5].

Висновки

Проведене дослідження інноваційної активності високотехнологічних галузей регіону як драйвера цифрової трансформації державного управління та національної економіки на прикладі оборонно-промислового комплексу України дає підстави для таких висновків.

По-перше, інноваційна активність оборонно-промислового комплексу є критичним драйвером цифрової трансформації державного управління в умовах воєнного стану, оскільки саме оборонні інновації (безпілотні системи, технології штучного інтелекту, засоби кіберзахисту) створюють технологічну основу для модернізації публічних сервісів, забезпечення кібербезпеки державних інформаційних ресурсів та оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Позитивна динаміка експорту високотехнологічних товарів (зростання в 2,5 раза за 2013-2023 роки) свідчить про зростання конкурентоспроможності українського оборонно-промислового комплексу.

По-друге, основними проблемами, що стримують використання оборонних інновацій для цифрової трансформації державного управління, є: критичний дефіцит кваліфікованих ІТ-кадрів в органах державної влади (частка зайнятих у секторі ІКТ становить лише 2,5%, що втричі менше, ніж у провідних країнах); тривалий цикл впровадження інноваційних розробок (3-5 років проти 6-12 місяців у країнах НАТО); недостатня інтеграція оборонних інновацій в систему державного управління; низька привабливість державної служби для ІТ-фахівців.

По-третє, запропоновані напрями підвищення інноваційної активності оборонно-промислового комплексу як інструменту цифрової трансформації державного управління (створення інтеграційної платформи на базі Агентства оборонних інновацій, запровадження механізму прискореного впровадження через «регулятивні пісочниці», забезпечення підготовки кваліфікованих кадрів через дуальну освіту, створення системи моніторингу та оцінювання, стимулювання розвитку оборонного ІТ-сектору) дозволяють усунути виявлені проблеми та підвищити ефективність використання оборонних інновацій в системі державного управління.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці конкретних механізмів фінансування Агентства оборонних інновацій

України, створенні методики оцінювання ефективності трансферу технологій з оборонної сфери в систему державного управління, а також на дослідженні міжнародного досвіду (Ізраїлю, США, Великої Британії) щодо використання оборонних інновацій для модернізації публічного управління.

Література

1. Балан О. С., Пульча Д. О. Стратегічні напрями підвищення інвестиційної привабливості підприємств Одеського регіону в умовах економічного відновлення. *Економічний журнал Одеського політехнічного університету*. 2026. № 1 (35). С. 5–13. URL: https://ejop.economics.net.ua/ejopu/2026/No1/5.pdf

2. Іляш О. І., Мажара Г. А. Теоретико-методологічні підходи до стратегування економічного розвитку на засадах поведінкових моделей прийняття рішень. *Економіка: реалії часу*. 2026. № 1 (83). С. 5–15. URL: https://etr.economics.net.ua/files/archive/2026/No1/5.pdf

3. Геєць В. М. Формування профілю stratehichno важливих видів промислової діяльності в Україні (погляд на перспективу). *Економіка України*. 2023. Т. 66, № 9 (742). С. 3–29. DOI: https://doi.org/10.15407/economyukr.2023.09.003

4. Богдан Т. П. Фінансові механізми стимулювання та відновлення економіки України. *Фінанси України*. 2023. № 5. С. 7–29. DOI: https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-5-1

5. Ілляшенко С. М., Шипуліна Ю. С. Цифрова трансформація як чинник підвищення інноваційного потенціалу підприємств. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2023. № 2. С. 84–96. DOI: https://doi.org/10.21272/mmi.2023.2-08

References

1. Balan, O. S., & Pulcha, D. O. (2026). Stratehichni napriamy pidvyshchennia investytsiinoi pryvablyvosti pidpryiemstv Odeskoho rehionu v umovakh ekonomichnoho vidnovlennia [Strategic directions for increasing the investment attractiveness of enterprises in the Odesa region in the context of economic recovery]. *Ekonomichnyi zhurnal Odeskoho politekhnichnoho universytetu [Economic Journal of Odessa Polytechnic University]*, (1), 5–13. https://ejop.economics.net.ua/ejopu/2026/No1/5.pdf

2. Ilyash, O. I., & Mazhara, H. A. (2026). Teoretyko-metodolohichni pidkhody do stratehuvannia ekonomichnoho rozvytku na zasadakh povedinkovykh modelei pryiniattia rishen [Theoretical and methodological approaches to strategizing economic development based on behavioral decision-making models]. *Ekonomika: realii chasu [Economics: time realities]*, (1), 5–15. https://etr.economics.net.ua/files/archive/2026/No1/5.pdf

3. Heiets, V. M. (2023). Formuvannia profiliu stratehichno vazhlyvykh vydiv promyslovoi diialnosti v Ukraini (pohliad na perspektyvu) [Profiling of strategically important types of industrial activity in Ukraine (a look into the future)]. *Ekonomika Ukrainy [Economy of Ukraine]*, *66*(9), 3–29. https://doi.org/10.15407/economyukr.2023.09.003

4. Bohdan, T. P. (2023). Finansovi mekhanizmy stymuliuvannia ta vidnovlennia ekonomiky Ukrainy [Financial mechanisms for stimulating and restoring the economy of Ukraine]. *Finansy Ukrainy [Finance of Ukraine]*, (5), 7–29. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-5-1

5. Illiashenko, S. M., & Shypulina, Yu. S. (2023). Tsyfrova transformatsiia yak chynnyk pidvyshchennia innovatsiinoho potentsialu pidpryiemstv [Digital transformation as a factor of increasing the innovative potential of enterprises]. *Marketynh i menedzhment innovatsii [Marketing and Management of Innovations]*, (2), 84–96. https://doi.org/10.21272/mmi.2023.2-08

Vydavatel:
Publishing house Education and Science s.r.o. IČO : 271 56 877.
Frýdlanská 15/1314 , Praha 8. MS v Praze , oddíl C,vložka 100614

STREDOEVROPSKY VESTNiK

PRO VEDU A VYZKUM

Vol. 1. № 6. 2026

Signed for printing on May 29, 2026
Format 60x90/8. Offset paper and printing Headset Times New Roman.
Mental printing. arc. 4,57. Edition 100 copies.