



Nº51 2024

**Annali d'Italia**

*Annali d'Italia*  
Scientific Journal of Italy

ISSN 3572-2436

*Annali d'Italia (Italy's scientific journal) is a peer-reviewed European journal covering top themes and problems in various fields of science.*

*The journal offers authors the opportunity to make their research accessible to everyone, opening their work to a wider audience.*

**Chief editor:** Cecilia Di Giovanni

**Managing editor:** Giorgio Bini

- Hoch Andreas MD, Ph.D, Professor Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy (Munich, Germany)
- Nelson Barnard Ph.D (Historical Sciences), Professor (Malmö, Sweden)
- Roberto Lucia Ph.D (Biological Sciences), Department Molecular Biology and Biotechnology (Florence, Italy)
- Havlíčková Tereza Ph.D (Technical Science), Professor, Faculty of Mechatronics and Interdisciplinary Engineering Studies (Liberec, Czech Republic)
- Testa Vito Ph.D, Professor, Department of Physical and Mathematical management methods (Rome, Italy)
- Koshelev Andrey Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Faculty of Philology and Journalism (Kiev, Ukraine)
- Nikonorov Petr Doctor of Law, Professor, Department of Criminal Law (Moscow, Russia)
- Bonnet Nathalie Ph.D (Pedagogical Sciences), Faculty of Education and Psychology (Lille, France)
- Rubio David Ph.D, Professor, Department of Philosophy and History (Barcelona, Spain)
- Dziedzic Stanisław Ph.D, Professor, Faculty of Social Sciences (Warsaw, Poland)
- Hauer Bertold Ph.D (Economics), Professor, Department of Economics (Salzburg, Austria)
- Szczepańska Janina Ph.D, Department of Chemistry (Wrocław, Poland)
- Fomichev Vladimir Candidate of Pharmaceutical Sciences, Department of Clinical Pharmacy and Clinical Pharmacology (Vinnytsia, Ukraine)
- Tkachenko Oleg Doctor of Psychology, Associate Professor (Kiev, Ukraine)

and other experts

500 copies

Annali d'Italia

50134, Via Carlo Pisacane, 10, Florence, Italy

email: [info@anditalia.com](mailto:info@anditalia.com)

site: <https://www.anditalia.com/>

# **CONTENT**

## **BIOLOGICAL SCIENCES**

***Gasimova G.A., Aliyev I.A.***

DISTRIBUTION PATTERNS OF FUNGI IN MOUNTAIN AND  
FOOTHILL SOILS AND CHARACTERISTICS OF MYCOBIOTA  
FORMATION ..... 3

## **CULTURAL SCIENCES**

***Song Yao, Wang Zhaopeng***

THE TRANSLATION AND COMMUNICATION OF CHINESE  
POETRY IN ITALIAN: A REVIEW ..... 6

## **ECONOMIC SCIENCES**

***Asatullaev Kh.S.***

ROLE OF STATE FISCAL (BUDGET-TAX) POLICY IN INCREASE  
OF POPULATION EMPLOYMENT ..... 11

***Khasanova Kh.Kh.***

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SERVICES BY  
ASSESSING RISKS IN THE BANKING SECTOR IN THE PROCESS  
OF ECONOMIC TRANSFORMATION ..... 16

## **PEDAGOGICAL SCIENCES**

***Hajiyeva U., Abdullazade N.***

THE CONCEPT OF "TEACHING TECHNOLOGIES": ESSENCE  
AND CONTENT ..... 21

## **PHYSICAL SCIENCES**

***Antonov A.A.***

PROOF OF PHYSICAL REALITY OF IMAGINARY NUMBERS  
AND EXPLANATION OF THEIR PHYSICAL ESSENCE ..... 25

***Skobenko O.V., Kulivar V.V.***

ODAY OF THE RESULTS OF RESEARCH ON THE INTERACTION  
OF LASER RADIATION WITH EXPLOSIVES ..... 36

## **SOCIAL SCIENCES**

***Aldona Minga, Ilir Sosoli, Dorjan Marku***

THE INFLUENCE OF SOCIAL INNOVATION IN A TERRITORIAL  
PROCESS (CASE STUDY ALBANIA) ..... 53

***Tatiana Roșca***

INNER CONFLICT AND MOTIVATIONAL DISINTEGRATION IN  
ADOLESCENTS. CROSS-CULTURAL INVESTIGATION ..... 59

***Suleimanov S.***

IMPACT OF AUTOMATION AND TECHNOLOGICAL  
DEVELOPMENT ON UNEMPLOYMENT ..... 57

## **TECHNICAL SCIENCES**

***Jana Milojevic, Ognjen Pantelic***

DOMAIN-DRIVEN DESIGN AND HEXAGONAL ARCHITECTURE  
..... 65

***Zuev L.B., Barannikova S.A., Gorbatenko V.V.***

AUTO-WAVE PHYSICS OF PLASTICITY ..... 75

# BIOLOGICAL SCIENCES

## DISTRIBUTION PATTERNS OF FUNGI IN MOUNTAIN AND FOOTHILL SOILS AND CHARACTERISTICS OF MYCOBIOTA FORMATION

**Gasimova G.A.,**

*higher education, PhD in biology, leading researcher*

*Institute of Microbiology of MSERA*

**Aliyev I.A.**

*higher education, PhD in biology, leading researcher*

*Institute of Microbiology of MSERA*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573766](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573766)

### Abstract

The presented work is dedicated to the study of structural organization, species diversity and distribution patterns of mycobiota formed in different soil types with different physico-chemical properties of Agdam and Barda regions located in the Karabakh zone of Azerbaijan. It was found that 23 types of fungi belonging to 14 genera are spread in the lands of Karabakh. It has been established that mold fungi are dominant in mountain-black soils and their number varies between  $15 \cdot 10^2 - 20 \cdot 10^3$  grams. However, the low amount of organic matter in the yellow mountain-forest soils leads to a decrease in both species diversity and number content of fungi. So, the quantity of fungi is equal to  $5 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^3$  g.

**Keyword:** soil types, soil composition, mycobiota, species diversity, number composition, the spread of fungi.

In addition to playing an important role in complex processes such as the exchange of water between the atmosphere and the hydrosphere and the circulation of mineral substances, the soil is considered the home of almost all living organisms. At the same time, it should be noted that the soil is the ecosystem most affected by anthropogenic influences [10;13]. Therefore, the impact mechanisms of the soil environment, whose physical and chemical properties change, on the living organisms living there change, and in some cases this effect is negative. It should be noted that the soil, especially the humus-containing fertile layer located in its upper part, is formed as a result of the activity of plant and animal organisms over many years, as well as the decomposition and mineralization of their remains after their destruction. [5;7] The quality of the soil depends on how rich it is with humus substances, as well as how it is protected from anthropogenic influences. In general, the amount of inorganic and organic substances in the soil plays an important role in determining the taxonomic structure of various living organisms, including fungi, living in the soil ecosystem [2;4].

It should be noted that the expansion of agricultural crops, including fodder crops, in the territories included in the Karabakh economic region, which has been liberated from occupation, has recently become a priority direction. Considering that the lands of Karabakh belong to the category of fertile lands and have been subjected to environmental terrorism for a long time, then the relevance of the researches conducted in this direction becomes even more important. Therefore, the study of the physico-chemical parameters of these soils was taken as the basis. It should be noted that for a long time, these lands have been regularly polluted with various toxic chemicals, including heavy metals, radionuclide compounds and other radioactive wastes, which have been discharged into the rivers [1;7]. This causes degradation of the physico-

chemical properties of the soil, which has a negative impact on the development of various living organisms living in the soil, including plants, especially on their productivity process. In this regard, it is considered appropriate to use plants that are resistant to stress factors, especially cultivated fodder plants, in such soils that are subject to pollution.

The purpose of the presented work was to study the effect of different types of soil with different physico-chemical properties located in different regions of Azerbaijan on species diversity and numerical composition of fungi.

### Materials and methods

Land plots located in the mountain and foothill zones of Aghdam and Barda regions were taken as the research area. As a result of the analysis of the samples taken, the genetic affiliation, physical and chemical properties, quality indicators, bioremediation properties, biology, etc. of the soil were determined. has been studied [9;12]. Soil samples for analysis were taken from mountain and foothills, yellow soils, respectively. To identify micromycetes in the mentioned soil types, first of all, soil samples are suspended and then transferred to nutrient medium in Petri dishes. treptomycin in the amount of 100 mg/l is added to the nutrient medium to fully clarify the species affiliation of the mushrooms, which almost stops the development of bacteria. The exposure period of incubation was carried out for 2 weeks at room temperature. The identified fungi are widely used in mycology due to their cultural and morphological characteristics. determined on the basis of known determinants [6;8;11]

### Results obtained and their discussion

The effectiveness of the soil as an edaphic factor depends mainly on its chemical composition. It was found that there are about 60 chemical elements in the soil. In particular, the presence of ionized elements in active form has a direct effect on the soil environment.

It has been determined that the settlement of fungi in the horizontal layers of the soil, rich in plant, animal and other organic remains, is characterized by higher quantitative indicators both in terms of species diversity and number composition. Thus, it is possible to find up to 1 million microscopic fungal organisms in 1 gram of soil. It should be noted that fungi play an extremely important role in soil mineralization and humus by actively destroying the organic residues found in the soil environment with their very powerful enzyme system. It has been known that the type of soil the fungi inhabit has a direct effect on their taxonomic structure and numerical composition. In other words, the physico-chemical properties of soil types, zonal characteristics of soils, their granulometric composition, humus level, and fertility rate determine the formation of specific successions of fungi. Part of the research was conducted in black soils located in the foothills and mountainous zones of the Karabakh mountain range. It should be noted that mountain black soils do not form an independent geographical zone and are spread in local areas, especially in forest massifs and foothills. A mild climate prevails in the mountain black soil zones, and the average annual temperature ranges from 8-12°C.. The amount of average annual precipitation is equal to 400-700 mm. At the same time, an average of 20-25 t/h of biomass enters the mountain black soil every year, and as a result of its decomposition and mineralization, the amount of calcium-humate com-

pounds in the soil increases. This accelerates the formation of black soils in the genesis of the soil. At the same time, it has been known that two periods are clearly visible in the black and yellow soils of the mountains and foothills. The first period coincides with July-August, when the temperature is high and the humidity is sufficient. The winter season covers the second period and is characterized by low temperature and high humidity. The mentioned favorable ecological conditions in the area intensify the process of soil formation and the accumulation of organic substances. Moreover, these conditions have a stimulating effect on the development of living organisms, including micro-mycetes, living in the soil. Thus, the stable and rich temperature, humidity, and chemical composition of the soil in the mountain black soil zones sufficiently increase the adaptation possibilities of living organisms, including fungi. Thus, the mycological analyzes conducted in mountain black soil zones show that the formed mycobiota is characterized by a fairly rich variety of species (table 1).

As it can be seen, mold fungi have a dominant position in mountain black soils. At the same time, the number content of fungi spread in mountain black soil is quite high and varies between  $15 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3$ /g.

At the same time, yellow mountain forest soils were also analyzed. It was found that these lands are mainly located in the foothills and at an altitude of 50-700 m above sea level due to their geographical distribution in Barda zone.

Table 1.

## Species diversity and numerical composition of fungi distributed in the soil of Karabakh zone

Nº	Species fungi	Mountain-black and fungi	Number composition of	Mountain yellow soil	Number composition of fungi
1	<i>Absidia cylindrospora</i>	-		+	
2	<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen	+		-	
3	<i>A.niger</i> Tiegh	+		-	
4	<i>Aspergillus niveus</i>	-		+	
5	<i>Botrytis cinerea</i> Pers Fr.	+		-	
6	<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	+		-	
7	<i>Fusarium oxysporum</i> Schldt	+		-	
8	<i>Fusarium sambucinum</i>	+		-	
9	<i>Geomycetes pannorum</i> Lk	+		-	
10	<i>Mycogone nigra</i>	-		+	
11	<i>Mortierella ramanniana</i>	+		-	
12	<i>Phielareia</i> sp.	+		-	
13	<i>Penicillium frequentans</i>	+		-	
14	<i>P.funiculosum</i> Thom	+		-	
15	<i>P.janthinellum</i> Biourge	+		-	
16	<i>Penicillium luteum</i>	-		+	
17	<i>P.thornii</i>	+		-	
18	<i>Rhizopus nigricans</i> Ehrenb.	+		-	
19	<i>Sclerotium agricola</i>	-		+	
20	<i>Talaromyces flavus</i>	-		+	
21	<i>Trichoderma koningii</i>	+		-	
22	<i>T.lignorum</i>	+		-	
23	<i>T.viride</i> Pers	-		+	

 $15 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3$  CFU/g. $5 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^3$  CFU/g.

The average annual temperature is 15°C. The average annual amount of precipitation reaches 1300-1500 mm, and the top layer of the soil is constantly washed away. Therefore, the amount of Si, Ca, Mg, Al, Mn, S, P elements in these soils is very low, and the amount of organic matter is low. This leads to deterioration of the components of the mycobiota formed in the soil. *Absidia cylindrospora*, *Aspergilus niveus*, *Penicillium luteum*, *Sclerotium agricola*, *Mycogone nigra*, *Talaromyces flavus*, *Fusarium sambucinum* are found in the yellow mountain forest soils. It should be noted that not only the species diversity of fungi, but also their number content is decreasing in yellow mountain forest soils. Thus, the number of fungi in these soils is  $5 \cdot 10^3$  -  $10 \cdot 10^3$ /g.

Thus, the variety of soil types, including the difference in physico-chemical properties, biotic and abiotic factors, has a significant impact on the species diversity and numerical composition of the mycobiota formed in the soil environment, both directly and indirectly.

### References

1. Aliyev G.A Soils of great Caucasus. Baku, 1994, p 430
2. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of soil fungi. IHW-Verlag, Eching, 2007.
3. Henderson L., Lilje E., Robinson K., Gleasen F., Lilje O. Effects of toxic metals on chytrids, fungal-like organisms and higher fungi // The Fungal Community, 2014, №16, 433p
4. Kay B.D., Angers D.A. / Soil structure 2002, CRC Press, Boca Raton, USA, p.249-295
5. Lohis M. Soils and Soil fertility. New York, 1978, 516 p
6. Litvinov M.A Determinant of mycroscopic soil fungi. M-L, 1969, 302 p
7. Mamedov G.Sh. The ecological conception of Azerbaijan Republic and its systematic study. Second Baku International Symposium. Baku, 1993, p:78-82
8. Polyanskaya D.T., Zvyachintsev D.G. Content and structure of fungal biomass as indicators of ecological condition of soil // Soil science, 2005, vol.5, p 706-714
9. Rao D.L.N., Aparna K., Mohanty S.R. Microbiology and biochemistry of soil organic matter, Carbon Se-questration and soil health//Ind. Yourn .Fertil. 2019, vol.15, p.:124-138.
10. Satchell J.E. Lumbricidae / Soil biology, New York, 1967, p.259-322/
11. Silvana A.M., Sueli S.F., Claudio A.M. Microbial biomass and microcalorimetric methods in tropicals soil / Thermochimica Acta, 2002 №394, p. 145-154.
12. Verdonck O., Gabriels R. Reference method for the determination of physical and chemical properties of plant substrates / Acta Hort 1992, №302, p. 169-179.
13. Zvyagintsev D.G. Soil and microorganisms. MSU, 1997, 328 p

# CULTURAL SCIENCES

## THE TRANSLATION AND COMMUNICATION OF CHINESE POETRY IN ITALIAN: A REVIEW

**Song Yao,**  
*Doctor of Philosophy*  
*Sichuan University*  
**Wang Zhaopeng**  
*Doctor of Philosophy*  
*Sichuan University*  
[DOI: 10.5281/zenodo.10573776](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573776)

## LA TRADUZIONE E LA COMUNICAZIONE DELLA POESIA CINESE IN ITALIA: UNA REVISIONE

**Song Yao**  
*Dottorato di Ricercar*  
*Universita di Sichuan*  
**Wang Zhaopeng**  
*Dottorato di Ricercar*  
*Universita di Sichuan*

### **Abstract**

This paper delves into the nuanced journey of Chinese poetry within the literary landscape of Italy, tracing its historical trajectory, examining translation practices and challenges, exploring its reception and communication, and envisioning future directions. The historical overview unveils pivotal encounters and influential figures, illuminating the assimilation of Chinese poetic sensibilities into Italian literary consciousness. It underscores the impact of translations by figures like Giuseppe Tucci and Fernanda Pivano, shaping Italian perceptions of Chinese poetic heritage. The exploration of translation practices dissects diverse approaches used to convey the essence of Chinese verse into Italian, addressing linguistic disparities, cultural nuances, and the intricacies of poetic expression. Comparative analyses of select poems and their renditions in Italian and other languages reveal the creative choices and challenges in conveying the subtleties of Chinese poetry. The reception and communication of Chinese poetry in Italy unfold as a vibrant cultural exchange within literary circles, educational settings, and multimedia platforms. It showcases how Chinese poetic forms enrich Italian artistic expressions and foster deeper cross-cultural dialogues. Furthermore, the paper envisions future trajectories, emphasizing interdisciplinary studies, digital initiatives, and the role of Chinese poetry in engendering global literary dialogues. Ultimately, the review highlights the enduring impact of Chinese poetry on Italy's literary landscape, emphasizing its role in fostering cultural exchange and setting the stage for deeper engagement between diverse literary traditions in a more interconnected global community.

### **Astratto**

Questo articolo esplora il sottile percorso della poesia cinese all'interno del panorama letterario italiano, tracciandone la traiettoria storica, esaminando le pratiche e le sfide della traduzione, esplorando la sua ricezione e comunicazione e immaginando direzioni future. La panoramica storica rivela incontri cruciali e figure influenti, evidenziando l'assimilazione delle sensibilità poetiche cinesi nella coscienza letteraria italiana. Sottolinea l'impatto delle traduzioni di figure come Giuseppe Tucci e Fernanda Pivano, che hanno plasmato le percezioni italiane dell'eredità poetica cinese. L'esplorazione delle pratiche di traduzione scomponete gli approcci diversificati utilizzati per trasmettere l'essenza della poesia cinese in italiano, affrontando disparità linguistiche, sfumature culturali e le complessità dell'espressione poetica. Le analisi comparative di alcune poesie e delle loro versioni in italiano e in altre lingue rivelano le scelte creative e le sfide nel trasmettere le sfumature della poesia cinese. La ricezione e la comunicazione della poesia cinese in Italia si sviluppano come un vivace scambio culturale all'interno dei circoli letterari, degli ambienti educativi e delle piattaforme multimediali. Mostra come le forme poetiche cinesi arricchiscano le espressioni artistiche italiane e favoriscano dialoghi interculturali più approfonditi. Inoltre, l'articolo immagina traiettorie future, enfatizzando gli studi interdisciplinari, le iniziative digitali e il ruolo della poesia cinese nel promuovere dialoghi letterari globali. In definitiva, la rassegna mette in luce il duraturo impatto della poesia cinese sul panorama letterario italiano, sottolineando il suo ruolo nel favorire lo scambio culturale e preparando il terreno per un coinvolgimento più profondo tra tradizioni letterarie diverse in una comunità globale più interconnessa.

**Keywords:** Chinese poetry, Italy, Translation, Literary exchange, Cultural reception.

**Parole chiave:** Poesia cinese, Italia, Traduzione, Scambio letterario, Ricezione culturale.

## I. Introduzione

Attraverso la storia, lo scambio di tradizioni poetiche tra culture ha servito da ponte, promuovendo la comprensione e l'apprezzamento attraverso vaste distanze geografiche. Nel campo del dialogo poetico interculturale, la traduzione e l'accoglienza della poesia cinese in Italia rappresentano una testimonianza del duraturo potere della letteratura nel superare barriere linguistiche e culturali.

La penisola italiana, rinomata per il suo ricco patrimonio letterario, ha accolto e abbracciato varie forme poetiche da tutto il mondo. Tuttavia, l'introduzione e l'assimilazione della poesia cinese in questo contesto rappresentano un incontro unico e sfaccettato che merita esplorazione e revisione accademica.

L'obiettivo di questo documento è approfondire il sottile percorso della poesia cinese in Italia, traccian-  
done la traiettoria storica, analizzando le complessità delle pratiche di traduzione e esaminando le modalità di ricezione e comunicazione nei circoli letterari italiani. Analizzando questi aspetti, questa revisione mira a illuminare l'interazione dinamica tra due tradizioni poetiche distinte ma interconnesse.

In questo contesto, è essenziale delineare il campo di questa revisione. Pur riconoscendo l'ampiezza e la profondità delle tradizioni poetiche cinese e italiana, questo documento si concentrerà principalmente su importanti tappe storiche, metodologie di traduzione impiegate, sfide incontrate, la ricezione della poesia cinese nei contesti letterari ed educativi italiani e l'impatto successivo sugli scambi culturali.

Questa esplorazione è situata al crocevia degli studi linguistici, culturali e letterari, con l'obiettivo di contribuire a una comprensione più profonda delle complessità inherentinella traduzione e nell'assimilazione della poesia straniera in un preciso contesto culturale. Analizzando il dialogo interculturale facilitato attraverso il mezzo della poesia, questa revisione aspira a far luce sulle più ampie implicazioni dello scambio letterario interculturale in un mondo sempre più interconnesso.

Sintetizzando narrazioni storiche, complessità linguistiche e l'impatto socio-culturale, questa revisione si impegna a offrire spunti sulla natura in evoluzione della comunicazione letteraria interculturale, con un focus specifico sulla risonanza delle sensibilità poetiche cinesi all'interno del vivace panorama delle tradizioni letterarie italiane.

Attraverso questa esplorazione emerge una comprensione completa, enfatizzando l'importanza della poesia come mezzo per superare i confini, promuovere la comprensione reciproca e arricchire il tessuto culturale delle nazioni.

## II. Panoramica storica della poesia cinese in Italia

L'infusione della poesia cinese nella sfera letteraria italiana abbraccia secoli, contrassegnata da momenti cruciali che hanno plasmato la sua assimilazione e ricezione all'interno della cultura italiana. Questi incontri, inizialmente facilitati attraverso traduzioni e scambi culturali, hanno gettato le basi per l'integrazione

graduale di questi versi affascinanti nel tessuto della coscienza letteraria italiana.

### A. Incontri precoci e figure influenti

L'inizio della poesia cinese nelle sfere italiane può essere attribuito ai resoconti di viaggiatori e missionari intraprendenti che si avventurarono nell'Estremo Oriente. I loro racconti, spesso ricchi di descrizioni vivide e resoconti poetici dell'esotico e del misterioso, offrivano spunti di versi cinesi a un pubblico italiano desideroso di nuove esperienze letterarie. Tra questi influencer precoci, Marco Polo si erge come figura prominente i cui resoconti di viaggio, pervasi da incantevoli descrizioni delle culture orientali, lasciavano intendere la ricchezza e il fascino delle tradizioni letterarie cinesi.

Con il passare dei secoli, l'introduzione della poesia cinese al pubblico italiano è stata ulteriormente spinta dagli sforzi di studiosi e traduttori pionieristici. Figure come Giuseppe Tucci e Fernanda Pivano si dedicarono a svelare la bellezza e la profondità dell'espressione poetica cinese. Le loro traduzioni, meticolose ed appassionate, portarono opere selezionate di poeti cinesi come Li Bai e Du Fu nella lingua italiana. Queste traduzioni non solo servirono come canali per trasmettere l'essenza lirica della poesia cinese, ma suscitarono anche curiosità e apprezzamento per l'eredità poetica di una terra lontana.

### B. Impatto sulla letteratura italiana e sulle percezioni culturali

L'assimilazione delle sensibilità poetiche cinesi nei circoli letterari italiani ha segnato un'epoca trasformativa nell'evoluzione della letteratura italiana. La ricchezza tematica, la profondità filosofica e le dimensioni estetiche uniche presenti nella poesia cinese hanno lasciato un'impronta indelebile su poeti e scrittori italiani. Questa influenza si è manifestata in modi sfaccettati, dalle esplorazioni tematiche che toccano la natura, la spiritualità e la condizione umana, alle innovazioni stilistiche che cercavano di infondere forme poetiche italiane con echi del lirismo orientale.

Inoltre, la ricezione della poesia cinese in Italia non si limitava esclusivamente ai circoli letterari. Ha catalizzato una più ampia rivalutazione delle percezioni culturali, promuovendo un'apprezzamento per le sottilie del pensiero orientale e dell'espressione artistica. Questo mescolarsi culturale ha stimolato dialoghi non solo all'interno dei circoli letterari, ma anche attraverso discipline interdisciplinari, plasmando significativamente le percezioni italiane dell'arte, della filosofia e dell'etica culturale cinese.

### C. Eredità e rilevanza contemporanea

L'eredità di questi incontri precoci e delle interazioni successive tra la poesia cinese e l'Italia risuona attraverso i tempi contemporanei. Le traduzioni, le analisi critiche e le discussioni accademiche continuano a contribuire a uno scambio interculturale dinamico. Favoriscono una comprensione più approfondita delle tradizioni letterarie cinesi e delle sensibilità poetiche italiane, facilitando un'esplorazione sfumata di temi universali che superano i confini culturali.

La persistente risonanza della poesia cinese nei paesaggi letterari italiani sottolinea il duraturo potere dell'espressione artistica nel superare confini temporali

e geografici. Questa panoramica storica serve come testimonianza del potenziale trasformativo intrinseco agli incontri interculturali, mostrando il duraturo lascito delle voci poetiche cinesi nel vivace mosaico della letteratura italiana.

### **III. Pratiche e Sfide della Traduzione**

La traduzione della poesia cinese in italiano costituisce un affascinante intreccio di destrezza linguistica, sensibilità culturale e raffinatezza poetica, racchiudendo l'arduo ma gratificante compito di trasporre l'anima di una tradizione poetica nella trama lirica di un'altra.

#### *A. Approcci e Metodologie Traduttive*

I traduttori di poesia cinese in italiano navigano in un labirinto di scelte, bilanciando la fedeltà al testo originale con le richieste creative della lingua di destinazione. Alcuni aderiscono meticolosamente agli elementi strutturali e semantici della lingua di origine, cercando una resa letterale che conservi le sfumature sintattiche e la precisione lessicale degli originali cinesi. Altri adottano un approccio più interpretativo, cercando di catturare la risonanza emotiva e l'essenza tematica della poesia, anche se ciò comporta deviazioni dalla rigorosa traduzione letterale.

Inoltre, l'impiego di dispositivi poetici e forme uniche della poesia cinese, come schemi tonali, allusioni classiche e cadenze ritmiche, costituisce una sfida creativa nel ricreare queste sfumature all'interno del quadro linguistico italiano. I traduttori spesso si confrontano con scelte riguardanti rime, metro e strutture poetiche che meglio riflettono il tono emotivo e la bellezza estetica dei versi cinesi originali nelle traduzioni in italiano.

#### *B. Sfide Culturali e Linguistiche*

La trasmutazione dei tesori poetici cinesi in italiano si confronta con una serie di ostacoli derivanti dalle dissimilarità linguistiche e dalle sottili differenze culturali. La natura tonale della lingua cinese, dove un cambiamento di tono altera il significato di una parola, costituisce una sfida formidabile quando si traspongono queste sfumature tonali nella struttura non tonale dell'italiano. Conservare la cadenza lirica e il flusso melodico della poesia cinese all'interno dei vincoli di un diverso sistema linguistico richiede ingegno e raffinatezza da parte dei traduttori.

La divergenza culturale complica ulteriormente il processo di traduzione. Trovare equivalenti italiani per riferimenti culturalmente radicati, allusioni classiche e fondamenti filosofici intrinseci alla poesia cinese spesso richiede spiegazioni intricate o approssimazioni creative. Il profondo simbolismo e l'immaginario implicito nelle poesie cinesi, carichi di connotazioni culturali, aggiungono livelli di complessità al compito della traduzione, esigendo un delicato equilibrio tra fedeltà alla fonte e leggibilità nella lingua di destinazione.

#### *C. Traduzioni Notevoli e Impatto*

Nonostante queste sfide, sono emerse traduzioni note come monumenti di dialogo letterario interculturale. Opere di Ezra Pound, Arthur Waley e altri traduttori luminari sono pietre miliari nell'introdurre la

poesia cinese ai lettori italiani. Le loro traduzioni, sebbene sottoposte a esame critico, hanno lasciato un'impronta indelebile, influenzando le pratiche successive di traduzione e plasmando le percezioni del patrimonio poetico cinese in Italia.

Queste traduzioni vanno oltre la semplice trasferibilità linguistica; fungono da canali per lo scambio culturale, arricchendo il panorama letterario italiano con la profonda saggezza, la risonanza emotiva e il fascino estetico delle espressioni poetiche cinesi. Il loro impatto si estende al di là del campo della letteratura, promuovendo una comprensione più approfondita e un'apprezzamento della complessa trama dei legati culturali e filosofici cinesi all'interno del pubblico italiano.

### **IV. Ricezione e Comunicazione della Poesia Cinese in Italia**

La ricezione della poesia cinese all'interno delle cerchie letterarie italiane si svela come un intreccio multifacetico di apprezzamento culturale, dibattito accademico e coinvolgimento creativo, che chiarisce l'evoluzione dei dialoghi letterari interculturali.

#### *A. Circoli e Comunità Letterarie*

L'assimilazione della poesia cinese all'interno dei circoli letterari italiani ha generato vivaci dialoghi e discussioni, coltivando un profondo apprezzamento delle dimensioni estetiche e filosofiche di questa distante tradizione poetica. Salotti letterari, simposi accademici ed eventi culturali hanno funto da crogioli per confrontarsi con le forme poetiche cinesi, favorire una comprensione più profonda della loro ricchezza tematica e delle sottigliezze espressive tra poeti, studiosi ed entusiasti italiani.

Inoltre, l'influenza delle sensibilità poetiche cinesi si riflette nelle opere dei poeti italiani che traggono ispirazione dai motivi tematici, dall'immaginario e dalle cadenze liriche presenti nella poesia cinese classica e contemporanea. Questa convergenza di tradizioni poetiche ha contribuito ad arricchire e diversificare le espressioni letterarie italiane, manifestandosi in una fusione eclettica di Est e Ovest nella trama della poesia italiana.

#### *B. Contesti Educativi e Coinvolgimento Accademico*

L'inclusione della poesia cinese nei programmi educativi italiani rappresenta un impegno concertato per coltivare la cultura e promuovere la comprensione interculturale tra gli studenti. Le istituzioni accademiche offrono corsi, seminari e laboratori che approfondiscono le sfumature delle forme poetiche cinesi, consentendo agli studenti di immergersi nelle profondità linguistiche, culturali e filosofiche insite in questi versi. Iniziative educative come queste fungono da canali per coltivare un'apprezzamento più profondo e un coinvolgimento accademico nel patrimonio poetico cinese, superando le barriere linguistiche per illuminare esperienze umane condivise.

Impegni accademici dedicati all'analisi critica e agli studi comparativi della poesia cinese in Italia contribuiscono a una comprensione sfumata della ricezione e dell'interpretazione di queste forme poetiche. Attraverso esami meticolosi delle traduzioni, esplorazioni tematiche e analisi interculturali, gli studiosi svelano i

fili intricati che legano i legati poetici cinesi con il panorama in evoluzione delle tradizioni letterarie italiane.

#### *C. Media ed Eventi Culturali*

La comunicazione della poesia cinese in Italia si estende oltre i confini accademici, permeando eventi culturali, forum pubblici e piattaforme mediatiche. Scambi culturali, letture poetiche e collaborazioni artistiche fungono da canali per diffondere le voci poetiche cinesi a un pubblico più ampio, promuovendo un'apprezzamento per la bellezza lirica e la profondità culturale racchiuse in questi versi.

Piattaforme mediatiche, riviste letterarie e spazi digitali amplificano la risonanza della poesia cinese, offrendo uno spazio per il dialogo, la riflessione e il coinvolgimento creativo. Attraverso pubblicazioni digitali, forum online e social media, il pubblico italiano incontra diverse sfaccettature delle espressioni poetiche cinesi, creando connessioni e promuovendo uno scambio interculturale di sensibilità letterarie.

### **V. Studi di caso e Analisi comparativa**

L'esame di specifici studi di caso e analisi comparative delle traduzioni di poesia cinese in italiano offre un'esplorazione sfumata delle complessità intrinseche alla traduzione interculturale e svela diverse interpretazioni dell'espressione poetica.

#### *A. Opere poetiche selezionate*

Approfondire specifici componenti cinesi e le loro molteplici traduzioni in italiano consente un'analisi dettagliata delle varie interpretazioni e degli approcci traduttivi adottati da diversi studiosi e poeti. Si possono considerare opere di rinomati poeti cinesi classici come il 'Pensiero tranquillo di una notte' di Li Bai o 'Alba di primavera' di Du Fu, così come voci contemporanee come 'Al confine' di Bei Dao o 'Attraversando metà della Cina per dormire con te' di Yu Xiuhua.

Concentrarsi su questi componenti permette agli studiosi di dissezionare le complessità semantiche, le variazioni stilistiche e le risonanze culturali racchiusi in ciascuna traduzione italiana. Esaminare come l'essenza dell'immaginario poetico cinese, dei temi e delle emozioni sia stata trasposta nella lingua italiana fornisce preziose intuizioni sulle sfide e sulle scelte creative dei traduttori.

Ad esempio, il famoso componimento 'Pensiero tranquillo di una notte' di Li Bai, con la sua evocativa immagine della luna e della nostalgia, è stato tradotto in italiano da vari studiosi. Un'analisi comparativa di queste interpretazioni svela approcci divergenti - alcuni puntando sulla precisione letterale mentre altri privilegiano catturare l'essenza emotiva e il ritmo dell'originale.

#### *B. Confronto con altre traduzioni*

Effettuare analisi comparative tra le traduzioni in italiano di poesia cinese e le versioni in altre lingue come l'inglese, il francese o il tedesco rivela l'influenza dei contesti linguistici e culturali sulle scelte traduttive. Comparare come diverse lingue catturano le sfumature della poesia cinese mette in luce la complessità nel trasmettere dimensioni culturali ed estetiche in paesaggi linguistici diversi.

Ad esempio, il celebre componimento 'Alba di primavera' di Du Fu, che esprime speranza in mezzo

all'avversità, è stato tradotto in molte lingue. Confrontare le traduzioni in italiano con quelle in inglese o francese mostra come ogni lingua affronti la sfida di preservare la profondità emotiva e la risonanza filosofica presenti nel testo cinese originale.

Inoltre, analisi comparative tra le traduzioni in italiano e quelle in lingue più vicine alla struttura linguistica cinese, come giapponese o coreano, offrono intuizioni intriganti su come lingue con caratteristiche sintattiche e tonali simili affrontino le sfumature delle forme poetiche cinesi.

#### *C. Intuizioni e Implicazioni*

Gli studi di caso e le analisi comparative nel campo delle traduzioni di poesia cinese in Italia svelano l'interplay intricato tra lingue, culture e sensibilità poetiche. Fanno luce sulla natura soggettiva della traduzione, sottolineando la diversità di approcci utilizzati per trasmettere l'essenza del patrimonio poetico cinese ai lettori italiani.

Inoltre, queste analisi offrono riflessioni critiche sulle sfide e sulle possibilità intrinseche alla trasmissione letteraria interculturale. Sottolineano l'importanza delle scelte traduttive nel plasmare la ricezione, l'interpretazione e la diffusione delle eredità poetiche cinesi all'interno dei circoli letterari italiani, evidenziando la natura dinamica dell'interpretazione artistica al di là dei confini.

### **VI. Impatto e Prospettive future**

#### *A. Scambio culturale e arricchimento*

Il profondo impatto della poesia cinese sull'Italia va ben oltre il campo della letteratura, agendo come catalizzatore per uno scambio culturale dinamico che arricchisce le sensibilità artistiche e favorisce la comprensione reciproca. L'assimilazione delle tradizioni poetiche cinesi nel tessuto della letteratura italiana ha facilitato un dialogo che supera i confini geografici, favorisce un'apprezzamento più profondo delle complessità e della bellezza del patrimonio culturale cinese tra il pubblico italiano.

Questo scambio culturale non è unidirezionale; rappresenta un coinvolgimento reciproco. L'integrazione delle forme poetiche cinesi nei paesaggi letterari italiani ha influenzato e ampliato la tavolozza artistica di entrambe le culture. Questa convergenza di sensibilità artistiche ha generato una fusione eclettica di espressioni artistiche orientali e occidentali, contribuendo alla diversificazione e all'arricchimento delle tradizioni letterarie cinesi e italiane.

#### *B. Prospettive per ulteriori esplorazioni*

La traiettoria della poesia cinese in Italia offre promettenti prospettive per esplorazioni e coinvolgimenti più approfonditi. Gli sforzi accademici in corso dedicati alla traduzione, all'analisi critica e agli studi comparativi della poesia cinese in Italia offrono opportunità per una comprensione più profonda e un'apprezzamento delle trasmissioni letterarie interculturali.

L'inclusione delle forme poetiche cinesi negli studi interdisciplinari, che spaziano dalla letteratura comparata agli studi culturali, all'analisi linguistica e persino alle discipline delle scienze umane digitali, offre opportunità per dialoghi interdisciplinari che su-

perano i confini disciplinari convenzionali. Tali approcci interdisciplinari facilitano un'esplorazione completa delle dimensioni multifaccettate delle espressioni poetiche cinesi nel contesto più ampio dei paesaggi culturali e letterari italiani.

Inoltre, sfruttare piattaforme digitali, iniziative multimediali e forum interattivi può migliorare l'accessibilità e il coinvolgimento con la poesia cinese tra pubblici diversi in Italia. Pubblicazioni digitali, podcast, workshop online e mostre virtuali offrono strade per diffondere le voci poetiche cinesi a un pubblico più ampio, promuovendo un'esplorazione più inclusiva e partecipativa dello scambio culturale.

### *C. Favorire dialoghi letterari globali*

La traiettoria futura della poesia cinese in Italia significa il suo ruolo cruciale nel favorire dialoghi letterari globali. Mentre l'interconnessione e lo scambio culturale continuano a evolversi in un mondo sempre più globalizzato, la risonanza della poesia cinese nei circoli letterari italiani rappresenta un microcosmo degli incontri interculturali più ampi che plasmano il panorama letterario globale.

Nurturing connessioni più profonde e un'apprezzamento reciproco tra le tradizioni letterarie cinesi e italiane, la direzione futura della poesia cinese in Italia supera i confini nazionali. Ciò favorisce la formazione di una ricca tapestry di dialoghi letterari globali, contribuendo alla coltivazione di legami duraturi e promuovendo una comprensione condivisa di diversi patrimoni culturali. In ultima analisi, sottolinea l'universalità delle esperienze umane al di là dei confini linguistici e geografici.

## VII. Conclusione

Il viaggio della poesia cinese in Italia rappresenta una testimonianza del potere duraturo dello scambio letterario interculturale. Non ha semplicemente superato confini linguistici e geografici, ma ha tessuto una ricca tapestry di interazione culturale, favorendo una comprensione e un'apprezzamento più profondi tra due tradizioni letterarie distinte ma interconnesse.

L'assimilazione delle sensibilità poetiche cinesi nel tessuto della letteratura italiana ha portato a una vivace cross-pollinazione di espressioni artistiche. Questa convergenza di est e ovest nel campo della poesia ha arricchito sia i paesaggi letterari cinesi che italiani, contribuendo a un mosaico di voci e prospettive diverse.

Attraverso meticolosi sforzi di traduzione, esplorazioni accademiche e coinvolgimenti creativi, la poesia cinese non solo ha trovato un posto nei circoli

letterari italiani, ma ha anche catalizzato dialoghi interdisciplinari più ampi. Il suo impatto va oltre la semplice trasmissione linguistica, favorendo un'apprezzamento più profondo delle sfumature del patrimonio culturale, delle sensibilità artistiche e delle esperienze umane condivise.

Mentre l'Italia continua ad abbracciare il lascito poetico della Cina, la futura traiettoria della poesia cinese in Italia offre immense promesse. Gli sforzi accademici, le iniziative digitali e le collaborazioni interdisciplinari presentano opportunità per un'esplorazione più approfondita, una maggiore accessibilità e un coinvolgimento inclusivo con le espressioni poetiche cinesi tra pubblici diversi.

Inoltre, la risonanza della poesia cinese nei paesaggi letterari italiani rappresenta un microcosmo dei più ampi dialoghi letterari globali che plasmano il mondo interconnesso. Esempio del potenziale trasformativo dell'arte nel favorire la comprensione reciproca, nel superare le barriere culturali e nel promuovere un'apprezzamento condiviso di diversi patrimoni culturali.

In sostanza, il viaggio della poesia cinese in Italia serve come un toccante promemoria del linguaggio universale dell'arte e della sua capacità di forgiare legami duraturi, favorire il rispetto reciproco e ispirare profonde connessioni interculturali. Mentre la poesia cinese continua a risuonare nei circoli letterari italiani, illumina il cammino verso una comunità globale più interconnessa e culturalmente arricchita..

## Riferimento

1. Zhaopeng, W. A. N. G. (2007). Evolution of Ci Poetry of the dynasties of Tang and Song in the perspective of dissociation and integration of Shi and Ci. *Frontiers of Literary Studies in China*, 1(3), 449-475.
2. Lippiello, T. (2009). Il confucianesimo. Il mulino.
3. Lippiello, T. (2003). Confucio, Dialoghi, testo a fronte.
4. Lippiello, T. (2006). La morte ideale nella Cina antica: ancestralità, pratiche di sepoltura e... la metamorfosi della cicala. In *Morte e trasformazione dei corpi. Interventi di tanatometamorfosi* (pp. 45-60). Bruno Mondadori Editore.
5. Vivan, I. (2018). on Poetry and Landscape, and the Landscape of Poetry, in *Contemporary Italy. Wenxin Duihua 文心對話: A Dialogue on The Literary Mind/The Core of Writing*, 55.

# ECONOMIC SCIENCES

## ROLE OF STATE FISCAL (BUDGET-TAX) POLICY IN INCREASE OF POPULATION EMPLOYMENT

**Asatullaev Khurshid Sunatullaevich**

*Head of the Department of "Economics"  
of the Tashkent Financial Institute, Ph.D., professor*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573787](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573787)

### **Abstract**

The main goal of the state is to achieve economic development by ensuring the well-being of the population. However, this cannot be achieved by itself, for this it is necessary to develop a reasonable economic policy by the state. The research of the priorities of the state fiscal (budget-tax) policy in achieving the economic growth of the society and ensuring the employment of the population is one of the urgent topics. The state fiscal (budget-tax) policy is aimed at increasing economic activity and eliminating problems in the economy through the rational use of state financial resources. Its main goal is to curb economic cycle fluctuations and inflation aimed at ensuring sustainable economic growth and achieving a high level of employment. The article provides scientific and practical analysis and conclusions aimed at ensuring employment of the population through the rational use of the economic levers of the state fiscal (budget-tax) policy.

**Keywords:** State fiscal (budget-tax) policy, employment, finance, state budget, state budget expenditures, state budget revenues, budget deficit, economic cycle, taxes, tax benefits.

### **Introduction**

International Labor Organization experts recognize that the situation in the world, climate change, shortage of natural resources, and conflicts between countries may lead to a slowdown in global economic growth in 2023, and the population will be forced to accept working conditions that do not guarantee the minimum wage and social protection. The current situation, according to a new report by the experts of the International Labor Organization, will further increase the inequality that has already increased due to the pandemic [11]. Also, the International Labor Organization's report titled "World Employment and Social Protection Outlook: Trends to 2023" predicts that the global employment growth rate this year will be 1.0 percent. The number of unemployed worldwide is expected to reach 208 million in 2023 and the global unemployment rate will increase to 5.8 percent. The expectation of such a negative trend is directly related to the reduction of labor supply in high-income developed countries [12].

It is known that due to the pandemic, the cessation of economic activity, the closure of many workplaces and the worsening of the living conditions of the population, the return of most labor migrants to our country will lead to an increase in the number of unemployed. The lack of employment of the population, in turn, led to an increase in the level of unemployment and a decrease in the income of the population. Therefore, the state is conducting a consistent economic policy aimed at creating new jobs by encouraging active entrepreneurship, improving the investment climate and business environment. This includes the PF-27 of the President of the Republic of Uzbekistan dated February 28, 2023 On the state program for the implementation of the development strategy of New Uzbekistan for the years 2022-2026 in the "year of human attention and quality education" adopted in the Republic of Uzbeki-

stan. PQ-214 of the President of the Republic of Uzbekistan dated April 21, 2022, "On additional measures to ensure employment of the population based on the development of the economy" decision, No. 450 decision of the Cabinet of Ministers dated August 16, 2022, "On approval of the model concept for further increasing the efficiency of the assistants of district (city) mayors on the issues of developing entrepreneurship in the neighborhood, ensuring population employment, and reducing poverty", No. 450 decision of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan dated September 5, 2023 "On additional measures to support certain socially needy categories of the population and assist their employment", PF-61 dated April 26, 2023 of the President of the Republic of Uzbekistan "On additional measures to support the employment of young people and provide them with permanent employment".

Also, in the republic, funds are provided from the state budget for the implementation of annually approved programs for ensuring the employment of the population, employment in vacant and quota jobs, and various tax benefits for the business sector that contributes to the employment of the population operating in the regions. However, there is still a high level of tension in the labor market in the regions, there are problems in establishing permanent jobs, ensuring employment of young people, women, members of low-income families, especially in rural areas, as well as in regulating the processes of external labor migration. This certainly shows the need to improve the mechanism of ensuring employment of the population, which is one of the economic policies of the state, the state fiscal policy, which is one of the factors of increasing economic activity. Also, rational distribution of state budget expenses and organization of economic activity that leads to activity in accordance with the level of development of the tax rates of the territories and thus ensuring the employment of the population is of great urgent importance.

### **Material and method.**

It is known that the aspects of the state's fiscal (budget-tax) policy aimed at ensuring the employment and well-being of the population have been widely researched in the conditions of catastrophic risks and conflict situations that are still occurring in the world. It is known that in the history of economics, theoretical ideas aimed at providing employment of the population through the state treasury and taxes were formed by most representatives of the economic school. However, as an alternative to the classical economic school, the English economist J.M. Keynes in his world-famous work "The General Theory of Employment, Interest and Money" argued that the modern market economy is not capable of sustainable economic development, and to ensure sustainable economic growth and full employment of the population, the economy indicates that regulation by the state is necessary. One of the instruments of government regulation is fiscal policy, which affects the economy by changing government revenues and expenditures.[3]. It also shows two important problems of the market economy, namely, the inequitable distribution of income and the inability to provide full employment. Society does not stop developing, the economy moves to a new level of growth, but problems related to the labor market do not lose their relevance. Therefore, one of the important priorities of the state policy in the field of employment is to expand the demand for labor force, support employment, and support the effective use of labor resources in accordance with the requirements of the labor market.[9].

Harvard School of Economics representative P. Samuelson interprets fiscal policy as follows: Fiscal policy should help the economy smooth out cyclical fluctuations in the process of government taxation and government spending and achieve high employment free from excessive inflation and deflation. Also, the goal of fiscal policy, which depends on government spending and taxes, is to ensure high employment in the economy and a price process independent of inflation, in harmony with monetary policy.[7].

Theoretical views on the content of fiscal policy are supported by T.A. Agapov, S.F. Seregins from CIS economists. They understand that fiscal and monetary policies are government measures aimed at ensuring full employment, achieving balance of payments equilibrium, and ensuring economic growth in non-inflationary gross domestic product by changing public budget expenditures and taxes.[5].

Ensuring the employment of the population has always been one of the urgent issues. Especially in the context of the global pandemic, it has once again shown that the issue of employment is one of the global problems and requires more scientific research in this regard.

According to A.Olmasov and A.Vahobov, one of local economists, "Employment is the employment of people who have the ability to work and are eager to work, and engage in useful work"[8]. A.G. Gryaznov calls employment a set of economic relations related to employment and participation in economic activities. According to him, employment describes the economically active population concerned with the production

of material factors. In employment, the main productive and consuming forces of the society are manifested. Because the relationship to the objective conditions of production in it serves as a means of obtaining funds for the living of workers, which are considered to be the conditions of reproduction of the total population [1].

In addition to the results of these studies, scientifically based proposals, practical recommendations and conclusions, it is worth saying that the issue of the role and influence of the state fiscal policy in ensuring the employment of the population is considered, as well as determining its priorities.

### **Results**

Active employment policies in most developed countries based on socially oriented market economies are aimed at achieving full, effective and freely chosen employment. Also, in the employment policy, the state's economic development should serve to achieve employment and other economic and social goals. In order to achieve this, it is necessary to take into account the interests of the state and take into account the national characteristics of the country based on real practice. Such actions should be carried out in coordination with the state, employers and recruits. The main task of the state is to regulate and control the mutual relations of partners in the labor market.

The state implements the following goals in ensuring full, effective and free employment of the population:

- develops tax, investment and financial and credit measures aimed at increasing the activity of labor resources, ensuring temporary and independent employment, coordinating labor activities and taking other measures, developing a system of job preservation and rational deployment of production forces;

- legal regulation of the legal rights and interests of citizens in the field of employment under the state guarantee and further improvement of employment legislation;

- social support for citizens recognized as unemployed.

In the employment policy, it is intended to provide employment to the part of the population that is able to work and wants to work, thereby creating an opportunity to provide them economically. In order to achieve these goals, the state tries to increase employment by creating new jobs in the country, using existing jobs effectively. Businesses that create new jobs are given tax breaks or subsidies. Also, by creating a new workplace, equipping it with modern technologies, it encourages achieving an increase in labor productivity and, accordingly, income. Depending on the severity of the employment problem, priority is given to one or another way of solving it. Priority is given to small business and private entrepreneurship, service industries, farmers and farms in creating new jobs in the employment policy of Uzbekistan.

Taxes, which are considered as components of the state fiscal policy in the economy, perform the following important tasks:

- financing of state expenses (fiscal function);

- distribution and redistribution of national income;
- alleviating social tension (social function);
- regulation of the economy (regulation function);
- stimulate economic activity.

According to the objective of the fiscal policy, stimulating its spontaneous growthlimiting, stabilization and economic activity policies are separated. Fiscal policy based on the goals of economic growth will increase the level of employment and thus the real volume of GDP is focused on growth. Stimulus fiscal policy in this levers of dincrease in household expenses and tax rate is the decrease of State budget stability. Financial policy aimed at ensuring the decision about budget deficit during a recession or depression, it is necessary to focus on the goals of elimination.

The state's policy of limiting economic activity is sharply different from the potential level of real GNP – aimed at reducing the price, which at the same time, inflation and development during periods of economic growth and recession is focused on avoiding crisis processes in Rish.

Fiscal policy aimed at ensuring macroeconomic balance by regulating the cyclical development of the economy is carried out with the help of a number of financial instruments and economic levers. All these financial tools and levers together constitute the financial mechanism of regulation.

State fiscal policy, the tax system organized in the national economy. It is necessary to respond and effectively regulate internal relations in the economy. Fiscal policy of the state in the republic maintaine the balance of the state budget at all scales[6].

As can be seen from the data of Figure 1, if we analyze the trend of changes in government expenditures and revenues in 2000-2022, the changes in state budget expenditures and revenues had a tendency to change in proportion to the growth rate of real GDP. In 2000, state budget revenues were 28.5 percent of GDP, and by 2022, they have decreased to 22.7 percent. In the same way, the state budget expenditure was 29.6 percent of GDP in 2000, and in 2022, this indicator decreased to 26.6 percent. If we analyze the growth rate of real GDP in our country, the lowest trend in 2000-2022 was observed in 2000 and 2020.

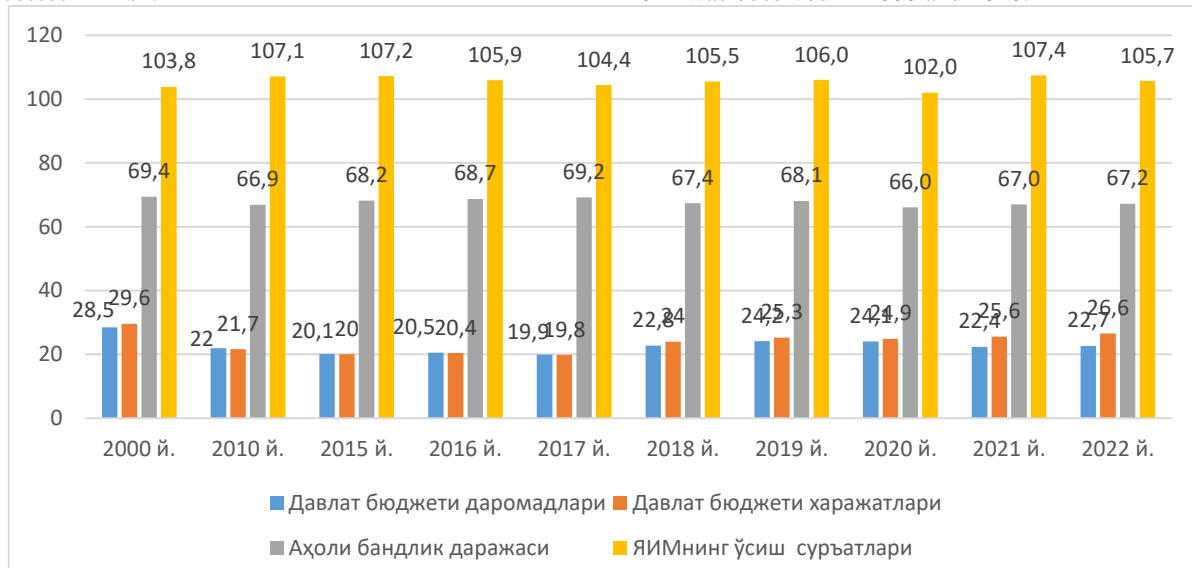


Figure 1. The impact of public fiscal policy on economic growth and employment[4]

In 2020, this indicator is guaranteed to grow by 1.6 percent despite the economic pandemic. The highest real GDP growth rates were observed in 2010, 2015 and 2016, when the growth rate averaged 8.0 percent. Correspondingly, state budget revenues and state budget

expenditures were about 21.0 percent of GDP. Analysis of the impact of changes in state budget expenditures and revenues on population employment is more clearly seen in Figure 2.



Figure 2. Impact of state budget expenditures and revenues on employment[14]

It should be noted that in 2000-2022, state budget expenditures and revenues and the impact on population employment have changed proportionally. The period with the highest weight of state budget revenues and expenses was observed in 2000, ie 28.5; It was 29.6 percent and, accordingly, the employment rate of the population reached 69.4 percent. Interestingly, such a high level of employment was also observed in 2015-2017. The lowest level of population employment was observed in 2020. Of course, this is directly related to the pandemic, but it decreased by 2.1% compared to 2019. If we take the weight of the employment level of the population in comparison with the indicator in 2019, it did not reach the level of this indicator in 2021-2022.

It should be noted that implementation of an effective state fiscal (budget-tax) policy in the Republic of

Uzbekistan for further strengthening the national economy and solving the emerging economic problems is one of today's requirements, once again confirmed by real practical life itself. As you know, in the world economy global economic growth is forecast to slow to 1.7 percent in 2023, one of the slowest in 30 years, trailing only the global recession of 2009 and 2020. This decline is due in part to the tightening of monetary policy to combat high inflation, which could cause negative shocks such as higher inflation, exchange rate tightening or financial turmoil to derail the global economy. Urgent action will be needed to reduce the risk of such a global crisis and debt crisis. In addition, governments should ensure that support is provided to the vulnerable, that inflation expectations remain stable and that financial systems remain stable.[2].

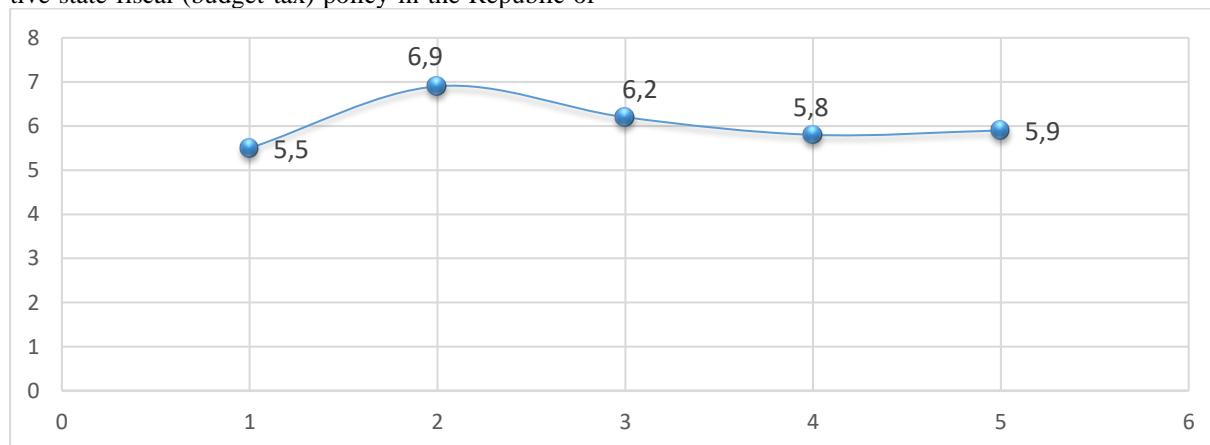


Figure 3. Global unemployment rate trend[13]

The reasons for the deterioration of the situation in the world labor market in this way are as follows:

- conflicts between states, increasing geopolitical tension;
- the unevenness of the recent economic recovery from the pandemic;
- continuing global supply problems.

It is worth noting that the combination of the above-mentioned factors created conditions for stagflation, that is, an increase in the rate of inflation and a slowdown in the economy at the same time. Such a situation is observed for the first time since 1970.

Richard Samens, director of the International Labor Organization's research activities department, noted that "slowing global employment growth means that we will not have to wait until 2025 to recover what

was lost during the Covid-19 pandemic." Also, in his opinion, the slowdown in productivity growth, which in his opinion is interdependent on solvency, environmental sustainability and population well-being, and which has been important in solving past crises, is of great concern[10].

### **Conclusions and suggestions**

In our opinion, the state fiscal policy in the field of creating new jobs in our country should be improved on the basis of concrete methods, like foreign countries, to reduce unemployment and increase the employment of the population with socially necessary work. For this, we think that it is necessary to take into account the following measures: stimulation of investments made by the state in the economy, which is the main condition for creating new jobs;

Based on the above, it is necessary to improve the state fiscal policy to ensure the employment of the population in our country. It is appropriate to take into account the following:

1. In order to increase the employment of the population, first of all, it is necessary to effectively direct the state budget funds based on the level of unemployment in the regions and strictly control its implementation in practice.

2. It is necessary to reduce the level of the existing hidden economy in the republic and to fight against it, not by various bureaucratic means, but by using tax incentives according to the development potential of the regions.

3. It is necessary to use the practical experience of developed countries in applying tax incentives to large and small business entities that have created new jobs in the regions.

4. To create conditions on the basis of encouraging investment activity in small business and family entrepreneurship, to activate the job search of persons who have lost their jobs due to structural changes or are at risk of losing their jobs, providing them with vocational training, retraining and information-consulting services.

### **References**

1. Andrey K. P. et al. Historical transformation of the world system of international economic relations //VOPROSY ISTORII. – 2022. – T. 7. – №. 2. – C. 199-207.
2. Astanakulov O. et al. The Interplay of Job Satisfaction, Work-Life Balance, and Mental Health in the

Era of Social Media //International Journal of Management Science and Business Administration. – 2023. – T. 9. – №. 6. – C. 13-18.

3. Astanakulov O. T. et al. National projects and government programmes: functional algorithm for evaluating and modelling using the Data Science methodology //Економічний часопис-XXI. – 2020. – Т. 183. – №. 5-6. – С. 51-59.

4. Astanakulov O. T. et al. Providing Innovative Processes in the Economic Development of the Russian Regions //Space and Culture, India. – 2019. – Т. 7. – №. 2. – С. 125-142..

5. Astanakulov O. T. et al. Real options as a financial instrument to evaluate a project with a high degree of uncertainty: the specifics of application //Економічний часопис-XXI. – 2019. – Т. 179. – №. 9-10. – С. 105-114.

6. Mirziyoev Sh.M. Action strategy on five priority areas of development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021. [www.lex.uz](http://www.lex.uz)

7. Pyankova S. G. et al. Industry 4.0.: advanced approach //International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019). – Atlantis Press, 2019. – С. 113-116.

8. Астанакулов О. Т., Шеина Е. Г. Формирование методического инструментария анализа и оценки эффективности инвестиционных проектов //Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2020. – Т. 16. – №. 10. – С. 1900-1920.

9. Закирова Э. Р., Шеина Е. Г., Астанакулов О. Т. Методические подходы к оценке эффективности управления инвестиционными и финансовыми рисками субъектов хозяйствования //Финансы и управление. – 2019. – №. 2. – С. 27-36.

10. <https://neg.by/novosti/otkrytj/mot-o-situatsii-na-globalnom-rynke-truda-v-2023-godu/> MOT situation in the global market in 2023.

11. <https://news.un.org/ru/story/2023/01/1436632> MOT – o perspektivax na 2023 god: lyudyam pridetsya soglashatsya na khudshie usloviya truda

12. [https://www.ilo.org/moscow/news/WCMS\\_865541/lang--ru/index.htm](https://www.ilo.org/moscow/news/WCMS_865541/lang--ru/index.htm). Ekonomichesky spad mojet vynudit rabotnikov soglashatsya na menee kachestvennye rabochie mesta.

13. [https://www.inform.kz/ru/bezrabotnyh-v-mire-stanet-bol-she-na-3-mln-chelovek-v-2023-godu-mot\\_a4031860/](https://www.inform.kz/ru/bezrabotnyh-v-mire-stanet-bol-she-na-3-mln-chelovek-v-2023-godu-mot_a4031860/) More than 3 million people will be unemployed in 2023 - MOT.

14. Information from the State Statistics Agency of the Republic of Uzbekistan.

---

## WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SERVICES BY ASSESSING RISKS IN THE BANKING SECTOR IN THE PROCESS OF ECONOMIC TRANSFORMATION

**Khasanova Khamida Khaidaralievna**

*Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmi, researcher of the department of economics in the field of information and communication technologies*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573802](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573802)

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСЛУГ ПУТЕМ ОЦЕНКИ РИСКОВ В БАНКОВСКОМ СЕКТОРЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

**Хасанова Хамида Хайдаралиевна**

*Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми, независимый соискатель кафедры*

*Экономики в сфере информационных и коммуникационных технологий*

#### **Abstract**

This research work explores ways to improve the efficiency of services in the banking sector by assessing risks in the process of economic transformation. The banking sector is a key element of the economy and its efficiency plays an important role in ensuring the stability and growth of the economic system. However, in the context of economic transformation associated with changes in the political, social and economic environment, banks face new risks that can significantly affect their effectiveness. The results of the work may be useful for banking institutions, regulators and other stakeholders who seek to improve the efficiency of services in the banking sector in the context of economic transformation.

#### **Аннотация**

Данная работа исследует пути повышения эффективности услуг в банковском секторе путем оценки рисков в процессе экономической трансформации. Банковский сектор является ключевым элементом экономики, и его эффективность играет важную роль в обеспечении стабильности и роста экономической системы. Однако в условиях экономической трансформации, связанной с изменениями в политической, социальной и экономической среде, банки сталкиваются с новыми рисками, которые могут существенно влиять на их эффективность. Результаты работы могут быть полезны для банковских учреждений, регуляторных органов и других заинтересованных сторон, которые стремятся повысить эффективность услуг в банковском секторе в условиях экономической трансформации.

**Keywords:** transformation, risk assessment, service efficiency, bank, efficiency.

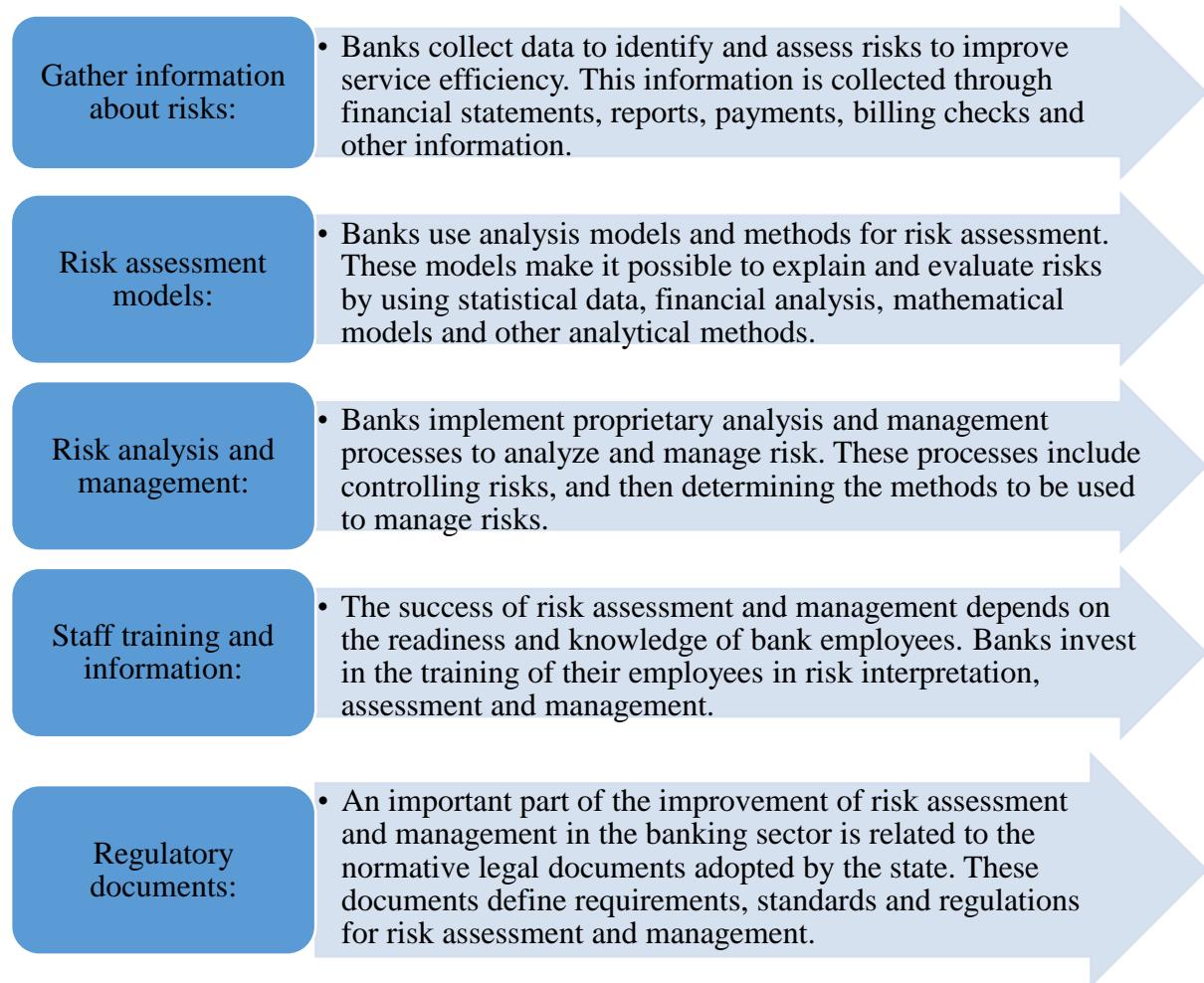
**Ключевые слова:** трансформация, оценка рисков, эффективность услуг, банк, эффективность.

#### **Introduction.**

Uzbekistan has begun implementing much-needed reforms in the banking sector. In order to prevent financial problems, financial liberalization should be carried out along with the strengthening of institutions, and for

this purpose, the Central Bank of the Republic of Uzbekistan is improving the system of regulation and control of banking activities.

Ways to improve the efficiency of services through risk assessment in the banking sector in the process of economic transformation are as follows:



*Figure 1. Ways to improve the efficiency of services through risk assessment in the banking sector in the process of economic transformation<sup>1</sup>*

Based on international experience, along with the reforms implemented by the government in the banking sector, it is important to consistently reform state enterprises and the business environment, and to strengthen competition. These ways help banks to improve their effectiveness in explaining, assessing and managing risks. Their implementation allows to improve the used

methods of risk detection, assessment and management of banks.

At the same time, without destabilizing credit booms, the most urgent reforms that will help ensure the banking system with the credit necessary for a successful transition to a market economy include the following key areas (table#1).

<sup>1</sup> Prepared by the author.

**Key directions of banks for a successful transition to a market economy<sup>2</sup>**

State bank management and lending based on state policy.	State-owned banks (at least those at the top of the privatization list) should be freed from political interference in their lending, preferably by presidential decree. All other official and "hidden" directed lending must be correctly recorded in the "directed loan portfolio" and reflected in the financial statements of the State Bank of Russia, so that the supervisory body (Central Bank of the Republic of Uzbekistan), the owner (Ministry of Finance), investors and the public can monitor the dynamics of its volume and quality. It is necessary for the Ministry of Finance to clearly define the objectives of the development of state-owned banks, to provide "state services" to state banks and to establish mechanisms to ensure transparency and accountability of fiscal expenditures related to them.
Credit risk reporting, management and control.	The Central Bank of the Republic of Uzbekistan should improve control over credit quality by conducting thematic analyzes related to credit quality (for example, how banks assess the solvency of borrowers). Over time, the CBR should strengthen its ability to conduct targeted horizontal credit quality checks and a broader review of banks' asset quality. This initial review and gradual capacity building is necessary to better understand the size and dynamics of NPLs and their impact on bank capital buffers. It is necessary for the Central Bank of the Republic of Uzbekistan to improve the methodology for classifying problem loans (or more broadly, assets), including the predictive approach and ensuring its application by banks. Also, the registry should strengthen control over the quality of credit reporting and the exchange of credit information. The Central Bank of the Republic of Uzbekistan should put pressure on all banks to improve the corporate governance system, internal control, risk management, and standards for assessing borrowers' solvency. The banking market should further strengthen the system of monitoring, control, exit and crisis preparedness.
Mobilization of deposits.	Banks of Uzbekistan have not succeeded in attracting deposits due to the historical distrust of the population in their services. At the same time, the banking system has access to state credit lines (especially the State Bank) and has recently managed to attract external debt funds in national currency. It follows that the incentive to attract internal contributions is weak. In the medium and long term, Uzbekistan will have to rely more on additional funds from foreign funds for its development. However, attracting domestic deposits can contribute to the stability of banks' funding structure and help households and businesses build financial wealth and hedge risk. In turn, more resilient households and businesses reduce credit risk for banks.
Product development.	There are a number of products that the market could develop in the short term with government support to help strengthen the sustainability of credit intermediation. For example, in order to reduce the risks of credit concentration and help the Central Bank of the Republic of Uzbekistan to introduce stricter standards, it is possible to improve the credit syndication system, including with the participation of foreign banks. Despite the fact that banks have recently been able to attract foreign financing in soums, financing in foreign currency will continue. The development of the hedging market (over the counter or through the stock exchange) helps to reduce the currency risk of banks and borrowers. In addition, agriculture is an integral part of the economy of Uzbekistan, which can be competitive in the long term. To remain competitive, agricultural finance products supported by government policies, such as seasonally adjusted finance and disaster insurance, are required to address climate risk and reduce credit risk in agricultural finance, where the market can develop. The banking system should continue to promote rapid digital payment systems and solutions to facilitate e-business as well as broader digitization and market integration.

Banks may face a multifaceted challenge thanks to six key trends: to be more effective in identifying and mitigating risks, to be more efficient and faster in supporting business and meeting customer needs, and to support decision-making across the organization - better adaptation and better preparation for support. to meet regulatory requirements.

We believe our recommended vision for the risk function in 2025 will address these issues, but this fu-

ture risk function will be significantly different from today's in many areas. In 2025, risk functions in banks have the potential to be the primary architects of seamless, unbiased risk decisions and monitoring across the organization. They can deliver superior value by reducing risk and operational costs, contributing to a more intuitive customer experience, and helping the bank manage compliance. This view includes a risk function that controls the following actions:

<sup>2</sup> Prepared by the author during the course of research.

Model, simplify, standardize, and automate regulatory processes to minimize manual intervention, deliver superior customer experiences, take advantage of big data, and reverse decisions. This is expected to significantly reduce non-financial risk and reduce operational costs of the risk function.

Closer collaboration with the business – for example, reimagined customer journeys or joint operational risk reduction – and with other functions, for example with strategic planners on balance sheet optimization. It helps the bank to respond to new regulations, develop an attractive customer experience, make bad decisions, solve emerging types of risks and reduce costs.

To be a strong advocate of corporate values and principles through a stronger risk culture that is defined, communicated and reinforced across the Bank. On-site risk identification, assessment and mitigation is part of the daily work of all employees throughout the organization. Various initiatives help establish the mindsets and behaviors that make up this risk culture.

Build and manage new models and datasets, develop and hire people with diverse skills who can collaborate with business and other functions.

The risk function is likely to be stronger in all areas of the organization. To make these changes, it will need to transform its operating model, processes, IT/data infrastructure and talent pool.

#### **Operational model**

The operating model is expected to change significantly as analytical services and advisory and consulting relationships become important parts of risk management. For example, the risk function should be able to work with strategy to proactively manage all regulatory constraints. It must also build analytical capabilities to handle all current and new models and analytical approaches, such as machine learning.

During this transition, some areas stay the same size but change focus. For example, the risk management function will likely benefit from a shared model, engaging more with the business and other functions to improve customer journeys and product offerings, reducing non-financial risks at their source and helping the bank's overall strategy.

The risk function is also expected to take on new responsibilities for stakeholder management, de-biasing, regulatory governance and emerging risks. His personal and industrial activities are probably fueled by his focus on managing internal and external stakeholders, and he sets up a de-biasing department to help train relevant employees in unsavory ways. In addition, the risk-process task force can instill the concept of continuous improvement and zero-based process redesign in the risk organization. New teams can focus on the types of risks that banks are expected to face (eg model, contagion and cyber-attacks). As a result, some parts of the risk function will probably need more resources than they do today, such as those covering new types of risk.

#### **Procedures**

Some areas, including manual processes and risk reporting, may require fewer resources through simplification, standardization and automation. While risk decision-making is expected to be firmly embedded in end-to-end customer journeys, key processes are more

likely to be paperless, automated, and handled in real-time. The division of tasks between machines and humans will be much different than it is today. People review only selected cases that do not conform to bank policy, approve decision proposals, and review highly complex cases. This is expected to apply to retail and small and medium businesses as well. Automation also offers great opportunities for wholesale banking services when extending credit or making credit decisions for trade finance or receivables finance products for existing customers.

Non-financial risks provide another great opportunity to bring management directly into core processes. In operational risk, we expect human activities to focus on eliminating risk at source, designing key risk indicators (KRIs), implementing control points, and establishing incident management procedures. Many other activities, including monitoring, are expected to be automated over time. As a result, the number of compliance officers will likely be reduced; for example, financial crime detection relies on models such as machine learning.

#### **IT/data infrastructure**

The supporting IT infrastructure and data can take many forms, although recent trends rely on "dual-speed architectures" and data lakes. A two-tier architecture divides a bank's IT architecture into a slower, reliable backend (eg, the bank's core IT systems, often older systems) and a flexible, agile customer-oriented frontend. A data lake collects and stores all types of data, structured and unstructured, internal and external. It is not necessary to follow strict rules when entering data into the bank (as is required to enter data into the enterprise database). Instead, data users define the rules for retrieving data from the lake. Combining this flexibility with Google-like search technology, the data lake provides a step-change that helps banks leverage their data for multiple purposes, from marketing to risk to finance. The system's scale and flexibility help banks use big data tools to verify and analyze complex data.

Achieving the target state is expected to be costly, especially in terms of systems and infrastructure. While staying on top can make such investments vital, the cost pressures described here probably make this a trivial task. Some banks may be left behind because they are unable or unwilling to make these investments.

#### **Talent pool**

Talent and resources in the risk function will need to move to analysis, collaboration and other new areas of responsibility in the function; however, much fewer people are expected to participate in manual risk decision-making. New hires will likely have advanced mathematical and statistical backgrounds, be experts in machine learning and other sophisticated data analysis techniques, and work well with other parts of the bank to transform data. can be business translators. concepts of business activities. As these risk managers become trusted advisors to businesses, they can be expected to provide a strong contrast to today's operators and professionals who focus more on case review.

As banks search for the best candidates for these positions, they can compete directly with technology

firms for the best candidates. Partnerships with universities and financial technology companies will help banks acquire this talent. To win these candidates, the risk function must reshape its employee value proposition and align it with these new hires. The function must also change its culture to one that promotes entrepreneurship and creativity. These new hires will likely need training and development to keep them abreast of emerging trends in a complex technology environment with advanced digital tools.

#### **Conclusion:**

As a result of the research, we came to the following conclusion:

1. Risk assessment is an integral part of the banking industry and plays an important role in improving the efficiency of services. It allows banks to identify, measure and manage risks associated with the provision of services, as well as to develop appropriate strategies and measures to minimize them.

2. The implementation of a risk assessment system in the banking sector helps to identify threats and opportunities that may be related to the provision of services. This allows banks to develop and implement effective strategies aimed at reducing risks and increasing the efficiency of their activities.

3. Risk assessment helps banks adapt to changing market conditions and economic environment. By identifying and managing the risks associated with financial operations and investments, the bank can optimize its business processes, improve the efficiency of its services and strengthen its competitiveness.

4. Risk assessment helps to improve the quality of services in the banking sector. By identifying and managing the risks associated with financial transactions, the bank can ensure the reliability, recklessness and integrity of its services, which contributes to customer satisfaction and trust.

5. Implementation of the risk assessment system requires appropriate expertise, methodological development and technological support. However, the results of the study show that these costs are justified by increasing the efficiency of services, reducing possible risks and improving the bank's financial performance.

Overall, evidence-based research confirms that risk assessment is an important tool for improving service performance in the banking industry. The implementation of the risk assessment system allows banks to make informed decisions, minimize risks, improve the quality of services and increase their competitiveness in the market.

#### **References**

1. Zuriddinova O.S. "O'zbekistonda bank xizmatlari bozorini rivojlantirish yo'nalishlari" Scientific Progress, Volume 3/ISSUE 1/2022.
2. Абдуллаева Ш.З. Омонов А. "Тижорат банклари капитали ва уни бошқариш" IQTISOD-MOLIYA .Тошкент-2006 йил.
3. Абдуллаева Ш.З. Сафарова З. "Тижорат банклари молиявий ресурсларини бошқариш" IQTISOD-MOLIYA .Тошкент. 2007 йил.
4. Белоглазова Г.Н., Кроливецкая Л.П. Банковское дело: учебник / под ред. Г.Н. Белоглазовой, Л.П.Кроливецкой. М.: Финансы и статистика, 2012. С. 56.;
5. Богатин Ю.В., Швандар В.А. Инвестиционный анализ. Учебное пособие для вузов - М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. - 286 с.
6. Воронин Ю.М. Воронин Ю.М. Управление банковскими рисками. М.: НОРМА, 2007. С. 35.;
7. Жариков В.В., Жарикова М.В., Евсейчев А.И. "Управление кредитными рисками": учебное пособие /. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 244 с.;
8. Заборовский В.Е. "Совершенствование управления банковскими рисками в условиях экономической глобализации", Вестник УРФУ. Серия экономика и управление. № 5/2014.;
9. Захаров В.С. Захаров В.С. О рисках банковской системы // Деньги и кредит. 2004. № 3. С.23.
10. Захаров В.С. О рисках банковской системы // Деньги и кредит. 2004. № 3. С. 23.;
11. Ильина Т., Тусупбаева Б. «О классификации банковских рисков»/Общество и экономика, 9, 2018.; Бланк І.А. Фінансовий менеджмент: навчальний курс. Київ: Ельга, Ніка-Центр, 2013.;
12. Ильченко Константин Михайлович "Совершенствование системы управления рисками в деятельности региональных банков" ([http://www.dslib.net/finansy/sovershenstvovanie-sistemy-upravlenija-riskami-rossijskih-kommercheskih-bankov-v.html](http://www.dslib.net/finansy/sovershenstvovaniye-sistemy-upravlenija-riskami-rossijskih-kommercheskih-bankov-v.html)).
13. Калинина Т.Н., Калинина Ю.В. Теория рисков коммерческих банков: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2002. С. 14.;
14. Леонтиев В.Е. "К вопросу о сущности и классификации банковских рисков" УПРАВЛЕНИЕ № 1/47/2014. 26-35 стр.; Лаврушин О.И. Банковское дело. М.: КноРус. 2014. 800 с.; Гранатуров В.М. Экономический риск. Сущность, методы измерения, пути снижения. М.: Дело и сервис, 2010, 208 с.;
15. Мишальченко Ю.В., Кроли И.О. Риски в международной банковской деятельности // Бухгалтерия и банки. 1996. № 3. С. 17.;

# PEDAGOGICAL SCIENCES

## THE CONCEPT OF "TEACHING TECHNOLOGIES": ESSENCE AND CONTENT

**Ulviyya Hajiyeva,**  
*associate professor*

*Azerbaijan State Pedagogical University*  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-9612-6702>

**Nazile Abdullazade**  
*associate professor*

*Azerbaijan State Pedagogical University*  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-1829-7178>  
DOI: [10.5281/zenodo.10573824](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573824)

### **Abstract**

In the ever-developing and improving world, the educational system is also changing and aims to develop the moral and intellectual development of people, the ability to work with information, and the formation of creative and critical thinking. The main advantages of this system consist in the fact that the learner does not get it ready-made from the teacher, but in the process of his activity, and thus he has acquired the ability to turn information and problems into knowledge. As a result of the changing demands and needs of the society, the state and the citizen, new technologies entered the educational system.

The introduction of new learning technologies in general education schools began in the late 1990s. The transition to the Bologna education system, curriculum reform, new generation textbooks brought modern technologies to teaching. The use of active/interactive learning has accelerated the adoption of new technologies. First, despite the fact that serious successes in this field were not achieved, serious defects appeared in the teaching process, the scope of application of new technologies was expanding.

**Keywords:** teaching, technology, interactive, modern approach, integration.

Although the concept of teaching technology began to be developed in the scientific-methodical literature from the last decade of the 20th century, the ways and types of its use have been discussed more often in the last decade. This is primarily due to the fact that new teaching technologies are directly included in the teaching process and become one of the main attributes of the learning process. Over time, new technologies have been further improved, new ones have been developed and tested in classes. If you follow the pedagogical literature, it becomes clear that not all of these technologies are used or not all of them are successful. There are technologies and methods that teachers have accepted and applied very easily. There are technologies whose names are mentioned only in pedagogical literature today.

But what is technology in general? "Technology" consists of the Greek words *teshne* - art, profession, *logos* - science, teaching. As a pedagogical term, "the correct explanation of its essence requires first of all to look at it in a broad plan. Therefore, the concept of "technology" should be understood in both broad and narrow sense. Broadly speaking, this concept applies to all areas of human activity. That is, production of both material and spiritual wealth, as well as formation of moral values, corresponds to technology understood in a broad sense.

So, achieving something, what to use and how to use it to achieve the goal is the basis of technology. In short, the means used to achieve the goal, the methods used to activate these means, and all other types of activities that manifest themselves in this process together constitute the core, the essence of technology" [Didaktika, 1975:143].

We can understand the explanation of the term "Technology" in a broad sense as follows: "Technology, in general, is a scientifically and practically based activity system applied by people related to the study of the surrounding world and making relevant changes, the production of materials and the formation of a system of moral values" [ Huseynoglu, 2003:9]

Soltan Huseynoglu summarized the definitions given to the concept of "technology" in the pedagogical literature and showed the most used ones:

- pedagogical technology is systematic planning, activity and assessment methods applied to achieve more effective results in education, taking into account the entire learning process and knowledge acquisition, human and technical resources, their interaction;

- pedagogical technology is a system that expresses the functions of all components of the pedagogical process, which is built on a scientific basis, programmed within a certain time and space, and the intended results are achieved;

- pedagogical technology is the organization of the teacher's activity in such a way that all the actions included in this activity form a certain integrity and sequence, and their implementation results in expected achievements and has a prognostic character;

- pedagogical technology is a joint, mutual activity of teachers and students, carried out taking into account the principle of individuality. As a result of this activity, students master the state standard of education;

- pedagogical technology is the planned, sequential implementation of a pre-designed pedagogical process using optimal methods, principles and methods of action to achieve the set goals, etc.

From all these mentioned, we can conclude that the pedagogical technology is based on mutual cooperation in the learning process, it determines the organization of teaching and its successful completion using various methods and tools.

Effective application of pedagogical technologies, according to methodist scientists, depends on following their general principles. We can summarize these principles as follows:

- *educative principle*. In all eras, both traditional and curriculum teaching, the educative function has always been expected. Regardless of its nature and type, all technologies assume educativeness as a basis in the formation of personality. The main goal of the new teaching technologies is to cultivate the personality in the spirit of loyalty to the national ideology, moral and aesthetic values, and the ideology of Azerbaijaniism.

- *developing principle*. One of the teaching goals is developmental. Development is directly related to mental development and assumes the development of thinking and the formation of mental skills as a basis. For this, the student should be successful, reveal his individual capabilities and strength. In this case, it can succeed.

- *the principle of counter-relation with students*. The learner's understanding and assimilation of the material in the learning process emerges in the creation of the principle of counter-relation. This is based on the creation and permanence of multi-way counter-relation with students. How and at what level the student understands the learning material should be clear in the learning process. The student must return to the teacher what he heard from the teacher and what he learned at the same time. At this time, the teacher can monitor the student's development and also allows him to be informed about it.

- *principle of regular repetition*. Pedagogical experience shows that knowledge is ineffective if it is not applied, that is, it is forgotten. Studying the teaching material is one aspect of the work. It is known from experience that acquired knowledge is forgotten if it is not applied. Sometimes, depending on the situation, the application of knowledge is delayed. At this point, repetition is needed; the teacher should make room for repetition in each lesson by using different methods if possible. Any topic should be repeated, if not completely, but a certain part of it should be linked to a new topic. This should always be in the teacher's attention during the teaching process, should strengthen the acquired knowledge by connecting it with past knowledge.

- *the principle of optimal mental tension*. One of the points that the teacher should pay attention to when introducing new technologies in the educational process is that the educational material, the scope of the task and the level of mastery are accessible to the learners. As we know, the teaching material is low level, medium and hard according to the level of complexity. Although low-level tasks are easily completed by the student, they neither allow the student to develop nor allow the teacher to monitor his progress. When the task is too difficult, the student falls into psychological difficulties. For this, the teacher should choose such tasks and use such methods and tools as to be able to

monitor the student's development and create mutual cooperation with him.

- *the principle of maximum involvement of students in the teaching process (teaching activity)*. The introduction of new learning technologies also requires student engagement. Unlike traditional teaching, in interactive teaching, students should be more active and act as subjects. In order for the student to be active, the teacher should give him freedom and leave it up to him to complete the task. By acting as a facilitator, the teacher achieves the student's activity, which means the successful implementation of the developmental goal.

- *the principle of unification of teachers and students for a common goal*. The introduction of new technologies is based on the voluntary principle of teaching. Thus, the teacher cannot make the student accept anything in a planned way, there must be a type of activity based on the mutual consent of both sides - the teacher and the student. In the joint activity, the student solves the problem with both the teacher and his friends.

If we look at the essence of these principles, we will see that they are related to each other and ultimately serve to improve the quality of education.

Acquaintance with the scientific-methodical and pedagogical literature shows that teachers sometimes cannot use new technologies correctly, turn the lesson into entertainment or treat it as entertainment. Efficient noise in class, division into groups, etc., lead to defects. The reason for this can be attributed to the fact that some teachers are not aware of theoretical information and cannot "digest" new things. As a result, rather than achieving the goal set in the lesson, they strive for the mechanical execution of various operations, as if they are trying to demonstrate that they have implemented the requirements of the new technology.

This shows that no matter how much the technologies change and update, the teacher's methodology remains unchanged. The teacher adapts the new technology to his methodology and uses it, demonstrating that he accepts pedagogical innovation.

In conclusion, we can summarize the necessity of introducing new teaching technologies as follows:

- the development of science and technology also manifests itself in the teaching process;

- as in the content of teaching, there is a need to change pedagogical approaches, methods and technologies;

- Integration into the European education system enables the introduction of new teaching technologies;

- the rapid development of information and communication technologies necessitates the application of new technologies in teaching;

- an attempt to find a creative approach and solution to the events happening around in the age of scientific and technical progress.

New teaching technologies have given new content to learning for both teacher and student. Knowledge is no longer readily transmitted by the teacher, students try to acquire it by thinking and searching. The teacher is just a facilitator and guides and cooperates with the student in a mutual way. The teacher becomes creative and proactive, each lesson prompts him to conduct research, use additional

sources, different technical means. Thus, the purposeful activity of the teacher enables students to realize their potential.

Application of new teaching technologies also enriches students' activities. For example:

- acquires the opportunity and ability to conduct research on various sources;
- learns to work in a team, to cooperate;
- communication skills are formed;
- emotional-volitional qualities develop;
- acquires the ability to express his opinion honestly;
- acquires the ability to listen to the opinion of others, etc.

Experienced teachers do not forget the past experience on the basis of new technologies, they take the "good" from traditional teaching and synthesize it into interactive teaching. At the same time, it turns out that it is impossible to fully master the subject based only on new technologies, that is, on the independent research of the student. Because an independent approach to a subject he does not know sometimes creates confusion and distance from the subject in the student's imagination and thinking, which can eventually lead to the wrong conclusion. In this sense, the support and direction of the teacher is needed. Because no matter how independently the student thinks and searches, from a methodical point of view, he gives way to unsystematism, sparseness, and inappropriate "self-confidence". The teacher's intervention is definitely needed to systematize knowledge, generalize, and create connections.

Today, new teaching technologies have become an integral part of the educational system, based on the learning activity in accordance with the requirements of globalization. The teaching of subjects has taken a new direction. Increasing the students' mutual cooperation ability, creative and critical thinking and establishing communicative relations leads to activation in teaching.

Recent theoretical considerations have conducted various scientific studies based on the methodology of teaching subjects at the general secondary education level (grades V-IX), brought active-interactive teaching, which is the main function of constructive and dynamic management of teaching in a number of fields, to pedagogical science. In recent times, scientific theoretical considerations have introduced a new pedagogical perspective of active learning and ways of influencing a healthy psychological environment [Agayev, 2006:29].

L.A.Malkova, who divided the interactive teaching technologies in the modern lesson into theory, application and practice, explained the theoretical and methodological bases of the organization of this teaching [Малькова, 2014:26]. The teaching of the subject in general secondary education is presented with the application of didactic tools and lesson examples at each stage.

One of the main goals in active interactive teaching is to increase students' thinking skills, understanding of literary concepts in the context of high school, providing students with live communication conditions in the learning environment. These learning methods

include didactic games, brainstorming, question-and-answer, learning artistic algorithms, group work, role-playing, artistic stimulations, problem solving, and other contextual activities. The knowledge that the student will gain is further improved in these ways, it helps to increase cooperation, creativity, and critical thinking. Interactive methods reveal the facilitator role of the teacher and reflect the role of students in the learning center.

Mental activity in active teaching affects the correct development of the student's thinking and benefits the formation of free thinking. Understanding the themes and messages in the text, understanding the plot and describing the text are explained as important active skills [Yusifova, 2010]. Images and their interaction in a work of art can be better interpreted in the application of new learning technologies - collective discussion, groups, role-playing games and dialogues. At this time, the position of the author, the more prominent expression of the subtextual meaning of the work requires the inclusion of new teaching models in the teaching.

Fundamental changes in education and society have created a real basis for updating the content of the entire general education system, which is manifested in the development and application of new content elements, new educational technologies, and appeal to world pedagogical experience. The interactivity of the teaching also ensures the networking nature of the teaching, that is, the distribution of new information and technologies in social networks. Teachers and students can communicate worldwide and share important information and learning experience in social networks [Abbasov, 2005:24].

The introduction of new technologies in active teaching also changes the learning environment, which plays a major role in the formation of learners as personalities. The lesson is not enough to provide knowledge, it fully and comprehensively fulfills the requirements of emotionality, idealism, visuality, scientificity, intensity, integrativeness and the use of information and communication technologies. Various forms of organization of teaching - groups, pairs, individual types of work strengthen cognitive activity in students, increase understanding, differentiation strengthens motivation and empathy, and realizes reflective demonstrations. Lessons conducted in collective and group cooperation also regulate the communicative skills of students, regulate the dynamics of both oral and written speech.

The interactive teaching process encourages the teacher and students to learn together and facilitates the learning process. In an interactive teaching process involving teachers and students, the environment prepares learners for this teaching, encourages collaborative learning, and facilitates teaching. According to Russian educational psychologists A.E.Belkova and L.P.Lesnichenko, the introduction of new teaching technologies creates "freedom of action" in students, understood as a behavior [Belkova, 2015]

Today, the formation of skills to improve the ways of applying new teaching technologies is considered as the most important task of the modern teaching process.

**References**

1. Abbasov Ədalət, Balakişiyev Şahbaz, Əliyeva Bibixanım, Xudiyeva Gülarə, Süleymanova Afət (2005). Azərbaycan dili və ədəbiyyat. Metodika və təcrübə. – Bakı: “Orxan”. – 486 s.
2. Ağayev Əjdər (2006). Yeni təlim metod və texnologiyalarından istifadənin nəzəri və praktik məsələləri // Azərbaycan Respublikasının Təhsil Problemləri İstututunun Elmi əsərləri. – Bakı: №1. – s.29-44.
3. Həsənli Bilal, Quliyev Əsgər, Hüseynoğlu Soltan (2003). Ədəbiyyat. Pilot məktəblərinin 6-cı sinfi üçün dərslik. – Bakı: “Çaşioğlu”. – s.
4. Hüseynoğlu Soltan, Quliyev Əsgər, Həsənli Bilal (2003) Ədəbiyyat. Pilot məktəblərinin 5-ci sinfi üçün dərslik. – Bakı: “Çaşioğlu”. – s.
5. Yusifova S. (2010). Ədəbiyyat dərslərində fəal təlim üsullarından istifadə imkanları. //“Təhsil Problemləri” qəzeti. – 01-07, 14-21 iyun.
6. Дидактика средней школы (1975). Под. ре-дакцией М.А.Данилова и М.Н. Скаткина. Москва: – «Просвещение». – 195 стр.
7. Aktamovna A.D., Aktamovna A.X., Kuvondikkizi T.G. (2020). A non-traditional approach to organizing lessons. Bbk 83, 43.7.
8. Belkova A.E., Lesnichenko L.P. (2015) Interactive learning method on Russian language lessons as a way to increase cognitive activity students // Young-scientist. -No. 23. -P. 1068-1071. – URL <https://moluch.ru/archive/103/23947/>.
9. Малькова Л.А. (2014). Что такое методи-ческая разработка и требования, предъявляемые к ней. – Москва: ГАПОУ МОК им. В.Талалихина. – 26 с.

# PHYSICAL SCIENCES

## PROOF OF PHYSICAL REALITY OF IMAGINARY NUMBERS AND EXPLANATION OF THEIR PHYSICAL ESSENCE<sup>3</sup>

Antonov Alexander Alexandrovich

*PhD, HonDSc, HProf.Sci*

*Independent researcher, Kiev, Ukraine*

[DOI: 10.5281/zenodo.1057381](https://doi.org/10.5281/zenodo.1057381)

### **Abstract**

In the article it is shown that the version of the special theory of relativity (STR), stated in all textbooks of physics, is wrong as the relativistic formulas received in it are wrong, they are incorrectly with use of wrong principle of non-exceeding of speed of light are explained and from them wrong conclusions about physical unreality of imaginary numbers and also about existence in the nature of our only visible universe are made. This generally recognized version of STR is refuted experimentally proved as a result of research of transient processes in linear electric circuits by the general scientific principle of physical reality of imaginary numbers discovered 500 years ago. It is explained that imaginary numbers in astrophysics correspond to the world of invisible parallel universes in other dimensions. Its cognition is the task of future science. However, the neighboring universes can be seen on the starry sky in portals even now. The corrected relativistic formulas are obtained and the corrected version of STR corresponding to them is created.

**Keywords:** imaginary numbers, special theory of relativity, invisible universes, hidden Multiverse, Hyperverse

### **1. Introduction**

Imaginary numbers were discovered 500 years ago by Scipione Del Ferro, Niccolo Fontana Tartaglia, Gerolamo Cardano, Lodovico Ferrari and Raphael Bombelli [1]. And perhaps even earlier than them such a scientific discovery was made by Paolo Valmes [2], who was burned alive at the stake for this by the verdict of the Spanish inquisitor Thomas de Torquemada. Even Sir Isaac Newton<sup>4</sup> was forced to take into account the opinion of the Inquisition about imaginary numbers, who therefore preferred not to use them in his works.

However, their physical significance remains unknown in science to this day. Indeed, everyone knows what 7 seconds, 12 meters, or 19 grams are, but no one knows what  $7i$  seconds,  $12i$  meters and  $19i$  grams, where  $i = \sqrt{-1}$ , are. We all know that 7, 12 and 19 are simply numbers having no physical significance outside of their context. However, this knowledge was not enough to understand the STR.

### **2. The Problem of Understanding Imaginary Numbers**

Works of famous mathematicians Abraham de Moivre, Leonhard Euler, Jean le Rond d'Alembert, Caspar Wessel, Pierre-Simon de Laplace, Jean-Robert Argand, Johann Carl Friedrich Gauss, Augustin Louis Cauchy, Karl Theodor Wilhelm Weierstrass, William

Rowan Hamilton, Pierre Alphonse Laurent, Georg Friedrich Bernhard Riemann, Oliver Heaviside, Jan Mikusiński and others contributed to creation of a perfect theory of functions of a complex variable. However, the theory neither proves physical reality of imaginary numbers nor explains their physical significance<sup>5</sup>.

Imaginary numbers are now widely used in all exact sciences, including radio engineering, electrical engineering, optics, mechanics, acoustics, etc. But in them also the physical reality of imaginary numbers is not proved and their physical meaning is not explained<sup>6</sup>.

But in the generally accepted version of the special theory of relativity (STR) [3]-[5], which is rightly considered one of the most outstanding theories created in the 20th century and is therefore currently studied in all physics textbooks, it is even denied, since its creators were unable to explain the relativistic formulas obtained therein.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \quad (1)$$

$$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2} \quad (2)$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2} \quad (3)$$

<sup>3</sup> This is reprint of the article “Antonov A. A. Proving physical reality and explanation physical nature of imaginary numbers”. Norwegian Journal of development of the International Science”. 123. 26-36. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10451085>

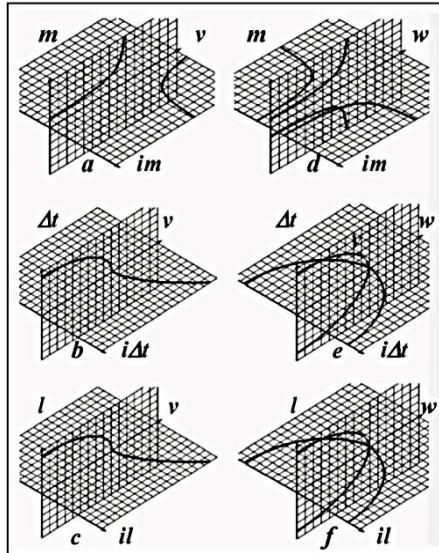
<sup>4</sup> In the atmosphere of the omnipotence of the Inquisition and intolerance of dissent that existed at that time, Newton's friend William Whiston was stripped of his professorship in 1710 for some of his careless statements and expelled from Cambridge University.

<sup>5</sup> Naturally, about physical reality and physical essence of imaginary numbers, as well as real numbers, we can speak only in relation to named numbers, equipped with indications on the used units of measurement of corresponding parameters of physical objects and processes.

<sup>6</sup> More precisely, in radio engineering and electrical engineering it is actually revealed in the process of their practical use, but nothing is written about this in textbooks, so as not to refute physics.

where  $m_0$  is the rest mass of a moving physical body;  
 $m$  is the relativistic mass of a moving physical body;  
 $\Delta t_0$  is the rest time of a moving physical body;  
 $\Delta t$  is the relativistic time of a moving physical body;

$l_0$  is the rest length of a moving physical body;  
 $l$  is the relativistic length of a moving physical body;  
 $v$  is the velocity of a moving physical body;  
 $c$  is the speed of light;



**Fig. 1.** Graphs of functions  $m(v)$ ,  $\Delta t(v)$  and  $l(v)$  corresponding to the existing and the corrected versions of the STR in the subluminal  $v < c$  and superluminal  $v > c$  ranges

They could not explain physical significance of these formulas for the superluminal velocity range, where, according to these formulas, mass, time, and distance were measured in imaginary numbers (see Fig. 1a, b, c). However, since a theory that could not be explained even by its creators would be useless to anyone, in the STR had to introduce a postulate<sup>7</sup>, known as the principle of light speed non-exceedance, the meaning of which is clear from its name.

In relation, for example, to the Lorentz-Einstein formula (1), it was explained as follows. The postulate asserted that since the situation at  $v > c$  never occurred anywhere in the early 20th century, it did not need any explanation. Thus, imaginary numbers were unnecessary. i.e. non-existent. Moreover, they were even called imaginary

However, since the existing version of the STR was based solely on a postulate, that is, an unproven assumption, there was no complete certainty that it was correct. Actually, it turned out to be incorrect, since in 2008-2010 (i.e., even before publication of results of the unsuccessful OPERA experiment<sup>8</sup> conducted at the Large Hadron Collider in 2011), it was experimentally

proven [6]-[10] that imaginary numbers are physically real.

### 3. Proof of Physical Reality of Imaginary Numbers

Thus, in the 21st century, a Hamlet's question has arisen in physics – is the generally accepted version of the STR correct or not correct? Consequently, does it require correction or not? To address this, it was necessary to answer another question – whether imaginary numbers discovered 500 years ago are physically real or not. And the response to this question required experimental confirmation, even though this issue falls within the realm of mathematics. However, Oliver Heaviside asserted on a similar issue, “*Mathematics is an experimental science.*”

Let us further examine electromagnetic transient processes in linear electrical circuits [10]-[15], which allow us to answer this question conclusively using simple experiments<sup>9</sup>. These experiments can be carried out by any engineer in less than a day in any radio engineering laboratory. Such processes in linear electrical LCR circuits are described by linear differential equations (or systems of such equations)

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x \quad (4)$$

<sup>7</sup> Since it has never been proven theoretically or confirmed experimentally by anyone.

<sup>8</sup> Which was no longer needed

<sup>9</sup> In contrast to the extremely expensive physics experiments MINOS, OPEPA and ICARUS

where  $x(t)$  is the input action (or the input signal);  
 $y(t)$  is the response (or the output signal);  
 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$  are the constant coefficients;  
 $n, n-1, \dots, 0, m, m-1, \dots, 0$  is the order of derivatives.

A solution to the equation (5) is known to equal the sum of two components

$$y(t) = y(t)_{\text{forced}} + y(t)_{\text{free}} \quad (5)$$

where  $y(t)_{\text{free}}$  is the free component of response, corresponding to the transient process;

$y(t)_{\text{forced}}$  is the forced component of response.

They are found in different ways. We are only interested in the free component of response.

Finding a specific type of a free component of response begins with writing and solving the so-called characteristic algebraic equation (usually of the second order) corresponding to the original differential equation (4)

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = 0 \quad (6)$$

where  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  are the constant coefficients same as in the equation (4);

$n, n-1, n-2, \dots, 1, 0$  are the degree indices, the magnitude of which is equal to the order of the corresponding derivatives in differential equation (4);

$p$  is the variable, which is often called a complex frequency, when it takes values in the form of complex numbers.

Currently, two algorithms for solving algebraic equations (4) are used in mathematics. According to the first algorithm, solutions are found in the form of real numbers known to everyone. The second algorithm finds solutions to complex numbers that no one understands.

Then, one might assume that no one needs complex numbers because of their incomprehensibility. But, actually, the use of complex numbers greatly simplifies mathematical reasoning and many engineering calculations. Thus, when solving algebraic equations of

power  $n$  according to the first algorithm, we would receive either  $n$  roots or  $n-1$  roots or  $n-2$  roots ... or even no roots, depending on the value of coefficients.  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  And when using the second algorithm to solve the same algebraic equations of power  $n$ , we would always receive  $n$  roots. Therefore, for some combinations of coefficients  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ , the algebraic equation (6) might not have any solution within the first algorithm, and would always have  $n$  solutions within the second algorithm.

This definitely contradicts common sense and requires an answer to the question – which of the algorithms mentioned above provides the only correct solution in a particular situation? After all, two mutually exclusive statements cannot be simultaneously true. In the formal logics, the Latin aphorism '*Tertium non datur*', i.e. there is no gap between them that corresponds to this situation.

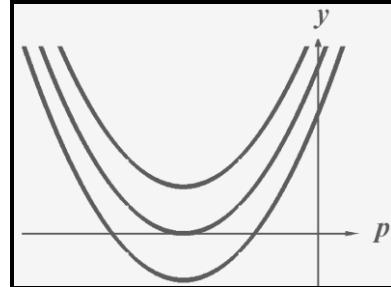
However, the question is uneasy, otherwise, the answer thereto would have been received long ago. Since humans have a visual thinking, graphical solutions to algebraic equations would be the most helpful in explaining the situation.

For this purpose, we shall convert, for example, the algebraic quadratic equation  $a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$  as follows

$$\begin{cases} y = a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \\ y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Then its solution (see Fig. 2) would correspond to the intersection of the parabola  $y = a_2 p^2 + a_1 p + a_0$  and the line  $y = 0$ , i.e. the abscissa axis  $p$ .

As can be seen depending on the parabola position relative to the axis  $p$ , which is determined by values of coefficients  $a_2, a_1, a_0$ , the parabola  $y = a_2 p^2 + a_1 p + a_0$  can cut the axis  $p$  either at two or one or none of the points.

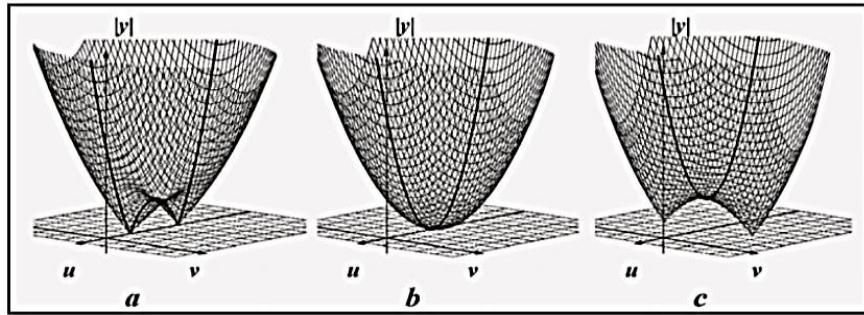


**Fig. 2.** Graphical solution to the quadratic equation in the set of real numbers, explaining that the equation can have either or two or one or no solutions

The result obtained is consistent with the corresponding analytical solution to the quadratic equation. Actually, if a discriminant of the equation  $a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$  is positive, the equation has two different real roots  $p_1 = -\sigma_1$  and  $p_2 = -\sigma_2$ . If a discriminant is equal to zero, i.e.  $a_1^2 - 4a_2 a_0 = 0$ ,

the equation has one real root  $p = -\sigma_0$ . And if a discriminant is negative, i.e.  $a_1^2 - 4a_2 a_0 < 0$ , the equation does not have any real root.

The result is so simple and obvious that it would seem to even serve as a proof of existence of the only right solution according to the first algorithm using real numbers. But this is not the case, since a no less clear graphical solution to the quadratic equation can also be obtained within



**Fig. 3.** Graphical solution to the quadratic equation in the set of complex numbers, explaining that the equation can have two solutions or one double solution

the second algorithm. It looks to be impossible at first sight, since the graph of function, where and are the complex quantities, should be four-dimensional. Humans can neither imagine nor de-pict four-dimensional graphs. Really, try to imagine and draw, for example, a four-dimensional cube (also referred to as a tesseract or octachoron). But mathematicians can do this.

However, the problem becomes quite solvable if a four-dimensional graph of the function of complex variable  $y = f(x)$  is replaced by a three-dimensional graph of function  $|y| = |f(x)| = |f(\sigma + i\omega)|$ . Thus, within the second solution algorithm, the quadratic equation can be converted into a system of equations, corresponding to the Fig. 3.

$$\begin{cases} |y| = |a_2(\sigma + i\omega)^2 + a_1(\sigma + i\omega) + a_0| \\ |y| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Herewith, Fig. 3a would correspond to the case when a solution to the quadratic equation for  $a_1^2 - 4a_2 a_0 > 0$  has two real roots of different values  $p_1 = -\sigma_1$  and  $p_2 = -\sigma_2$ . In this case, the surface  $|y| = |f(x)|$  would contact the plane of the complex variable  $x = \sigma + i\omega$  at two different points  $p_1 = -\sigma_1$  and  $p_2 = -\sigma_2$  on the axis of real numbers  $\sigma$ .

Fig. 3b would correspond to the case when a solution to the quadratic equation for  $a_1^2 - 4a_2 a_0 = 0$

has one double<sup>10</sup> real root  $p_{1,2} = -\sigma_0$ . In this case, the surface  $|y| = |f(x)|$  would contact the plane of the complex variable  $x = \sigma + i\omega$  at one point  $p_{1,2} = -\sigma_0$  on the axis of real numbers  $\sigma$ .

Fig. 3c would correspond to the case when a solution to the quadratic equation for  $a_1^2 - 4a_2 a_0 < 0$  has two complex conjugate roots  $p_{1,2} = -\sigma \pm i\omega$ .

In this case, the surface  $|y| = |f(x)|$  would contact the plane of the complex variable  $x = \sigma + i\omega$  at two points that are not on the axis of real numbers  $\sigma$ .

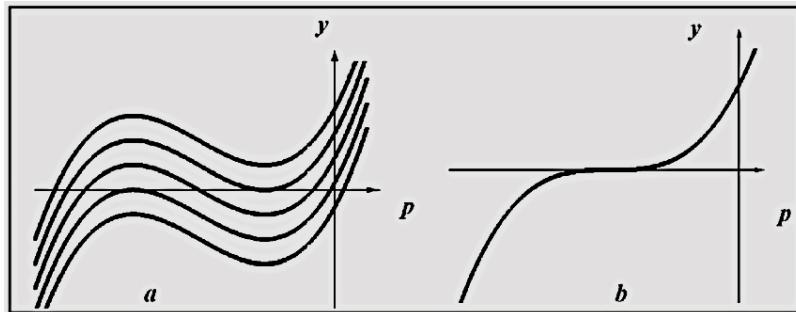
Algebraic equations of the third and higher degrees can be solved graphically in a similar way. Fig. 4 gives an example of a graphical solution to the algebraic cubic equation  $a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$ , which in the set of real numbers is converted as follows

$$\begin{cases} y = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \\ y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Apparently, depending on the position of the curve  $y = f(x)$  relative to the abscissa axis (i.e. depending on the value of coefficients  $a_3, a_2, a_1, a_0$ ), the cubic equation can have either one or

two or three real solutions within the first algorithm (see Fig. 4a,b). Fig. 5a,b,c,d,e shows graphical solutions to the cubic equation  $a_3(\sigma + i\omega)^3 + a_2(\sigma + i\omega)^2 + a_1(\sigma + i\omega) + a_0 = 0$  in the set of complex numbers

<sup>10</sup> For example, for the equation  $(x + \sigma_0)^2 = 0$



**Fig.4.** Graphical solution to the cubic equation in the set of real numbers, explaining that this equation can have either one or two or three solutions

for the same combinations of coefficients  $a_3, a_2, a_1, a_0$ , as in Fig. 4, equivalent to the system of equations

$$\begin{cases} |y| = |a_3(\sigma + i\omega)^3 + a_2(\sigma + i\omega)^2 + a_1(\sigma + i\omega) + a_0| \\ |y| = 0 \end{cases} \quad (10)$$

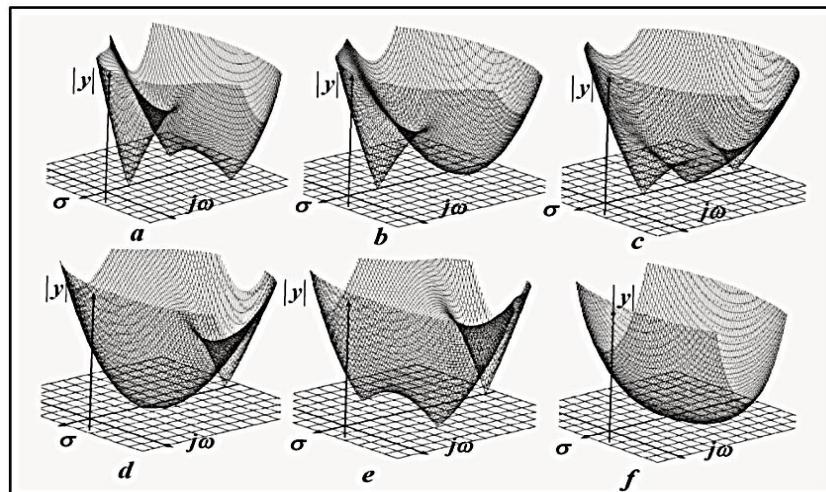
As can be seen, a solution to the equation  $a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0$  has always three roots when using the second algorithm. But some roots can be double as in Fig. 4a, 5b, 5d, and even triple<sup>11</sup> as in Fig. 4b and 5f. In the latter case, in Fig. 3b, the graph is somewhat different, looking like a tangentoid (or cotangentoid).

And while the points of intersection of the curve  $y = a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0$  and the abscissa axis  $p$  correspond to solutions to the equation

$a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0$  in Fig. 4, the points of contact of the surface  $|y| = |a_3(\sigma + i\omega)^3 + a_2(\sigma + i\omega)^2 + a_1(\sigma + i\omega) + a_0|$  of the complex plane  $x = \sigma + i\omega$  correspond to solutions to the same equation  $a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0 = 0$  in Fig. 5.

Moreover, both figures show the same particular cases of the situations mentioned. Consequently, equally convincing graphical solutions can also be proposed to the cubic equations (and equations of higher degrees) in the set of both real (Fig. 4) and complex (Fig. 5) numbers.

Thus, purely mathematical reasoning above do not allow us to make an indisputable conclusion about the truth of one and the falsity of another algorithm for solving algebraic equations; or, in other words, to draw a conclusion about physical reality or unreality of their solution expressed in the form of complex numbers.



**Fig. 5.** Graphical solution to the cubic equation in the set of complex numbers, explaining that in this case it has either three solutions or two solutions, one of which is double, or one triple solution, i.e. having always three solutions

It is clear that then the choice from the mentioned two algorithms for solving algebraic methods could be made differently - in accordance with the general scientific criterion called "Occam's razor"<sup>12</sup>. According

to this criterion, the theory that has the simpler explanation<sup>13</sup> must be accepted as true. And in accordance with this criterion, in all likelihood, sooner or later the second recognized algorithm would be true.

<sup>11</sup> For example, for the equation  $(x + \sigma_0)^3 = 0$

<sup>12</sup> 'Occam's Razor' is a principle formulated in the 14th century by the English monk William of Ockham: "More things should not be used than are necessary".

<sup>13</sup> As, for example, in astronomy the Copernican heliocentric system was recognized as true and the Ptolemaic geocentric system was recognized as false.

But the trouble is that this choice would require explaining physical significance of complex numbers. Physicists do not have an explanation. And, what is worse, instead of admitting this, they state without evidence that imaginary (and, consequently, complex and hyper-complex) numbers have no physical content, referring to the principle of light speed non-exceedance. Authority of the STR actually hinders the study of this important problem. Such a point of view turned out to be even terminologically<sup>14</sup> fixed in science, since one of components of complex numbers is called imaginary, i.e. supposedly non-existent, numbers.

That is why mathematics still uses both algorithms for solving algebraic equations, even despite the fact that

- solutions obtained by these algorithms often mutually exclude each other;
- the STR considers one of these solutions (in the form of complex numbers) to be physically non-existent<sup>15</sup>.

So what is the answer to the question whether solutions to algebraic equations physically exist in the form of complex numbers? Since, as has just been shown, the use of purely mathematical<sup>16</sup> means cannot answer the question, let us try to figure it out relying solely on common sense.

For this purpose we try to understand what meaning the words ‘solution exists’ or ‘solution does not exist’ should have. Where does it exist? On paper? In computer? On a blackboard in a university classroom? We could say so, but “in nature, in the physical world we live in” would apparently be more correct answer.

Therefore, we should talk about existence of a solution as a physical reality. And it would be logical to conclude that answering the question requires physical experiments. What kind of experiments are these? And it turns out that such experiments have been done for a long time by both humans and nature. We meet them everywhere. They are well known to everyone. These are shock oscillations. In any form. In the form of sound of a piano or a tuning fork, in the form of tsunami or ‘Indian summer’, in the form of children’s swing<sup>17</sup> rocking after being pushed by parents, etc.

In this regard, let us recall that only solutions in the form of complex numbers are always used in solving characteristic algebraic equations (6) while studying transient processes (for example, in electrical circuits). The first algorithm for solving algebraic equations using real numbers is never applied in relation to characteristic equations.

Why? The answer to this question is extremely important. Therefore, let us consider in more detail how this question is covered, for example, in the electrical circuit theory. It states that if a characteristic algebraic

equation of the second degree has two different real roots  $p_1 = -\sigma_1$  and  $p_2 = -\sigma_2$ , then an aperiodic transient process exists in an electrical circuit and is described by the time function

$$y(t)_{free} = Ae^{-\sigma_1 t} + Be^{-\sigma_2 t} \quad (11)$$

If roots of a characteristic equation of the second degree are real and multiple of  $p_{1,2} = -\sigma_0$ , then the so-called critical transient process exists in an electrical circuit and is described by the time function

$$y(t)_{free} = (A + Bt)e^{-\sigma_0 t} \quad (12)$$

And, finally, if roots of a characteristic equation of the second power are complex conjugate numbers  $p_{1,2} = -\sigma \pm i\omega$ , then an oscillatory transient process corresponding to them exists in an electrical circuit, and the quantities  $p_1$  and  $p_2$  are the complex frequencies of free oscillations. This transient process is described by the time function

$$y(t)_{free} = e^{-\sigma t} [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] \quad (13)$$

Herewith, integration constants  $A$  and  $B$  are determined from the initial conditions  $y(0)$  and  $y'(0)$  in all particular cases.

Solutions to characteristic algebraic equations of higher powers can include aperiodic, critical and oscillatory components. This is covered in detail in textbooks. However, they neither explain nor substantiate why characteristic equations are solved only using the second algorithm, which allows finding their roots in the form of complex numbers. And, it turns out, because only in such a case the transient can also exist in the form of shock oscillations (13). The use of the first algorithm would necessitate arguing that shock oscillations should not have existed. However, they do exist.

Thus, the point is that oscillatory transition processes exist in nature. And they can exist only if the characteristic algebraic equations corresponding to them have solutions in the form of *complex numbers*. And only for this reason the unsolvable in pure mathematics question about which of the two mutually exclusive algorithms of solving algebraic equations is correct, turned out to be quite solvable with the help of simple physical experiments. And common sense.

It follows from the above that it is necessary to recognise solutions of algebraic equations<sup>18</sup> using complex numbers as the only correct and corresponding to physically real existing processes in the world around us. Therefore, complex frequencies  $p_{1,2} = -\sigma \pm i\omega$  of free oscillations are physically real, including their

<sup>14</sup> Actually, long before the STR was created.

<sup>15</sup> Consequently, mathematicians have not recognized the principle of light speed non-exceedance postulated in the STR as scientifically sound.

<sup>16</sup> But we must not forget that names such as mathematics, physics, radio electronics, etc. were given by people specializing in some narrow research area subject to their limited intellectual capabilities. However, when it comes to Nature, all these names are replaced by the only name of Science.

<sup>17</sup> It is interesting to note that children’s swing, on which children are rocking without the help of their parents, refutes another scientific misconception, which, according to information on the Internet, is shared by many authoritative scientists. The misconception suggests that unsupported motion devices, the so-called inertoids, cannot exist, and their existence is therefore denied by modern science, as it contradicts the law of conservation of momentum.

<sup>18</sup> And not only characteristic ones.

imaginary components. And not only complex frequencies, but also any other imaginary and complex numbers. And as this statement is true for transients not only in the theory of linear electric circuits, but also for transients studied by all other sciences, i.e. it is general scientific, so we will call it the principle of physical reality of imaginary numbers.

And this experimentally provable principle of the physical reality of imaginary numbers naturally refutes the postulated principle of non-exceeding the speed of light, asserting from the unreality,

#### 4. Explanation of Physical Essence of Imaginary Numbers

Hence, for relativistic formulas of STR (1)-(3) the results of calculations on them not only in the form of real, but also in the form of imaginary numbers should be explainable. Nevertheless, these formulas still cannot be explained for one more reason - as can be seen (see Fig. 1a,b,c) their graphs in sub light and hyper light ranges have essentially different form. Moreover, they correspond to physically unstable processes, which cannot exist in Nature. Therefore relativistic formulas (1)-(3) are still incorrect.

And so that the same patterns took place in nature in the subluminal  $V < C$  and superluminal  $V > C$  speed ranges, and, therefore, formulas describing the corresponding processes could be explained, the graphs  $m(v)$ ,  $\Delta t(v)$  and  $l(v)$  should be as depicted in Fig.

1d,e,f. For this purpose, the function  $i^q$  should be introduced into the corrected relativistic formulas of the STR corresponding to them.

$$m(q) = \frac{m_0 i^q}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c} - q)^2}} = \frac{m_0 i^q}{\sqrt{1 - (\frac{w}{c})^2}} \quad (14)$$

$$\Delta t(q) = \Delta t_0 i^q \sqrt{1 - (\frac{v}{c} - q)^2} = \Delta t_0 i^q \sqrt{1 - (\frac{w}{c})^2} \quad (15)$$

$$l(q) = l_0 i^q \sqrt{1 - (\frac{v}{c} - q)^2} = l_0 i^q \sqrt{1 - (\frac{w}{c})^2} \quad (16)$$

where  $q(v) = \lfloor v/c \rfloor$  is the “floor” discrete function of the argument  $v/c$ ;

$w = v - qc$  is the local velocity of each universe.

This is the function convenient for explaining, as for integer values of the argument  $0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$  it takes the required alternating values  $+1, +i, -1, -i, +1, +i, \dots$  corresponding to four types of universes alternating in space. Herewith local velocity  $w = v - qc$  (Fig. 1d,e,f) of each universe takes finite values only in the range  $0 \leq w < c$ .

But it's not hard to notice that Euler's formula takes the same values  $+1, +i, -1, -i, +1, +i, \dots$ , corresponding to the integer values  $0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$  of the

argument  $q$ . And the right side of Euler's formula allows determining the values of this function also for non-integer values of the argument  $q$ . Therefore, considering this circumstance, we can conclude that the function  $i^q$  takes the form

$$i^q = \cos(q\pi/2) + i \sin(q\pi/2) \quad (17) \text{ for both integer and non-integer values of the argument } q.$$

The ***new formula thus obtained has an important advantage - it introduces into the mathematics of complex and hyper complex numbers the mathematical operation of raising imaginary numbers to a non-integer degree, which has been absent in it until now.*** In astrophysics, it therefore allows us to assert that the integer values of the quantity in formula (17) correspond to mutually invisible parallel universes<sup>19</sup>, since they are relative to each other beyond the event horizon, and its non-integer values correspond to portals between such neighboring universes. And the invisible Multiverse containing these parallel universes has a spiral structure.

In other cases, described by other mathematical formulas containing imaginary numbers, other objects of the invisible world will correspond to them. Determining the specific nature of these objects will require further specialized research. The research will significantly define the content of future science.

#### 5. Conclusion

In the article ***by simple researches of transients in linear electric circuits***, carried out before publication of results of extremely difficult and expensive, but unsuccessful experiment OPERA, ***the physical reality of imaginary numbers is proved*** and, consequently, the fundamental principle of non-exceeding the speed of light in the generally recognized version of STR is refuted. And ***therefore, it is asserted that the version of STR stated in all physics textbooks used in the educational process of even the most prestigious universities is incorrect*** [16]-[72].

The existence of physically real imaginary numbers, discovered 500 years ago, shows that besides our visible world there is also a bigger, but invisible and unknown to us world. And cognition of physical essence of this invisible world will become the main problem of science of the future [73]-[96]. Moreover, this problem is now in relativistic physics astrophysics, overcoming the resistance of opponents, is already solved. And that's fine. One of the most authoritative philosophers of science of the 20th century Sir Karl Raimund Popper [97] wrote on this occasion that "...the struggle of opinions in scientific theories is inevitable and is a necessary condition for the development of science". I.e., the development of science is possible only as a result of identifying incorrect statements in existing theories and their subsequent refutations [98]-[104].

This article identifies such false statements and ***demonstrates how the incorrect (due to the use of the***

<sup>19</sup> Since, despite their boundlessness, they do not overlap anywhere, but they do dip slightly into each other in many places, forming portals.

*erroneous postulate of light speed non-exceedance) version of the STR can be corrected.*

### Acknowledgments

The author gratefully acknowledges the insights, comments, and assistance of Olga Ilyinichna Antonova

### References

1. Weisstein E.W. 2005. The CRC Concise Encyclopedia of Mathematics. 3-rd ed. CRS Press. Roca Raton. FL.
2. Beckmann P. 1976. A History of  $\pi$ . 3-rd edition. St. Martin's Press. NY.
3. Einstein A. 1920. Relativity: The Special and General Theory. H. Holt and Company. NY.
4. Bohm D. 2006. The Special Theory of Relativity. Routledge, Abingdon on Thames.
5. Penrose R. 2010. The Nature of Space and Time. Princeton University Press. Princeton.
6. Antonov A. A. 2008. Physical Reality of Resonance on Complex Frequencies. European Journal of Scientific Research. 21(4). 627-641. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
7. Antonov A. A. 2009. Resonance on Real and Complex Frequencies. European Journal of Scientific Research. 28(2). 193-204. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
8. Antonov A. A. 2010. New Interpretation of Resonance. International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology. 1(2). 1-12. [http://doi.org/10.17686/sced\\_rusnauka\\_2010-888](http://doi.org/10.17686/sced_rusnauka_2010-888)
9. Antonov A. A. 2010. Oscillation processes as a tool of physics cognition. American Journal of Scientific and Industrial Research. 1(2). 342-349. doi:10.5251/ajsir.2010.1.2.342.349
10. Antonov A. A. 2010. Solution of algebraic quadratic equations taking into account transitional processes in oscillation systems. General Mathematics Notes. 1(9). 11-16. [http://doi.org/10.17686/sced\\_rusnauka\\_2010-887](http://doi.org/10.17686/sced_rusnauka_2010-887)
11. Antonov A. A. 2013. Physical Reality of Complex Numbers. International Journal of Management, IT and Engineering. 3(4). 219-230. [http://doi.org/10.17686/sced\\_rusnauka\\_2013-898](http://doi.org/10.17686/sced_rusnauka_2013-898)
12. Antonov A.A. 2015. Principle of physical reality of imaginary and complex numbers in modern cosmology: the nature of dark matter and dark energy. Journal of the Russian physico-chemical society. 87(1). 328-355. (In Russian). [http://doi.org/10.17686/sced\\_rusnauka\\_2015-1119](http://doi.org/10.17686/sced_rusnauka_2015-1119)
13. Antonov A. A. 2016. Physical Reality and Nature of Imaginary, Complex and Hypercomplex Numbers. General Mathematics Notes. 35(2). 40-63. [http://www.geman.in/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/4\\_GMN-10932-V35N2.31895146.pdf](http://www.geman.in/yahoo_site_admin/assets/docs/4_GMN-10932-V35N2.31895146.pdf)
14. Antonov A.A. 2017. The physical reality and essence of imaginary numbers. Norwegian Journal of development of the International Science. 6. 50-63. <http://www.njd-iscience.com>
15. Antonov A. A. 2018. Physical Reality and Essence of Imaginary Numbers in Astrophysics: Dark Matter, Dark Energy, Dark Space. Natural Science. 10(1). 11-30.
16. Antonov A.A. 2021. The special theory of relativity stated in physics textbooks is incorrect. 77th International Scientific Conference of the Eurasian Scientific Association "Theoretical and practical issues of modern science". Moscow. ESA. 11-15. (In Russian)
17. Antonov A. A. 2021. Special theory of relativity presented in physics textbooks is wrong. Norwegian Journal of development of the International Science. 68(1). 3-7. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-68-3-7.
18. Antonov A. A. 2021. Version of the special theory of relativity that is studied in all physics textbooks is incorrect. Österreichisches Multiscience Journal. (Innsbruck, Austria). 43(1). 17-22. <http://osterr-science.com>
19. Antonov A. A. 2021. Generally accepted version of the special theory of relativity contained in physics textbooks is incorrect. The scientific heritage. (Budapest, Hungary). 73(2). 39-43. DOI: 19.24412/9215-0365-2021-73-2-39-43
20. Antonov A. A. 2021. Special theory of relativity, which is studied in physics textbooks, is incorrect. German International Journal of Modern Science. 16, 49-53. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-16-49-53
21. Antonov A. A. 2021. Special theory of relativity, which is studied in all physics textbooks, is incorrect. Danish Scientific Journal. 51(1). 31-35. <http://www.danish-journal.com>
22. Antonov A. A. 2021. Special theory of relativity taught in all physics textbooks is incorrect. Annali d'Italia. 22(1). 39-44. <https://www.anditalia.com/>
23. Antonov A. A. 2021. In all physics textbooks an erroneous version of special theory of relativity is given. International independent scientific journal. 31. 34-39. <http://www.iis-journal.com>
24. Antonov A. A. 2021. Special theory of relativity taught in physics textbooks is wrong. Journal of science. Lyon. 23. 47-52. <https://www.joslyon.com/>
25. Antonov A. A. 2021. All physics textbooks study incorrect special theory of relativity. Sciences of Europe. (Praha, Czech Republic). 79(1). 30-35. DOI: 10/24412/3162-2364-2021-79-30-35
26. Antonov A. A. 2021. Experimental proofs of infidelity of the version of the special theory of relativity studied in physics textbooks and the truth of its alternative version. 80th International Scientific Conference of the Eurasian Scientific Association "Development of science and education in the conditions of world instability". Moscow. ESA. 8-17. (In Russian) <https://esa-conference.ru/sborniki/?y=2021>
27. Antonov A. A. 2021. The incorrectness of the STR version presented in physics textbooks proven experimentally. Norwegian Journal of development of the International Science. 74(1). 3-7. DOI: 10.24412/2453-9875-2021-74-53-62.
28. Antonov A. A. 2021. The fallacy of the STR version studied in physics textbooks proved experimentally. Österreichisches Multiscience Journal (Innsbruck, Austria). 45(1). 17-26. <http://osterr-science.com>

29. Antonov A. A. 2021. Experimental evidences for the fallacy of the STR version in the physics textbooks. European Journal of Applied Sciences. Services for Science and Education. UK. 9(6). 349-364. DOI:10.14738/aivp.96.11304.
30. Antonov A. A. 2021. If the STR version in physics textbooks were true, we would never have heard the music of the piano and the bell ringing, there would be no television, no cellular telephony, no radar or GPS navigation, we would not even be aware of the existence of resonance and Ohm's law as interpreted by Steinmetz, and our children could not swing on the swings. The scientific heritage (Budapest, Hungary). 78(2). 41-50.  
DOI: 10.24412/9215-0365-2021-78-2-41-50
31. Antonov A. A. 2021. Experimental refutations of the STR version contained in physics textbooks and confirmations of the truth of its alternative version. German International Journal of Modern Science. 22. 52-61. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-22-52-61
32. Antonov A. A. 2021. The STR version in physics textbooks must be corrected, because if it were true, there would be no tsunamis or Indian summer in nature, we would never have heard piano music, engineers would not have been able to create television, cell phones, GPS trackers, and even children would not be able to swing on swings. Danish Scientific Journal. 54(1). 29-38. <http://www.danish-journal.com>
33. Antonov A. A. 2021. Experimental evidence of the incorrectness of the STR version studied in physics textbooks. Annali d'Italia. 25(1). 32-41. <https://www.anditalia.com/>
34. Antonov A. A. 2021. Experimental refutations of the generally accepted version of the SRT studied in physics textbooks. International independent scientific journal. 34(1). 23-32. <http://www.iis-journal.com>
35. Antonov A. A. 2021. Experimental refutations of the SRT version in the physics textbooks. Journal of science. Lyon. 26(1). 29-37. <https://www.joslyon.com/>
36. Antonov A. A. 2021. Experimental evidences for the fallacy of the STR version in physics textbooks. Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). 82(2). 19-28.  
DOI: 10.24412/3162-2364-2021-82-2-19-28
37. Antonov A. A. 2020. How to discover invisible universes. Norwegian Journal of development of the International Science. 42(1). 36-48. (In Russian) <http://www.njd-iscience.com>
38. Antonov A. A. 2020. How to See Invisible Universes. Journal of Modern Physics. 11(05), 593-607. DOI: 10.4236/jmp.2020.115039
39. Antonov A. A. 2020. Can invisible universes be seen? International independent scientific journal. 21(2). 51-60. <http://www.iis-journal.com>
40. Antonov A. A. 2020. Universes Being Invisible on Earth outside the Portals Are Visible in Portals. Natural Science. 12(8). 569-587. <https://doi.org/10.4236/ns.2020.128044>
41. Antonov A. A. 2021. Invisible universes can be seen in anomalous zones. International independent scientific journal. 23(1). 28-44. <http://www.iis-journal.com>
42. Antonov A. A. 2020. Invisible universes can be seen in anomalous zones. Danish Scientific Journal. 43(1). 9-24. <http://www.danish-journal.com>
43. Антонов А. А. 2023. Geophysical exploration of portals will provide new knowledge about space. Proceedings of the III International Scientific Conference. Philadelphia. USA. "The modern vector of the development of science". Philadelphia, USA. 85-101. DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.7709801>
44. Antonov A.A. 2023. Why geophysical researches of portals are necessary. Norwegian Journal of development of the International Science. 105. 83-96. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7779019>
45. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to discover invisible universes and to explore them. European Journal of Applied Sciences. Services for Sciences and education. UK. 11(2). 370-391
46. Antonov A.A. 2023. The necessity of geophysical researches of portals. The scientific heritage. (Budapest, Hungary). 110. 77-90.
47. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to prove the existence of invisible universes and to explore them. German International Journal of Modern Science. 53. 64-78
48. Antonov A.A. 2023. The relevance of geophysical researches of portals. Danish Scientific Journal. 70. 75-89.
49. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to prove the existence of hidden Multiverse and to research it. Annali d'Italia. 42. 71-85.
50. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to prove the existence of hidden Multiverse and to research it. International independent scientific journal. 49. 23-37.
51. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to discover invisible universes. Journal of science. Lyon. 41. 26-38.
52. Antonov A.A. 2023. Geophysical researches of portals will allow to prove the existence of hidden Multiverse and to research it. Sciences of Europe. 114. 76- 90
53. Antonov A. A. 2021. The version of STO stated in physics textbooks is incorrect, as it denies the existence of radio engineering. 82nd International Scientific Conference of the Eurasian Scientific Association "Scientific results in theory and practice". Moscow. ESA. 11-15. <https://esa-conference.ru/sborniki/?y=2021>
54. Antonov A.A. 2022. The version of STR stated in physics textbooks is refuted by the existence of radio engineering. Norwegian Journal of development of the International Science. 78(1). 63-67. DOI: 10.24412/3453-9875-2022-78-63-66.
55. Antonov A. A. 2022. The version of STR presented in physics textbooks is incorrect, since it follows from it that radio engineering should not exist. European Journal of Applied Sciences. Services for Science and Education. UK. 10(1). 440-445.  
DOI:<https://doi.org/10.14738/aivp.101.2022>
56. Antonov A. A. 2022. The existence of radio engineering refutes the physics textbooks' version of

- STR. The scientific heritage. (Budapest, Hungary). 83(1). 19-22.  
DOI: 10.24412/9215-0365-2022-83-1-19-22
57. Antonov A.A. 2022. The fundamental Ohm's law in radio engineering as interpreted by Steinmetz, which proves the physical reality on imaginary capacitive and inductive reactances, refuted the version of the STR presented in physics textbooks even before its creation. German International Journal of Modern Science. 26. 50-53.  
DOI: 10.24412/2701-8369-2022-26-50-63
58. Antonov A.A. 2022. The version of STR stated in physics textbooks is refuted by the existence of radio engineering. Danish Scientific Journal. 56. 56-59. <http://www.danish-journal.com>
59. Antonov A.A. 2022. The version of STR presented in physics textbooks is incorrect because it denies the possibility of the existence of Ohm's law as interpreted by Steinmetz and, consequently, the existence of radio engineering. Annali d'Italia 28(1), 43-47. <https://www.anditalia.com/>
60. Antonov A.A. 2022. If the physics textbook version of STR were true, then Ohm's law should not exist in nature, and therefore all radio engineering would not exist. International independent scientific journal. 36. 16-19. <http://www.iis-journal.com>
61. Antonov A.A. (2022). If the version of STR in physics textbooks were true, then there would be no radar, no television, no radio navigation, no telecommunication and many other things. Journal of science. Lyon. 28. 76-79. <https://www.joslyon.com/>
62. Antonov A.A. (2022). The version of STR set out in physics textbooks is incorrect because it states that Ohm's law as interpreted by Steinmetz does not really exist, and therefore radio engineering does not exist either. Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). 87(1). 54-57.  
DOI: 10.24412/3162-2364-2022-1-54-57
63. Antonov A.A. 2022. Why the physics textbooks teach an incorrect version of the special theory of relativity which denies the existence of radio- and electrical engineering. III international scientific conference "Challenges and problems of modern science." London. Great Britain. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.528/zenodo.7486814>
64. Antonov A. A. 2023. Why is the incorrect version of the special theory of relativity being studied in physics textbooks, refuted the existence of radio and electrical engineering even before its creation? The scientific heritage. (Budapest, Hungary) 105. 83-89.  
DOI: 10.5281/zenodo.7560145
65. Antonov A.A. 2023. Why is incorrect version of the special theory of relativity that denies the possibility of the existence of radio and electrical engineering being studied in textbooks of physics? Norwegian Journal of development of the International Science. 100. 27-33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7528512>
66. Antonov A.A. 2023. Why is an incorrect version of the special theory of relativity that denies the possibility of the existence radio and electrical engineering being studied in physics textbooks? German International Journal of Modern Science. 48. 23-29.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7541137>
67. Antonov A.A. 2023. Who needs the incorrect version of special relativity taught in physics textbooks despite all its experimental refutations? Annali d'Italia. 39, 64-70.  
DOI: 10.5281/zenodo.7568916
68. Antonov A.A. 2023. Why is incorrect version of the special theory of relativity, refuted by the existence of radio and electrical engineering, is still studies in all university physics textbooks? Danish Scientific Journal. 69. 66-72. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7692053>
69. Antonov A.A. 2023. Why is incorrect version of the special relativity still being studied in physics textbooks, which denies Ohm's law for alternating current used worldwide by millions of radio and electrical engineers? International independent scientific journal. 46. 38-44.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7525751>
70. Antonov A.A. 2023. Why is the generally accepted version of STR, which denies the possibility of the existence of radio engineering and electrical engineering, tsunamis and bell ringing, the physical phenomenon of resonance and Ohm's physical law for alternating current, music created by the piano and even swing swings on the playground, nevertheless is still considered correct and studied in physics textbooks? Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). 112. 44-50.
71. Antonov A.A. 2023. Why is the incorrect version of the special theory of relativity still being studied in physics textbooks, despite all its experimental refutations. European Journal of Applied Sciences. Services for Science and Education. UK. 11(2). 61-71.  
DOI: <https://doi.org/10.14738/aivp.112.14128>
72. Antonov A.A. 2023. Why the incorrect version of the special theory of relativity, which denies the possibility of the existence of radio engineering and electrical engineering, has not yet been refuted. Journal of science. Lyon 40. 19-25. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7704392>
73. Antonov A. A. 2021. Antimatter, Anti-Space, Anti-Time. Journal of Modern Physics, 12(05), 646-660. DOI: 10.4236/jmp.2021.125042.
74. Antonov A. A. 2021. Antimatter, anti-space, anti-time. 75th International Conference of the Eurasian Scientific Association "Strategies of Sustainable Development of World Science". Moscow. ESA. 1-4. DOI: 10.5281/zenodo.4926585
75. Antonov A. A. 2021. From the alternative version of the SRT it follows that there is not only antimatter, but also anti-space and anti-time. Norwegian Journal of Development of the International Science. 62(1). 41-51. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-62-1-41-51
76. Antonov A. A. 2021. Do antimatter, anti-time and anti-space exist in nature. Annali d'Italia. 20(1). 14-24. <https://www.anditalia.com/>
77. Antonov A. A. 2021. Antipodes in space. German International Journal of Modern Science. 11(1). 15-25. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-11-1-15-25
78. Antonov A. A. 2021. There is not only antimatter, but also anti-space and anti-time. Journal of science. Lyon. 21. 22-30. <https://www.joslyon.com/>

79. Antonov A. A. 2021. Where are antimatter, anti-space and anti-time? *Österreichisches Multiscience Journal*. (Innsbruck, Austria). 40(1). 34-44. <http://osterr-science.com>
80. Antonov A. A. 2021. Do antmatter, anti-time and anti-space exist in nature? *Danish Scientific Journal*. 48(1). 64-74. <http://www.danish-journal.com>
81. Antonov A. A. 2021. Antipodes in space. *International independent scientific journal*. 28. 50-61. <http://www.iis-journal.com>
82. Antonov A. A. 2021. How alternative version of SRT explains the existence of antimatter, anti-space and anti-time? *The scientific heritage* (Budapest, Hungary). 67(1). 11-21.  
DOI: 10.24412/9215-0365-2021-67-1-11-21
83. Antonov A. A. 2011. Realisation of Human Super-Intelligence (Developmental Learning). *WSEAS transactions on advances in engineering education*. 4(8): 109-119.  
<http://www.wseas.us/e-library/transactions/education/2011/55-269.pdf>
84. Antonov A. A. 2011. Human Super Intelligence. *International Journal of Emerging Sciences*. 1(2): 164-173.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/c8cb/b9e7202fcc15e89bb62ecf31b4c3af7d8f05.pdf>
85. Antonov A. A. 2010. Human-computer superintelligence. *American Journal of Scientific and Industrial Research*. 1(2): 96-104. doi:10.5251/ajcir.2010.1.2.96.104
86. Antonov A. A. 2011. From Artificial Intelligence to Human Super Intelligence. *International Journal of Computer Information Systems*. 2(6): 1-6.  
[https://www.researchgate.net/publication/267992073\\_From\\_Artificial\\_Intelligence\\_to\\_Human\\_Super-Intelligence](https://www.researchgate.net/publication/267992073_From_Artificial_Intelligence_to_Human_Super-Intelligence)
87. Antonov A. A. 2011. Realisation of Human Super-Intelligence (Developmental Learning). *WSEAS transactions on advances in engineering education*. 4(8): 109-119.  
<http://www.wseas.us/e-library/transactions/education/2011/55-269.pdf>
88. Antonov A. A. 2011. Human Super Intelligence. *International Journal of Emerging Sciences*. 1(2): 164-173. <https://pdfs.semanticscholar.org/c8cb/b9e7202fcc15e89bb62ecf31b4c3af7d8f05.pdf>
89. Antonov A. A. 2010. Human-computer superintelligence. *American Journal of Scientific and Industrial Research*. 1(2): 96-104. doi:10.5251/ajcir.2010.1.2.96.104
90. Antonov A. A. 2021. How to turn human civilisation into a supercivilisation. 72 International Scientific Conference of the Eurasian Scientific Association "Modern concepts of scientific research". Moscow. ESA. 3-15. (Im Russian) <https://esa-conference.ru/sborniki/?y=2021>
91. Antonov A. A. 2021. Human super civilization. *Österreichisches Multiscience Journal*. (Innsbruck, Austria). 38(1). 34-46. <http://osterr-science.com>
92. Antonov A. A. 2021. Emergence of human super civilization. *International independent scientific journal*. 25(1). 30-43. <http://www.iis-journal.com>
93. Antonov A. A. 2021. Formation of human supercivilization. *The scientific heritage* (Budapest, Hungary). 63(3) 39-51.
94. Antonov A. A. 2021. Human civilization will soon become a super civilization. *German International Journal of Modern Science*. 6(1). 15-28.  
DOI: 10.24412/2701-8369-2021-6-1-15-28
95. Antonov A. A. 2021. How to create a human super civilization. *Sciences of Europe*. (Praha, Czech Republic). 66(2). 38-50. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-66-2-38-50
96. Antonov A. A. 2021. Creation of human super civilization. *Danish Scientific Journal*. 45(1). 44-57. <http://www.danish-journal.com>
97. Popper K. R. 2002. *Conjectures and Refutations. The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge. London.
98. Antonov A. A. 2023. The Corrected Version of the Special Theory of Relativity. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 118. 40-49.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10009500>
99. Antonov A. A. 2023. The Corrected Version of the Special Theory of Relativity. *European Journal of Applied Sciences. Services for Science and Education*. UK. 11(5). 68-83.
100. Antonov A. A. 2023. The Corrected Version of the Special Theory of Relativity. *The scientific heritage*. (Budapest, Hungary). 123. 72-81,
101. Antonov A. A. 2023. Alternative Version of the Special Theory of Relativity. *Sciences of Europe*. (Praha, Czech Republic). 128. 62-71.
102. Antonov A. A. 2023. Special Theory of Relativity. *German International Journal of Modern Science*. 67. 64-73. DOI: 10.5281/zenodo.10966458
103. Antonov A. A. 2023. Antonov A. A. (2023). Corrected Version of the Special Theory of Relativity. *Danish Scientific Journal*. 77. 88-97. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10054677>
104. Antonov A. A. 2023. Alternative Version of the Special Theory of Relativity. *International independent scientific journal*. 57. 18-103. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10353074>

## ODAY OF THE RESULTS OF RESEARCH ON THE INTERACTION OF LASER RADIATION WITH EXPLOSIVES

**Skobenko O.V.,**

*Candidate of Technical Science, Associate Professor,  
Dnipro University of Technology*

**Kulivar V.V.**

*PhD, Associate Professor,  
Dnipro University of Technology*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573849](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573849)

### ОГДЯД РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИБУХОВИМИ РЕЧОВИНАМИ

**Скобенко О.В.**

*Кандидат технічних наук, доцент,*

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

**Кулівар В.В.**

*PhD, доцент,*

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

#### **Abstract**

The paper presents the main scientific and practical results obtained by the scientists of the Dnipro Polytechnic Institute in 1992-2022. The basis of the proposed physical and mathematical model, taking into account quantum mechanical laws, is the discovered new mechanism of ignition of metal azides by a laser monopulse, due to the structural destabilization of the crystal lattice when heated by radiation of optical microinhomogeneities. Attention is focused on the developed new methods for measuring the sensitivity of explosives and the parameters of the mechanical action of explosion products. The dependence of the sensitivity of explosive compounds on the mode of formation in the volume of the material and the conditions of unloading the samples of the substance was experimentally revealed. Light-sensitive explosive composites have been developed, the sensitivity of which to the action of a laser monopulse is an order of magnitude higher than that of heavy metal azides. The scientific basis for the use of the laser initiation method has been developed to solve the problems of obtaining profiled detonation waves, explosion welding, metal hardening, creation of optical systems for initiating explosive charges, testing material strength and stability of structures subjected to mechanical loading pulses. To improve the safety of blasting operations, experimental samples of the optical initiation system and new means of detonating explosives were created.

#### **Анотація**

В роботі наведено головні науково-практичні результати, одержані науковцями Дніпровської політехніки за 1992-2022 роки. В основі запропонованої фізико-математичної моделі з урахуванням квантово-механічних закономірностей лежить виявлений новий механізм запалювання лазерним моноімпульсом азидів металів, обумовлений структурною дестабілізацією кристалічної решітки при нагріванні випромінюванням оптичних мікронеоднорідностей. Акцентується увага на розроблених нових методиках вимірювання чутливості вибухових речовин і параметрів механічної дії продуктів вибуху. Експериментально виявлено залежність чутливості вибухових сполук від режиму освітлення в об'ємі матеріалу та умов розвантаження зразків речовини. Розроблено світлочутливі вибухові композити, чутливість яких до дії лазерного моноімпульсу на порядок перебільшує чутливість азидів важких металів. Розроблені наукові основи використання лазерного метода ініціювання для вирішення проблем одержання профільованих детонаційних хвиль, зварювання вибухом, зміцнення металів, створення оптичних систем ініціювання вибухових зарядів, випробовування міцності матеріалу та стійкості конструкцій, що сприймають дію механічних імпульсів навантаження. Для підвищення безпеки проведення вибухових робіт створені експериментальні зразки оптичної системи ініціювання і нові засоби підривання вибухових речовин.

**Keywords:** explosive, optical initiation system, laser pulse, detonation.

**Ключові слова:** вибухова речовина, оптична система ініціювання, лазерний імпульс, детонація

#### **1. ВСТУП**

Історія досліджень лазерного ініціювання вибухових речовин лазерним випромінюванням починається у шістдесятіх роках минулого століття [1-7]. В Україні дослідження у цьому напрямку виконувалися з початку сімдесятих років в Інституті технічної механіки АН УРСР [8-11], а з 1992 р. – у

Дніпропетровському гірничому інституті (зараз Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»). Вивчення закономірностей фізико-хімічних процесів, що протікають при лазерній дії на вибухові речовини (ВР), синтез нових світлочутливих вибухових композитів, розробка нових засо-

бів підривання зарядів ВР та нової технології виконання підривних робіт із забезпеченням умов високої безпеки та високої точності набуває усе більшої актуальності у розвинених країнах світу [12, 13]. Інтенсифікація досліджень у цьому напрямку є обумовленою як чисто науковим інтересом до явища збудження швидкої хімічної реакції у вибухових речовинах, так і практичними запитами ряду галузей промисловості. Використання лазерного випромінювання з метою дослідження процесів запалювання ВР дозволяє проводити експерименти при суворо контролюваних параметрах, стежити за їх розвитком у часі при різноманітних зовнішніх умовах. На відміну від традиційних видів фізико-механічних дій на ВР, що використовуються (удар, тертя, укол, вогонь і т. інш.), параметри лазерної дії можна вимірюти з великою точністю, а також змінювати їх у широкому інтервалі. Так, наприклад, при використанні імпульсних оптических квантових генераторів (ОКГ) тривалість лазерного імпульсу можна варіювати в межах від  $10^{-3}$  с до  $10^{-9}$  с. Реалізувати імпульси дії, які коротші за  $10^{-6}$  с іншими способами неможливо, а тому метод лазерного запалювання відкриває нові можливості для більш повного дослідження механізму ініціювання хімічної реакції у ВР.

Практичним використанням лазерного запалювання є створення перших зразків оптичної системи ініціювання зарядів ВР – ОПСІН [14-18], робота яких здійснюється за рахунок передачі лазерного випромінювання світловолоконним кабелем до виконавчих елементів – засобів підривання, або крізь повітряну атмосферу. Такі системи мають велику стійкість до електромагнітних наведень і можуть використовуватися при проведенні вибухових робіт у будівництві, видобуванні корисних копалин у відкритій та підземній розробках, машинобудуванні тощо [19-23]. При практичному використанні енергії вибуху в процесах зварювання, різання, штампування та зміцнення металів, пресування порошків, детонаційного та ударно-хвильового синтезу надтвердих матеріалів і т. інш. виникає потреба у формуванні заданих профілів детонаційних та ударних хвиль. Технічні труднощі, що мають місце при вирішенні подібних задач, пов’язані з обмеженім арсеналом засобів ініціювання, серед яких найбільш поширеними є капсулі-детонатори, електродетонатори, детонуючі шнурі. Недоліком переважованих засобів є те, що при їх використанні детонація в заряді ВР починається в місцях розміщення цих засобів. Одночасне збудження детонаційної хвилі (а, отже, і ударної хвилі в матеріалі) на великій площині чи поверхні складної форми до недавнього часу було або не здійсненим, або, у кращому випадку, пов’язане з великими практичними труднощами [24-29].

Велику актуальність набувають останнім часом дослідження міцності та стійкості конструкцій, які сприймають навантаження ударного та вибухового типу [26-30]. Їх розвиток обумовлений запитами ряду галузей нової техніки, суднобудування, енергетичного машинобудування, промислового будівництва. Процеси нестационарної взаємодії

елементів конструкцій з навколошнім середовищем відносяться до найбільш складних наукових і технічних задач. Швидка зміна параметрів у часі, наявність хвильових фронтів, виникнення пластичних зон у матеріалі – усе це ускладнює проведення розрахунків і змушує звертатися до розробки експериментальних методів досліджень, на основі яких можна одержувати необхідні дані про поведінку тих чи інших об’єктів.

## 2. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПАЛЮВАННЯ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ІМПУЛЬСОМ СВІТЛА

Вивчення процесу запалювання ВР імпульсними світловими потоками розпочалось у 60-ті роки. Використовувалися джерела світла суцільного спектра, тривалість імпульсів яких знаходилася в межах  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  с. Вивчалися азиди срібла та свинцю, тен, стифнат свинцю, та інші вибухові речовини. З метою з’ясування механізму запалювання були виміряні спектри ряду ВР. Показано, що більшість із них прозорі в близькій інфрачервоній та видимій ділянках спектра, і дуже поглинають ультрафіолетове випромінювання. Дані вимірювання спектральних коефіцієнтів поглинання дозволили запропонувати тепловий механізм запалювання, згідно якому світло ультрафіолетової ділянки спектра поглинається в тонкому поверхневому шарі ВР, викликає його нагрівання, яке достатнє для збудження хімічної реакції. Результати експериментів добре узгоджуються з тепловою теорією запалювання ВР.

З появою оптических квантових генераторів (ОКГ) почалося дослідження процесу запалювання імпульсним лазерним випромінюванням. Більшість експериментів проведено з використуванням наносекундних ( $\tau=20$ – $50$  нс), мікросекундних ( $\tau=0,5$ – $0,7$  мкс) та мілісекундних імпульсів неодимового ( $\lambda=1,06$  мкм) і рубінового ( $\lambda=0,69$  мкм) лазерів. Не дивлячись на те, що більшість досліджених ВР слабко поглинають випромінювання цих ОКГ, одержані в ряді робіт значення критичної густини енергії виявилися порівняними або меншими від відповідних величин для джерел суцільного спектра. Чутливість бризантних ВР, як слід і було очікувати, нижча чутливості ініціюючих. Крім цього, чутливість ВР до дії рубінового та неодимового лазерів у межах точності експериментів співпадають, а вплив модової структури випромінювання на чутливість незначний.

Особливість ініціювання вторинних ВР полягає в тому, що процесу ініціювання сприяє наявність поблизу поверхні ВР скляної пластини, яка утруднює розлітання продуктів розпаду речовини, іншими словами, газодинамічний розліт продуктів розпаду є потужним фактором гасіння процесу запалювання. Інша ситуація спостерігається при ініціюванні ВР, що знаходиться під тиском. При притисненні зразків ВР до оптичного скла чутливість первинних та вторинних вибухових речовин зростає. До того ж, при  $P_{\text{зов}} \sim 10^9$  Па чутливість вторинних ВР стає порівняною з чутливістю не навантажені

жених ініціюючих ВР [31]. У випадку відмови вибуху не спостерігається яких-небудь слідів дії лазерного імпульсу на матеріал. Крім цього, для азидів свинцю та срібла було виявлено гістерезис залежності  $E_{kp}$  ( $P_{zob}$ ), який полягає в тому, що при спаданні тиску і подальшій лазерній дії величина  $E_{kp}$  залишається на рівні, що відповідає максимальному значенню тиску. Для інших ВР гістерезиса немає. При спаданні тиску чутливість відновлюється. Даний ефект не пояснюється класичною теорією запалювання.

У ряді робіт зроблені спроби дослідити фактори, які впливають на чутливість ВР до дії лазерного імпульсу. Є.І. Олександров показав, що при нагріванні азиду свинцю до  $150^{\circ}\text{C}$  чутливість незначно збільшується при дії мілісекундних імпульсів і залишається незмінною при дії гіантських імпульсів ( $\tau \sim 30$  нс). Інша спроба зміни чутливості пов'язана із уведенням у зразки ВР поглинаючих добавок у вигляді дрібнодисперсних порошків металів, окислів металів, сажі. Експерименти показали, що чутливість бризантних ВР підвищується, якщо реакція взаємодії парів домішок з ВР є екзотермічною. Уведення домішок в ініціюючі ВР не вносять помітного внеску в процес ініціювання, який у даному випадку визначається поведінкою самої ВР [32-34].

На основі одержаних експериментальних результатів деякими авторами було запропоновано декілька механізмів лазерного запалювання ВР. Проведений ними аналіз цих механізмів, зроблені оцінки показали, що ініціювання ВР за рахунок світлового удару, вимушеного розсіювання Мандельштама–Брилюена неможливе, тому що при освітленні речовини виникає тиск на декілька порядків менший від необхідного. Ініціювання шляхом фотохімічного розкладу не може здійснитися у зв'язку з недостатніми для цього енергіями квантів. Оцінка розігріву поверхневого шару ВР показала, що при дії на азид свинцю лазерного імпульсу з критичною густиною енергії температура поверхні підвищується на  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ , а тому цей фактор не може бути причиною підриву [35]. Щодо вторинних ВР, розігрів може рівнятися декільком тисячам градусів, однак, газодинамічне розлітання випареної речовини не дозволяє досягнути цього. Інші механізми також не відповідають експериментальним даним.

Найбільш обґрунтованою гіпотезою запалювання ВР імпульсом ОКГ, запропонованою Ю.Ф. Карабановим, Є.І. Олександровим, є гіпотеза, згідно з якою запалювання виникає в осередках, які виникають при поглинанні випромінювання оптичними мікронеоднорідностями. Такими осередками можуть бути структурні неоднорідності речовини (вакансії, нагромадження дислокацій та інш.), чужорідні включення, хімічні домішки. Використовуючи це припущення, вдається довести можливість ініціювання хімічної реакції вторинних ВР, проте залишається не виясненою залежність критичної густини енергії запалювання від зовнішнього тиску. Щодо ініціюючих ВР, то гіпотеза осередкового запалювання недостатня для пояснення явища запалювання, тому що температура розігріву включень

нижча від необхідної [35].

У загальнюючі результахи експериментальних досліджень, теоретичних розрахунків та оцінок, зроблені такі висновки: 1 – чутливість ВР підвищується при збільшенні швидкості введення в речовину лазерної енергії і різко збільшується при зовнішньому їх навантаженні або обмеженні руху газової фази; 2 – підвищення початкової температури ВР та уведення поглинаючих добавок не сприяє підвищенню чутливості ініціюючих ВР при дії наносекундними лазерними імпульсами; 4 – вибухові речовини є слабко поглинаючими матеріалами для випромінювання з довжиною хвиль 0,69, 1,06 мкм; 5 – процес ініціювання суттєво залежить від умов освітлення об'єму речовини; 6 – запропоновані механізми запалювання ВР не відповідають експериментальним даним; для ініціювання ВР найбільш доцільно використовувати ОКГ на неодимовому склі, так як енергетичні характеристики таких лазерів вищі від рубінових.

Відносно практичного використання методу лазерного ініціювання ВР, то проведений нами аналіз численних патентів показав, що роботи у даному напрямку пов'язані, в основному, із розробкою оптичних систем ініціювання піротехнічних засобів. Однак ВР, що використовувалися, мають низьку чутливість, а тому реалізація ОПСН на практиці є не доцільною, а у деяких випадках взагалі неможливою.

### **3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ДІЇ НА ВИБУХОВІ РЕЧОВИНИ.**

Типовим ефектом дії імпульсу лазерного випромінювання на прозорі речовини є руйнування матеріалу шляхом створення тріщин та каверн. Навіть у дуже чистих матеріалах оптичні мікронеоднорідності суттєво впливають на взаємодію випромінювання з речовиною, тому що вони є осередками мікроруйнувань.

Поглинання лазерного випромінювання викликає нагрівання мікронеоднорідностей, а також навколошнього середовища за рахунок звичайної тепlopровідності, при цьому, нагрівання може супроводжуватися фазовим переходом плавлення матеріалів включення та навколошнього середовища. Оцінки показують [31, 36-39], що у першому наближенні можна зневажити втратами тепла на фазовий перехід. Для бризантних ВР, запалювання яких залежить від наявності вільної поверхні, найбільш суттєвим є урахування явища створення за рахунок термонапруження мікротріщин. Нагрівання до температури  $\sim 100^{\circ}\text{C}$  викликає появу напружень, які порівнюються з міцністями характеристиками речовини.

Розкривання мікротріщини здійснюється за суттєво менший час ( $\sim 1$  нс), ніж тривалість лазерної дії ( $\sim 30$  нс). А тому з аналізу процесу лазерного ініціювання бризантних ВР слід зробити висновок, що утворення мікротріщини викликає випаровування ВР або матеріалу включення, що неминуче приводить до зриву запалювання. Ці міркування до-

зволили запропонувати таку модель лазерного запалювання близантних ВР: в результаті лазерної дії розігриваються мікронеоднорідності, теплообмін яких із навколошньою речовиною викликає запалювання ВР, якщо до цього моменту не утворилися мікротріщини [40-45]. Іншими словами, тріщиноутворення розглядається як фактор гасіння процесу запалювання.

Математична задача зводиться до наступного. В безмежній речовині, яка здатна до екзотермічного перетворення, знаходиться інертне сферичне включення радіусом  $r_0$ , яке поглинає лазерне випромінювання. Вважається, що матриця прозора для випромінювання лазера. Величини, що характеризують теплофізичні та механічні властивості речовини приймаються незмінними. Система рівнянь складається з рівняння теплопровідності для включення з тепловиділенням, що визначається перерізом поглинання оптичної мікронеоднорідності та рівняння теплопровідності для матриці, яке враховує хімічне тепловиділення по закону Арреніуса нульового порядку. Для вирішення задачі визначення термонапруженів розглядається пружно-пластичне середовище. Унаслідок центральної симетрії головні напрямки напружень не змінюються, а компоненти направляючих тензорів напружень та деформацій є сталими. А тому використовується теорія малих пружно-пластичних деформацій. При розрахунках напруженого стану час розглядається як параметр, таким чином використовується квазистатичне наближення. Рішення системи рівнянь, яка включає рівняння рівноваги, закон Гука, умову суцільноти речовини шукається в напруженнях. Припускається, що між включенням та матрицею існує механічне зчеплення, а тому виконується умова неперервності радіальних переміщень та напружень. Залежність між інтенсивностями напружень та деформацій є узагальненням діаграми розтягання і має той же вигляд. У даній постановці задачі одержано аналітичне рішення, яке дозволяє розраховувати термонапруження як у наближенні теорії пружності, так і теорії пластичності [33, 42, 43].

Для визначення залежності перерізу поглинання від радіуса включення запропоновано підхід, який базується на теорії Mi. Розгляне частинкою випромінювання дається у вигляді суперпозиції полів мультиполів, індуцьованих падаючою хвилею на частинці. Математично це виражається збіжним рядом комплексних осцилюючих функцій, які залежать від параметра дифракції  $x=2\pi r_0/\lambda$  та комплексного показника заломлення  $m=n-ik$ . Залежність перерізу поглинання від  $x$  та  $m$  закладена в спеціальних функціях – коефіцієнтах  $M_i$ , які знаходяться за допомогою функцій Рікаті–Бесселя рекурентними спiввiдношеннями. Для визначення коефiцiєнтiв  $M_i$  створена комп'ютерна програма розрахункiв [37].

Вирішена задача лазерного запалювання вторинних вибухових речовин на прикладi тена, який умiщує вуглецевi включення. Критерiй запалювання Мержанова, згiдно з яким запалювання виникає в той момент, коли швидкiсть тепlopriходу вiд

зовнiшнього джерела (включення) i швидкiсть тепловидiлення вiд хiмiчної реакцiї зriвнюються, дiповnено вимогою, щоб максимальнi розтягувальнi напруження не перевищували межу мiцностi речовини [33, 34]:

$$-\lambda(r_0)^2 \cdot (dT/dr) \leq k_0 Q \\ \int_{r_0}^{\infty} \exp(-E_a / RT(x,t)) x^2 dx, \quad \sigma_{max} \leq \sigma_s,$$

де  $\lambda$  – коефiцiєнт теплопровiдностi,  $k$ ,  $Q$ ,  $E_a$  – предекспонент, калорiйнiсть та енергiя активацiї вiдповiдно. Враховуючи, що тривалiсть лазерного iмпульсу набагато перевищує характерну тривалiсть установлення температури включення  $(r_0)^2 / \alpha$  ( $\alpha$  - коефiцiєнт температуропровiдностi), система рiвнянь теплопровiдностi замiнюється одним рiвнянням для середовища з граничною умовою на поверхнi частинки, яка вiдображає закон збереження енергiї. Знайдене за допомогою iнтегрального методу теплового балансу наближене рiшення рiвняння теплопровiдностi використовується для одержання мiцностi рiвняння – залежностi густини лазерної енергiї, при якiй утворюються мiкротрiщини, вiд радiуса включення  $E_s(r_0)$ . Критична енергiя iнiцiювання ВР  $E_{kp}$  вiдповiдає точцi перетину кривої  $E_s(r_0)$  та кривої  $E_T(r_0)$ , яка вiдображає залежнiсть густини енергiї запалювання вiд розмiру включення (одержана за допомогою класичної теорiї запалювання). Показано, що при збiльшеннi зовнiшнього тиску  $P_{zov}$  густина енергiї запалювання знижується. Величина  $E_{kp}$  не залежить вiд початкової температури при дiї коротким лазерним iмпульсом (~50 нс) i знижується при iнiцiюваннi лазерним iмпульсом iз тривалiстю ~1 мкс. При зовнiшньому тиску, який перевершує критичну величину  $P_{kp}$ , залежнiсть  $E_s(P_{zov})$  для rubiнового лазера виходить на стацiонарне значення. Це пiдтверджується експериментально [32].

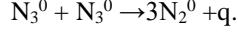
Результати розрахункiв показують, що при вiдсутностi зовнiшнього тиску визначну роль в iнiцiюваннi ВР вiдiграють включення малих розmiriv (субмiкроннi частинки). Однак нагрiвання таких частинок зriвнюється з нагрiванням кристала за рахунок власного поглинання, що вede до однорiдного розiгрiвання поверхневого шару речовини, його вiпаровування та розлiтання. Ефект вiпливу газодинамiчного руху на запалювання ВР вивченено при розглядi задачi iнiцiювання хiмiчної реакцiї в зразках тену при рiзних значеннях коефiцiєнта ослаблення випromiнювання та тривалостi дiї. Вирiшуються система рiвнянь газової динамiки, яка доповнена рiвнянням хiмiчної кiнетики [32]. Використовується напiвемпiричне рiвняння стану, що єдиним способом описує властивостi тену та продуктiв розпаду. З результатiв розрахунку випливає, що вiпаровування та розлiтання речовини iстотно гасять процес розвитку хiмiчної реакцiї. Основними факторами, що знижують втрату лазерної енергiї, є збiльшення глибини ослаблення випromiнювання та зменшення тривалостi лазерного iмпульсу.

За експериментальними даними iнiцiюючi свiтлочутливi вибуховi композити (також як i штатнi

ініціюючі ВР) характеризуються великою швидкістю переходу від горіння до детонації, а наявність вільної поверхні слабко впливає на процес запалювання [49-52]. А тому утворення мікротріщини поблизу поглинаючого випромінювання включення не є фактором гасіння процесу запалювання. Іншими словами, теорія запалювання близантних ВР не може бути застосована до ініціюючих ВР [48].

Як показали наші розрахунки, температура розігрівання міковіклюень при дії лазерного імпульсу критичної інтенсивності значно нижча необхідної для запалювання, однак, деформації складають величину, при яких переміщення поблизу включень зрівнюються з відстанями між вузлами кристалічної решітки [42, 43].

Як приклад розглядається найпростіша ініціююча ВР – азид срібла. Відповідно до нашої гіпотези, при лазерному нагріванні включень срібла виникає деформація кристалічної решітки, в результаті чого протікає реакція  $N_3^- \rightarrow N_3^0 + e$ . Утворення радикалів  $N_3^0$  приводить до їх взаємодії, а отже, до виділення енергії вибухового перетворення  $q$ .



Для підтвердження запропонованого механізму ініціювання IBР розроблена квантово-механічна модель стійкості кристалічної решітки [42, 43]. Модель базується на використанні рівняння Шредінгера для задачі про стан електрона в полі двох кулонівських центрів, формалізм якої вперше розвинуто в роботах Г.О. Яркового та В.П. Морозова, і полягає в тому, що з одержаних звичайних диференціальних рівнянь виділяються скорочені рівняння, названі модельними, які вирішуються аналітичними методами. Для одержання рішення початкових рівнянь використовується функція Гріна, модельні рішення для якої є першим наближенням. Розрахунки електронних термів молекул  $H_2$  та  $H_2^+$  показали, що модельні хвильові функції дозволяють одержувати результати, які кількісно і якісно узгоджуються з експериментальними даними. Для розрахунку більш складних молекул нами зроблена спроба удосконалити модель шляхом урахування екранування ядерних потенціалів зв'язаними електронами та їх взаємодії між собою. Апробація моделі, яка була проведена при розрахунках електронних термів молекул  $CO$ ,  $N_2^-$ ,  $O_2^-$ ,  $Li_2^-$ ,  $HCl$  та інш., підтвердила правильність вибраного підходу [53-55]. Поряд із цим вирішена задача про вплив зовнішнього кулонівського центру на електронний терм молекули. Крім цього, було доказано, що рівняння Шредінгера, яке описує стан електрона у полі  $N^-$  – фінітних лінійно розташованих центрів зводиться до задачі про стан електрона в полі двох кулонівських центрів. Це дозволило визначити стійкість групи  $N_3^-$  при деформації кристалічної решітки азиду срібла. Враховувався вплив на електронний терм кулонівських центрів найближчого оточення: інших груп  $N_3^-$  та іонів  $Ag^+$ . Розрахунки показали, що деформація решітки  $AgN$  приводить до розпаду  $N_3^-$  (крива енергії електронного терму перестає мати мінімум). Також установлено, що при деформуванні решітки процесу іонізації групи  $N_3^-$  у значній мірі сприяє наявність дефекту – іона  $Ag^+$  у міжузельному просторі [42, 43].

Скориставшись результатами одержаними у роботах М.О. Ілюшина із співавторами [56, 57], узагальнених результатів теоретичних та експериментальних досліджень, були визначені наступні напрямки пошуку вибухових речовин та шляхи створення на їх основі світлоочутливих вибухових композитів: 1 – вибухові речовини повинні бути міцними, мати велику швидкість переходу від горіння до детонації; 2 – для зменшення впливу вільної поверхні на деформаційну релаксацію кристалів та зниження ролі газодинамічного розвантаження необхідно збільшити прозорість зразків ВР та знизити пористість матеріалу; 3 – при створенні вибухових сполук та покриття на їх основі повинні використовуватися прозорі для лазерного випромінювання речовини; 4 – для ініціювання ВР доцільно використовувати імпульси малої тривалості (працювати в режимі модуляції добротності резонатора лазера).

#### 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Енергія моноімпульсного випромінювання досягла  $>100$  Дж. Використовувався і експериментальний зразок ОПСІН [16, 58, 59], конструкція й експлуатаційні характеристики окремих блоків якого удосконалювалася за результатами його експлуатації [60-63]. Головні технічні характеристики надано у [64].

Експериментальний пристрій (рис. 1, схема на рис. 2) створений на базі твердотільного оптичного квантового генератору CFR 200–10 Pulsed Nd:YAG Laser System фірми Big Sky Laser (США). Довжина хвилі випромінювання 1,064 мкм, вертикальна поляризація, максимальна енергія в імпульсі 200 мДж. Лазер працює в імпульсно-періодичному режимі з регулюванням у діапазоні  $1,7 \cdot 10^{-2}$ –10 Гц. Частота спалаху лампи накачки постійна і дорівнює 10 Гц. Поява першого модульованого імпульсу здійснюється після генерації 20 імпульсів, вихід на стабільний режим роботи лазера відбувається після десяти модульованих імпульсів. Діаметр вихідного пучка 6 мм, розбіжність при енергії в імпульсі, що складає 85,5% від максимальної величини, дорівнює 2,8 мрад.

На рис. 1 та рис. 2 цифрою 1 позначено лазер (Nd:YAG). Лазерний діод 2 і діафрагма 15 використовувалися для юстування оптичного тракту. За допомогою призми 4 лазерний промінь направляється на вибухову речовину 11, що була нанесена як покриття діаметром 5 мм на скляну пластину 10. Для дослідження виготовляється зразок із вибухової речовини (СВР), чутливої до лазерного випромінювання, та скляної пластини 10. Зразок закріплюється до алюмінієвої пластини 9 завтовшки 8 мм, що мала отвір діаметром 8 мм для проходження лазерного випромінювання. Лінза 7 використовувалася для регулювання необхідної величини діаметра лазерного пучка. Фотодіод 12 реєстрував запалювання СВР. Світлофільтри 5 використовувалися для вимірювань енергії лазерного випромінювання, що падає на зразок, при фіксованій відстані від СВР до лінзи. Для визначення цієї енергії застосовувався вимірювач енергії імпульсного лазерного випромінювання ИЭЛ-300, що має вимірювальну головку прохідного типу 6.

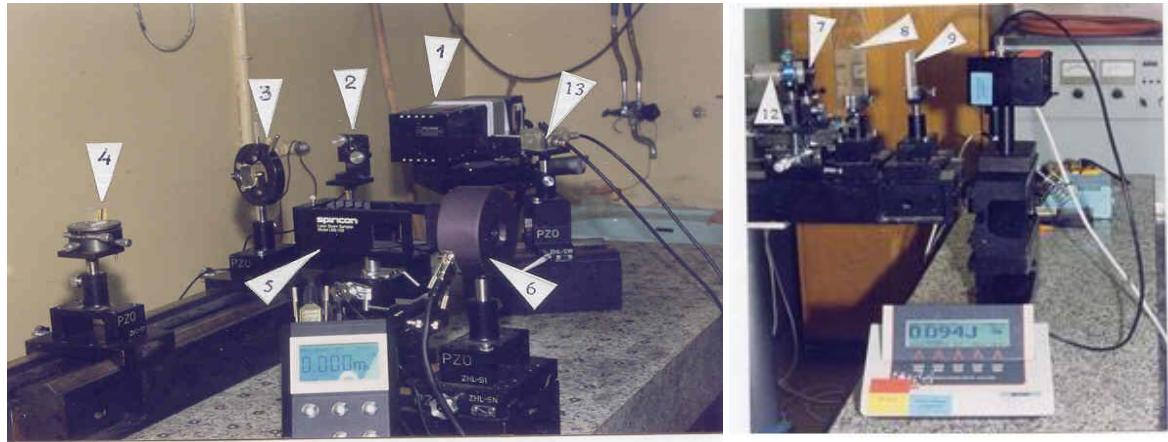


Рис. 1. Общий вид стационарной экспериментальной установки [46]

Для вимірювання часу затримки запалювання СВР відносно початку дії лазерного імпульсу використовувалися фотодіоди 12 і 13, що працювали у спектральних діапазонах 0,4 – 1,2 мкм и 0,8 –

1,4 мкм відповідно. У процесі експериментів з'ясувалося, що затримку вибуху СВР можна реєструвати одним фотодіодом 12.

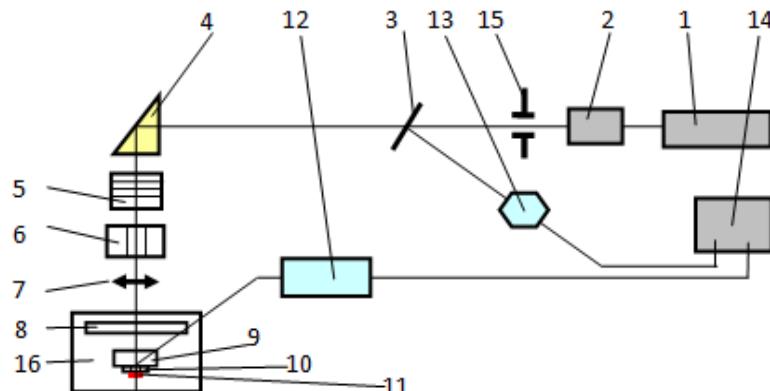


Рис. 2. Принципова схема стационарного експериментального пристрою оптичного квантового генератору [65]:

- 1 – лазер CFR 200–10 Pulsed Nd:YAG Laser System; 2 – лазерный диод; 3 – зеркало; 4 – оптическая призма; 5 – светофильтры; 6 – измерительная головка измерителя лазерной энергии ИЭЛ-300;
- 7 – линза; 8 – стеклянная пластина-экран; 9 – алюминиевая пластина; 10 – пластина із скла; 11 – СВК;
- 12 – фотодиод для регистрации продуктов взрыва; 13 – фотодиод для регистрации лазерного импульса;
- 14 – осциллограф; 15 – диафрагма

Використовувався двоканальний цифровий осцилограф TDS-350 фірми Tektronix (США). Максимальна частота входного сигналу (аналогового) 200 МГц. Максимальна частота – 1 ГГц. Мінімальний час розгортки – 2,5 нс/поділ. Для визначення функції розподілу густини енергії в лазерному пучку використовувалася методика, що основана на експериментальному визначенні діаметрів відбитків, які виникають при лазерному випромінюванні на матеріал. Розподіл енергії в лазерному пучку визначався за допомогою аналізатора лазерного пучка Silicon Camera Model LBA-100A фірми Spiricon. У аналізатор входять камери високого розділення Pulnix TM-745, що безпосередньо реєструють випромінювання, та мікропроцесорні системи, що аналізують розподіл енергії і відображають результати на моніторі. Затримка запалення світлоочутливих композитів у часі здійснювалася за методикою [66, 67].

В зв'язку з тим, що при змінюванні енергії в лазерному імпульсі змінюється й діаметр плями опромінювання (абсолютне значення щільності енергії, що на границі пучка, залишається незмінною) розроблена методика вимірювання діаметра лазерної плями по відбитках, що виникають при лазерній дії на матеріал. При цьому, у матеріалі протікають фазові перетворення, що спостерігаються візуально чи за допомогою мікроскопа.

Фазовий перехід має пороговий характер, тобто здійснюється при впливу лазерного випромінювання з енергією, густина якої перевищує певну порогову величину  $E^*$ . В цьому випадку на поверхні матеріалу одержують контрастні відбитки, що можуть бути виміряні з достатньою точністю. В якості такого матеріалу використовують засвічений і проявлений звичайний фотопапір.

Основне припущення, що було прийнято в да-

ній методиці, наступне: функція розподілу інтенсивності випромінювання поперек перерізу пучка не змінюється від імпульсу до імпульсу. Ця вимога виконується при стабільній роботі оптичний квантovий генератор (ОКГ), що генерує імпульси з однаковою енергією. Змінювання щільності енергії випромінювання здійснюється за допомогою калібрувальних світлофільтрів.

Розподіл щільності енергії по перерізу пучка наблизено будемо шукати у наступному виді

$$E(r) = E_0 \omega(r), \quad (1)$$

де  $E_0$  – щільність енергії у центрі пучка;  $r$  – радіус кільця шириною  $dr$ , на якому здійснюють пошук величини  $E(r)$ .

Представлення функції щільності енергії у виді (1.1) передбачує радіальну симетрію функції розподілу.

Проведемо нормування цієї функції на повну енергію у імпульсі  $W$

$$W = 2\pi E_0 \int_0^\infty \omega(r) r dr. \quad (2)$$

Поділивши (1.1) на (1.2), одержимо

$$E(r)/W = \omega(r)/2\pi k, \text{ де } k = \int_0^\infty \omega(r) r dr.$$

Змінюючи пропускання лазерного тракту слід чекати одержання серії відбитків, радіуси яких можна виміряти за допомогою мікроскопа. Межа відбитків відповідає пороговій енергії змінювання забарвлення  $E^*$ . Після цього використовують результати вимірювань для запису рівнянь у такому виді:

$$E^*(r_i)/W_i = \omega(r_i)/2\pi k, \quad i=1, \dots, n, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість вимірювань;  $W_i$  – енергія випромінювання, при якій радіус відбитку дорівнює  $r_i$ .

Після того, як була побудована залежність  $W(r)$  методом екстраполяції знаходять енергію  $W(0)$ , при якій радіус відбитка дорівнює нулю. Після визначення цієї величини визначають порогову енергію фазового перетворення матеріалу покриття на фотопапері:

$$E^*/W(0) = \omega(0)/2\pi k = 1/2\pi k. \quad (4)$$

Розділяючи послідовно рівняння системи (1.3) на рівняння (1.4), одержимо

$$\omega(r_i) = W(0)/W_i, \quad i=1, \dots, n.$$

Знання функції розподілу  $\omega(r)$  вирішує поставлену задачу. Для визначення щільності енергії у центрі пучка  $E_0$ , а також  $E^*$  необхідно шляхом графічного інтегрування знайти величину  $k$ .

Щільністі енергії у центрі пучка  $E_0$  розраховується за формулою

$$E_0 = W/(2\pi k).$$

В якості характеристики чутливості може бути обраною середня щільність енергії лазерного імпульсу  $E_{cp}=4W/\pi d_*^2$  ( $d_*$  – діаметр відбитку), або щільністі енергії у центрі пучка  $E_0$ .

При визначенні критичної густини енергії застосовувалися світлофільтри із заздалегідь виміря-

ними коефіцієнтами пропускання. Форма лазерного імпульсу реєструвалася за допомогою фотоелектричного перетворювача та запам'ятовуючого двохпроменевого осцилографа С8-14. Енергія лазерного випромінювання вимірювалася калориметром ІКТ-1Н.

Для вивчення чутливості ВР розроблена методика вимірювання [68], яка базується на експериментальному визначенні діаметрів відбитків, які виникають при дії лазерних імпульсів різної енергії на матеріал, що зазнає фазове перетворення [69, 70]. Так як використовувався одномодовий режим роботи ОКГ, то розподілення густини енергії по перерізу пучка є радіально симетричним. У цьому випадку густина лазерної енергії може бути зображенна у вигляді добутку величини густини енергії у центрі пучка на функцію розподілення  $W(r)$ , яка залежить від радіуса кола, центр якого розміщений на осі пучка. Змінюючи пропускання лазерного тракту, одержували серію відбитків, радіуси яких вимірювали за допомогою мікроскопа. Одержані результати використовувалися при вирішенні системи рівнянь, що зв'язують радіус відбитка  $r_i$  та енергію в імпульсі  $W(r_i)$ . Побудувавши залежність  $W(r_i)$ , методом екстраполяції знаходилась енергія  $W(0)$ , при якій радіус відбитка дорівнював нулю. Це дозволило одержати експериментальну функцію розподілення, котра потім апроксимувалася розподіленням Гауса, що значно спростило проведення досліджень [69].

Розроблено експериментальну методику визначення імпульсу тиску продуктів вибуху, що заснована на використанні балістичного маятника [70, 71]. Маятник складався з металевого диска, закріпленого на одному кінці тонкостінної трубки, другий кінець якої кріпився до осі змінного недротяного резистора, який мав лінійну характеристику залежності величини опору від кута повороту рухомого контакту. Вимірювання напруги у мостовій схемі здійснювалось за допомогою цифрового вольтметра Щ68003, працюючого спільно з друкуючим пристроєм Щ68000К, що дозволяло визначати з частотою 25 Гц значення кута у процесі відхилення маятника. При розробці методики особлива увага приділялася визначенню похибки вимірювання, зумовленої дискретним виводом інформації, тертям осі маятника, неточністю електричних вимірювань. Розроблену методику використали у дослідженнях впливу вибухового імпульсу на збудження детонації суміші метану з повітрям [70-73].

Виходячи зі сформульованих висновків відносно підвищення чутливості ВР, були проведені дослідження, направлені на одержання високочутливих вибухових сполук за рахунок зниження пористості та збільшення прозорості зразків ВР, а також на розробку вимог до технології нанесення сполук у вигляді покриття на різноманітні матеріали. Перелічені задачі вирішенні завдяки розробленій технології приготування в'язкої основи – суспензії порошку вибухової речовини у розчині полімерних матеріалів, прозорих для лазерного випромінювання. Після нанесення такої основи на поверхню

будь-якого матеріалу швидко леткий розчинник випаровується, в результаті чого утворюється тверде покриття у вигляді суміші ВР та твердого полімеру, що заповнює простір між кристалами.

Виходячи з цільового призначення суспензії, у процесі приготування в'язкої основи були розглянуті такі параметри як хімічна сумісність із дисперсним середовищем (ВР), гомогенність, висока адгезія до металевих матеріалів, здібність забезпечити необхідний рівень седиментаційної стійкості, мінімальна токсичність, пожежо- та вибухобезпечність, доступність. При розробці в'язкої основи використовувалися принципи одержання та випробування плівкоутворювальних покріттів із розчинів полімерних матеріалів для створення фарб. Розчинниками служили ацетон, етиловий спирт, бензин, четыреххлористий вуглець, хлороформ. В'язку основу наносили на алюмінієву підкладку у вигляді плівкоподібного покриття, потім одержану плівку висушували при 50°C протягом п'яти хвилин.

## 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень були вибрані комплексні солі [56]. Цей вибір обумовлено їх великою швидкістю переходу від горіння до детонації. Крім

цього, велика кількість комплексних ВР прозорі для лазерного випромінювання, а технологія їх виготовлення дозволяє одержувати високодисперсні порошки, які необхідні для одержання якісних суспензій. При проведенні попередніх досліджень чутливості ВР використовувався зв'язуючий полімер ПМВТ-ЗМ, масова концентрація якого складала 10%.

Досліджено 23 комплексних ВР. Вибухові сполуки наносилися у вигляді покриття на алюмінієву фольгу на площині ~1 см<sup>2</sup>. Частину вибухових сполук не вдавалося ініціювати лазерним імпульсом із густиновою енергією >10 Дж/см<sup>2</sup>. Вибухова сполука ВС1 стійко вибухала при E = 0,1 Дж/см<sup>2</sup>, а ВС6 диспертувала при E > 1,3 Дж/см<sup>2</sup>. У табл.. 1 наведено деякі композити, що мають найбільшу велику чутливість. Максимально велику чутливість має вибухова сполука ВС2, одержана на основі гідразинотетразоліту(11)перхлорату. А тому з цією речовиною були проведені дослідження, спрямовані на збільшення відсоткового її виходу при синтезі. В результаті проведених експериментів вихід речовини досягнув 50–60%.

Таблиця 1

Параметри світлочутливих ініціюючих вибухових речовин

Світлочутливий вибуховий композит	Швидкість детонації, м/с	Густинна, г/см <sup>3</sup>	Мінімальна енергія запалювання, Дж/см <sup>2</sup>
ВС-2	6500	3,00	2,3·10 <sup>-3</sup>
ВС-7	7600	4,60	5,0·10 <sup>-3</sup>
ВС-16	5100	1,10	1,2·10 <sup>-2</sup>
ВС-17	6700	1,50	4·10 <sup>-2</sup>

Причому, ВС7 під дією лазерного імпульсу детонує, в той час як при дії інших ініціюючих фактірів (удар, укол, дія вогню і таке інше) – горить. Ця властивість видається дуже важливою з точки зору безпечної поводження з цим матеріалом [57, 74]. Критичні густини енергії запалювання ВС2, ВС7, ВС16, ВС17 показують, що чутливість цих матеріалів є унікальною, так як подібний її рівень не був зареєстрований ні для одного з раніше досліджених ВР (для азиду свинцю E<sub>kp</sub>=0,1, для ТНРС – 0,25 Дж/см<sup>2</sup>).

Для підтвердження теоретичних уявлень про механізм запалювання ініціюючих ВР лазерним імпульсом були проведені принципово нові експерименти, а саме, вимірювання чутливості вибухових сполук у залежності від концентрації зв'язуючого матеріалу та товщини зразків ВР [75-77] (рис. 3-6). На прикладі ВС2 показано, що при збільшенні концентрації зв'язуючого матеріалу густина енергії запалювання зменшується, досягнувши мінімального

значення, а потім збільшується при подальшому зростанні концентрації. Мінімум густини енергії запалювання досягає при концентрації полімеру ~30%. Абсолютні значення мінімуму близькі для полімерів ПМВТ-ЗМ та ПММ. Також визначено, що при зменшенні радіуса пучка збільшується густина енергії запалювання.

Поряд із цим виявлена залежність чутливості від поверхневої густини маси m<sub>s</sub> (товщини) покриття із ВР. Наприклад, при зменшенні товщини покриття з ВС16, починаючи з m<sub>s</sub>~60–70 мг/см<sup>2</sup>, чутливість падає. Покриття з поверхневою густиною маси 20 мг/см<sup>2</sup> не вдавалося ініціювати навіть при дії імпульсом із густинною енергії, що в 15 раз перевершувала критичну для товстих зразків [78, 79]. При цьому, якщо підрив не відбувався, то візуально та під мікроскопом не спостерігалось слідів руйнування або часткового розкладення речовини.

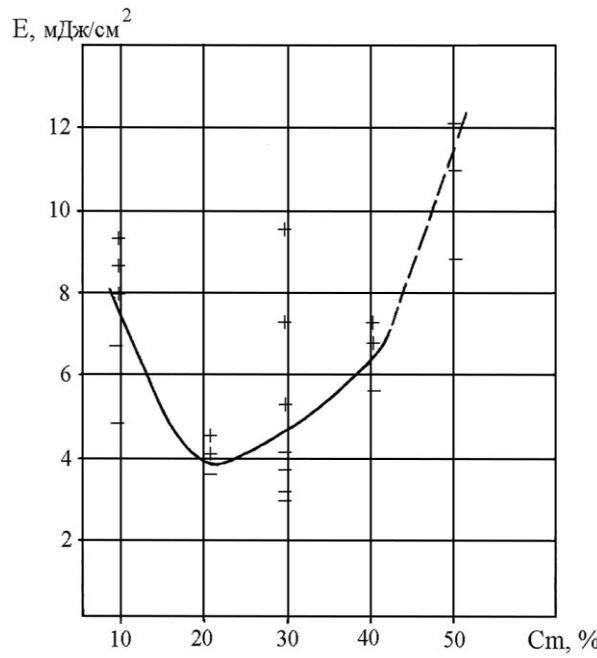


Рис. 3. Чутливість до лазерної дії BC2. Зв'язка з ПМВТ-3М, діаметр пучка 1,5 мм

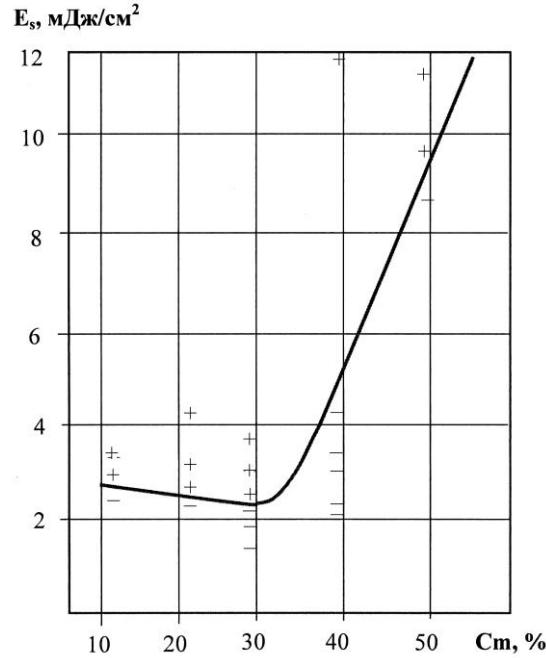


Рис. 4. Чутливість до лазерного імпульсу BC2. Зв'язка з ПМВТ-3М, діаметр пучка 4,5 мм

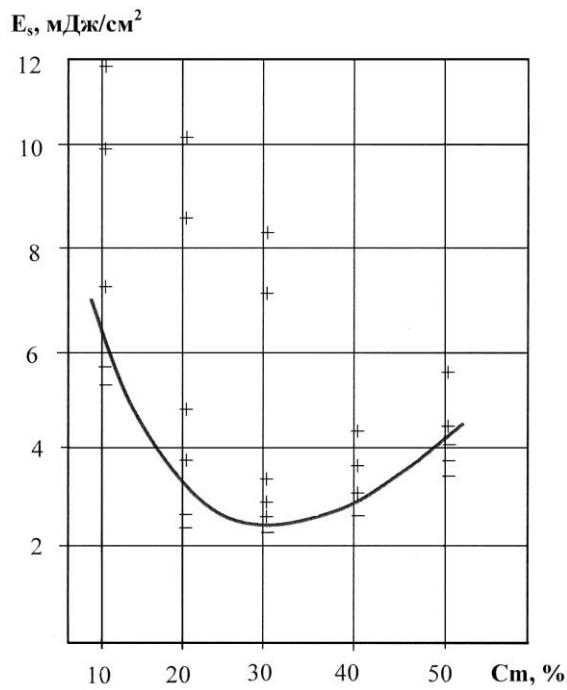


Рис. 5. Чутливість до лазерного імпульсу BC2. Зв'язка з ПММ, діаметр пучка 4,5 мм

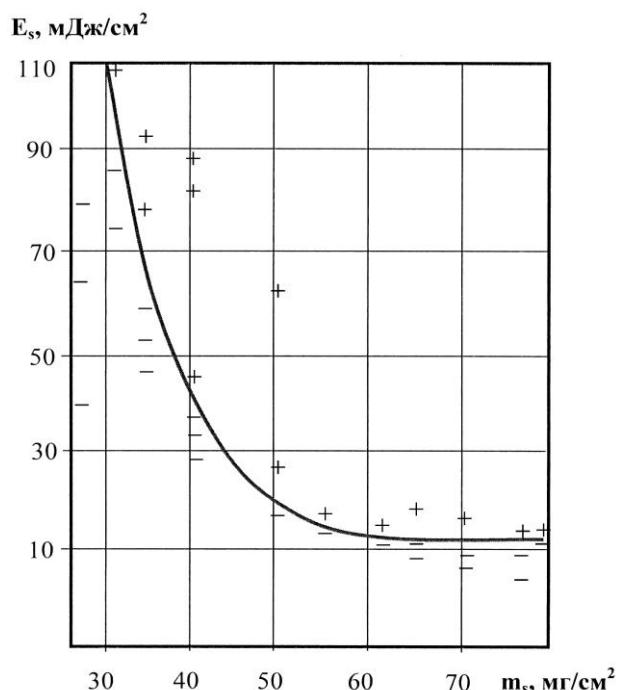


Рис. 6. Залежність чутливості BC16 від товщини зразка

Одержані експериментальні дані задовільно узгоджуються з теоретичними результатами. Інтенсивність лазерного випромінювання у центрі променя зменшується за рахунок поглинання та розсіювання фотонів. А тому, чим менший діаметр променя, тим розсіювання сильніше і тому для запалювання ВР потрібно збільшити густину енергії лазерного імпульсу, що і спостерігається в експерименті [80, 81].

Розсіювання світла зменшується при збільшенні прозорості зразка, а тому при підвищенні кі-

лькості полімеру росте чутливість, що також погоджується з результатами експерименту. При великих значеннях концентрації в'язки чутливість ВР падає, причиною чого є негативний вплив хімічно нейтрального зв'язуючого матеріалу на процес розповсюдження по зразку ВР вибухового перетворення [82, 83] держані результати вказують на важливу роль вільної поверхні зразка не тільки на розвиток вибухового перетворення, але і на процес формування осередку запалювання. Осередок запалювання може з'явитися тільки в тому разі, якщо

він знаходиться на достатньому віддаленні від вільної поверхні, а тому збільшення прозорості або товщини зразка ВР покращують умови його формування. Роль вільної поверхні може зводитися до одного – генерації хвилі розвантаження. Таким чином, при дії лазерного імпульсу на високочутливі ВР у результаті нагрівання мікронеоднорідностей виникає деформація речовини, яка є причиною вибухового перетворення. Осередок не виникає, якщо хвилі розвантаження встигає зменшити напруження та деформації за менший час, ніж індукційний період хімічної реакції.

Одержані експериментальні результати підтверджують теоретичну модель фізичного механізму запалювання, яка базується на уяві про деформаційну нестабільність кристалічної решітки ВР [42, 43].

Для установлення механізму запалювання ВР [84–87], а також для практичних цілей важливе значення мають результати досліджень механічних характеристик продуктів вибуху [25, 26, 27]. Крім цього, традиційні методи не можуть забезпечити одночасне навантаження великої площини конструкції ( $\geq 1 \text{ m}^2$ ), особливо якщо поверхня не є плоскою. Такі задачі виникають, наприклад, при моделюванні дії потужних лазерних імпульсів на конструкції.

Для вирішення цієї проблеми у роботі пропонується метод навантаження, що заснований на лазерному підриві покриття з вибухової сполуки. Суть методу полягає у нанесенні на об'єкт, що досліджується, вибухової сполуки у вигляді пілвки заданої товщини і подальшому опроміненню (ініціювання) усієї її поверхні лазерним імпульсом [88].

Для встановлення механізму запалювання вибухових речовин представляються важливими такі результати: по-перше, можна зробити висновок, що розсіювання світла в таких матеріалах відбувається в основному на гранях мікронеоднорідностей речовини. По-друге, при синтезі світлочутливого композиту не слід прагнути використовувати високо-чисті вихідні матеріали, оскільки при цьому зменшується концентрація мікронеоднорідностей, а, отже, знижується вірогідність ініціювання лазерним імпульсом із заданою енергією [33, 34].

Використовуючи методику вимірювання імпульсів продуктів вибуху за допомогою балістичного маятника, було одержано залежності густини імпульсу від поверхневої густини маси  $J_s(m_s)$  покриття із BC2, BC7, BC16, BC17, а також з азиду свинцю, зразки якого готовалися пресуванням при тиску  $2 \cdot 10^8 \text{ Па}$  [49, 51]. Експериментальні результати оброблялися за методом найменших квадратів. Для усіх досліджених вибухових речовин спостерігається лінійна залежність  $J_s(m_s)$ . Рішення задач відбиття детонаційної хвилі від абсолютно жорсткої стінки та миттєвої детонації показують, що при  $m_s \rightarrow 0$  величина густини імпульсу прямує до нуля [75, 76].. Однак в експериментах цього не спостерігається ( $J_s \rightarrow 0$  при  $m_s \neq 0$ ). Це означає, що частина маси ВР витрачається при переході горіння на детонацію і не дає суттєвого вкладу у величину імпу-

льсу. Тангенс кута нахилу прямих до осі  $m_s$  корелює з величиною швидкості детонації вибухових речовин, на основі яких виготовлені вибухові сполуки.

Мінімальна густина імпульсу – 0,08 кПа с була одержана при ініціюванні BC2. Для інших сполук ці значення (в одиницях кПа·с) дорівнюють 0,18 (PbN<sub>6</sub>), 0,25 (BC7), 0,38 (BC16), 0,56 (BC17). Значення поверхневої густини маси (в одиницях  $\text{мг}/\text{см}^2$ ) при  $J_s \rightarrow 0$  дорівнюють таким величинам: 10 (PbN<sub>3</sub>), 12 (BC16), 18 (BC17), 25 (BC2), 50 (BC7) [88].

Для експериментальної оцінки тривалості навантаження використовувався керамічний п'єзоелемент ЦТС–19, який розміщувався між ослаблювачем та стержнем, які були виготовлені з латуні, так як цей матеріал має хвильовий опір, що близький до хвильового опору кераміки. В основі роботи ослаблювача лежить процес перетворення плоскої ударної хвилі у сферичну. З осцилограм напруги витікає, що тривалість імпульсу стиснення росте при збільшенні товщини покриття і для BC2 у діапазоні 30–80  $\text{мг}/\text{см}^2$  ( $J_s = 0,1–1,0 \text{ кПа}\cdot\text{s}$ ) не перевершує 0,5 мкс. Враховуючи неминуче подовження імпульсу при проходженні хвилею ослаблювача, можна стверджувати, що таким методом удається одержувати імпульси навантаження субмікросекундної тривалості.

Імпульс заданої густини можна одержати за допомогою одного з досліджених ВС, при цьому тривалість навантаження буде різна в залежності від типу сполуки, так як покриття будуть відрізнятися товщиною. Однак цей шлях створення імпульсів різної тривалості не є найкращим, так як приходиться працювати з різними типами ВС. Перебороти ці труднощі можна завдяки приготуванню сполук на основі однієї вибухової речовини. Для цього необхідно варіювати концентрацією зв'язуючого матеріалу. На прикладі BC2 одержані залежності густини імпульсу продуктів вибуху від поверхневої густини маси покриття при різних концентраціях полімеру  $C_m$ . Матеріалом, що піддавали ударно-хвильовій дії була сталь Ст.45. З одержаних залежностей витікає, що збільшення вмісту зв'язуючого матеріалу можна регулювати тривалість механічних імпульсів при лазерному ініціюванні вибухових сполук, виготовлених на основі однієї і тієї ж речовини.

Таким чином, експериментально одержані вибухові сполуки аномально великої чутливості до дії моноімпульсу ОКГ, досліджені особливості їх ініціювання, виміряні параметри механічної дії продуктів вибуху, підтверджена теоретична модель запалювання вибухових речовин.

## 6. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА ЛАЗЕРНОГО ІНІЦІОВАННЯ ВИБУХОВИХ СПОЛУК

При практичному використанні енергії вибуху в різноманітних процесах обробки металів виникає необхідність у формуванні детонаційних хвиль, фронт яких мав би суворо задану форму [29]. Для цього використовуються різні методи профілювання детонаційного фронту. Особливо широке практичне застосування знаходить методи одержання плоских детонаційних та ударних хвиль.

Для вирішення цієї задачі використовуються генератори плоских хвиль, які компонуються із двох ВР із різними швидкостями детонації, перфоровані ВР, метання металевих пластин лінійно ініціюваним зарядом ВР, електричний підрив провідників тощо. Однак для формування плоскої детонаційної хвилі, як правило, потрібно значно більше вибухового матеріалу в порівнянні з основним зарядом. Більш складні проблеми виникають при створенні циліндричних та сферичних збіжних детонаційних хвиль. Необхідно створити детонаційну хвилю не на плоскій поверхні та забезпечити невелике відхилення радіуса хвилі від її середнього значення. Труднощі у вирішенні подібних задач пов'язані з тим, що доводиться працювати із засобами ініціювання (капсулі—детонатори, електродетонатори, детонуючі шнури), особливістю яких є те, що вони викликають детонацію заряду ВР локально у місцях їх розміщення.

Для подолання труднощів в одержанні профільованих детонаційних хвиль пропонується використовувати метод ініціювання, заснований на лазерному запалюванні вибухових сполук. Суть методу полягає у тому, що на поверхню матеріалу чи основний заряд ВР наноситься високочутливе до лазерного імпульсу покриття із ВР, яке потім опромінюється пучком ОКГ із густиною енергії, що перевищує критичну. При цьому, профіль хвилі формується завдяки ініціюванню частини поверхні ВР (решта поверхні затуляється екраном). Наприклад, для одержання кільцевої збіжної хвилі достатньо затулити екраном центральну частину покриття та опромінити його лазерним пучком, діаметр якого перевищує діаметр покриття. При цьому виникне ініціювання периферії ВС, що приведе до розповсюдження вибухового перетворення у вигляді кільцевої збіжної хвилі. Щоб одержати розбіжну кільцеву детонацію, достатньо ініціювати ВС у центрі покриття, плоска детонаційна хвиля формується при опроміненні усієї поверхні ВС.

Апробація методу здійснена при дослідженнях руйнування трьохшарового матеріалу ударною хвилею [25, 26, 27, 89]. Приклади практичного застосування профільованих детонаційних хвиль наведені у роботах [88] (плоскі хвилі, лінійні, хвилі, що збігаються, або розходяться, тощо), [90] (формування збіжної сферичної хвилі), [95, 92] (формування збіжної циліндричної хвилі).

Був розроблений спосіб одержання сферичної збіжної детонаційної хвилі, а також пристрій для його здійснення [90]. Суть способу полягає в нанесенні на поверхню сферичного заряду ВР тонкого

покриття зі світлочутливої ВС, розміщеній у центрі світlorозсіюальної кулі, в яку вводиться імпульс випромінювання ОКГ. Промінь розміщують таким чином, щоб була неможливість прямого попадання випромінювання на заряд. На прикладі ВС2 визначені параметри лазерного імпульсу, що необхідні для ініціювання сферичної детонації.

Для вирішення задачі виготовлення біметалевих труб розроблено спосіб, заснований на принципах одержання плоских детонаційних хвиль методом лазерного ініціювання ВС. На торець основного заряду ВР наноситься світлочутлива вибухова сполука, яка ініціюється лазерним пучком, діаметр якого перевищує діаметр заряду. Товщина покриття з ВС підбирається такою, щоб досягалось детонаційне перетворення основного заряду ВР. Такий спосіб забезпечує високу якість зони зварювання за рахунок створення плоского фронту детонації при одночасному зменшенні додаткової вибухової речовини.

Розроблений метод створення імпульсних механічних навантажень [25, 26, 27, 89] використовувався для випробовування міцності двох видів багатофункціонального покриття (БФП): БФП-1 та БФП-2. Для випробовування використовувалися квадратні зразки 10x10 см. Вибухова сполука ВС2 наносилася на поверхню БФП у вигляді круга 70 мм. Однією з основних вимог, яка пред'являлась до плоских структур БФП, була вимога забезпечення плоского навантаження. А тому розміри ділянки, що навантажувалась, вибиралася такою, щоб дія бокових хвиль розрідження не впливала на параметри навантаження у центрі зразка.

В експериментах по випробовуванню міцності матеріалів використовувалося покриття з ВС2 із поверхневою густинною маси 43, 60, 110 мг/см<sup>2</sup>. Відповідно з одержаними залежностями  $J_s$  (m<sub>s</sub>) таким покриттям відповідають густини імпульсу 0,3, 0,58, 1,42 кПа·с [88]. Густина імпульсу дорівнювала 0,1, 0,2, 0,5 кПа·с. При таких навантаженнях у разі контакту з рідиною розшарування не спостерігалося, однак, при  $J_s = 0,5$  кПа·с за рахунок дії бокової хвилі розрідження руйнувався верхній шар у вигляді кільцевого розриву. Якщо БФП знаходилися у контакті з повітрям, то при всіх рівнях навантаження спостерігається розшарування зразків. Усе це свідчить, що міцність матеріалів при імпульсному навантаженні, в першу чергу, визначається хвильовими процесами у матеріалі.

Проводилися дослідження спрацьовування оптичних детонаторів миттєвої дії, між якими передбачалися мілісекундні затримки [93]. В експериментах більші відсутні засоби контролю часу спрацьовування кожного детонатора окремо. Взагалі кожен з детонаторів підрівався й пробив свинцеву пластину завтовшки 10 мм.

Лазерний спосіб ініціювання зарядів ВР використовувався для зміцнення [94-96], зварювання металів [97], маркування нафтovих труб [88], синтезу алмазів [99, 100] та в інших дослідженнях [101, 102].

Енергія вибуху використовується для зміни та-

ких параметрів речовини як твердість, межа плинності, міцність. Крім цього, інформація про зміну інфраструктури механічних властивостей матеріалів, оброблених вибухом, застосовується при побудові теоретичних моделей середовища, у якому можна розглядати ударні хвилі з урахуванням міцності.

У виробничих умовах, як правило, зміцнення здійснюють ковзною ударною хвилею. Однак зміцнення матеріалів плоскими хвилями спрощує пошук необхідних для цього навантажень, а також спрощує інтерпретацію мікроструктурних перетворень. А тому були вивчені можливості лазерного методу формування плоских хвиль навантаження для вирішення цієї задачі.

Системи ініціювання вибухових зарядів ВР, що застосовуються у світовій практиці виконання відривних робіт, мають ряд недоліків, для подолання яких необхідно проводити коштовні організаційні та технічні заходи. З метою виключення недоліків, властивих відомим системам підриву, нами розроблені теоретичні основи та технічні вимоги до оптичної системи ініціювання (ОПСІН), основними елементами якої є оптичний квантовий генератор, світлопровідна мережа та оптичний капсуль–детонатор (ОКД). Спрацювання детонатора здійснюється від дії лазерного імпульсу, який передається по світловодам до вибухової сполуки оптичного детонатора. Виконавчим елементом ОПСІН є розроблений експериментальний зразок ОКД, у тому числі мікродetonатори, знаряджені лише монозарядом світлоочутливого вибухового композита.

Виходячи з рівня чутливості ВС7 – 50 мДж/см<sup>2</sup>, показано, що при використанні світловода з діаметром серцевини 100 мкм верхня межа енергії ініціювання ОКД складає ~10 мкДж. При такій чутливості для потреб ОПСІН достатньо використовувати світловоди з рівнем утрати світловової енергії 3–10 Дб/км, а тому матеріалом для світловодів може бути дешеве багатокомпонентне скло. Показано, що енергія лазерного імпульсу, необхідна для ініціювання, наприклад, 500 шпарин зарядів, розміщених на відстані 1 км від ОКГ, складає ~50 мДж.

Для підривання ОКД було розроблено та виготовлено перший у світі трьох канальний експериментальний зразок ОКГ з електронною комутацією між каналами, яка забезпечувала часову затримку спрацювання одного каналу по відношенню до другого в інтервалі 0–80 мс [17, 18]. Таке технічне рішення забезпечує підрив окремих груп зарядів із заданим часовим інтервалом. Електрична схема складається з мережевого блока джерела живлення, підсилюючого трансформатора, блока імпульсних ламп, блока підпалювання імпульсних ламп, блока керування. Основні технічні дані ОКГ: кількість каналів – 3, довжина хвилі випромінювання – 1,06 мкм, режим роботи – пасивна модуляція добротності резонатора, вихідна енергія – не менше 150 мДж у кожному каналі, тривалість імпульсу – 11 нс, джерело живлення – 220 В, 50 Гц, або 12 В постійного струму, потужність, що споживається, – не більше 100 Вт, розміри – 425x130x300 мм, маса

– 13 кг.

Таким чином, розроблені наукові підходи використання лазерного методу ініціювання вибухових сполук для вирішення задач зміцнення матеріалів вибухом, одержання детонаційних хвиль, зварювання вибухом, випробовування міцності матеріалів до дії імпульсних механічних навантажень, розробки оптичних систем ініціювання зарядів вибухових речовин.

## 7. Висновки

Розроблено фізико–математичну модель лазерного запалювання близантних ВР, що ураховує міцністі властивості матеріалу. Теоретична модель дозволяє пояснити увесь комплекс експериментальних результатів по лазерному ініціюванні близантних ВР. Шляхом чисельного розв’язання рівнянь газової динаміки та хімічної кінетики установлені закономірності дії процесу розвантаження речовини у хвилі розрідження на параметри лазерного запалювання.

Розвинуто квантово–механічний підхід до рішення задачі стійкості кристалічної решітки ініціюючих ВР в умовах її деформації, викликаної лазерним нагрівом оптичної мікронеоднорідності. Математичний підхід, який базується на рішенні рівняння Шредігера задачі про стан електрона у полі двох кулонівських центрів, допрацьований шляхом урахування екраніровки ядерних потенціалів атомів молекули зв’заними електронами та взаємодії цих електронів між собою. Вирішена задача про вплив зовнішнього кулонівського центру на електронний терм молекули. На прикладі азиду срібла показано, що стійкість групи N<sub>3</sub><sup>-</sup> порушується при деформації кристалічної решітки поблизу поглинаючого випромінювання міковіключення, що є причиною підриву ВР. Виявлений теоретичний ефект підтверджено експериментально.

З теоретичних досліджень визначені основні напрямки пошуку ВР та шляхи створення на їх основі високочутливих до лазерного імпульсу вибухових сполук: вибухові речовини повинні мати велику швидкість переходу від горіння до детонації, бути прозорими для лазерного випромінювання; при розробці ВС необхідно прагнути до збільшення прозорості зразків ВС, пониження їх пористості. Крім цього, доцільно використовувати лазерні імпульси малої тривалості.

Результати теоретичних досліджень використані при розробці технології приготовання в’язкої основи, яка уявляє собою суспензію порошку ВР у розчині полімерного матеріалу, прозорого для лазерного випромінювання. Одержано монолітну тверду суміш кристалів ВР та полімеру у вигляді покриття.

Одержано чотири вибухових сполуки, що виявляють аномально високу чутливість до дії лазерного моноімпульсу: ВС2 – 2,3 мДж/см<sup>2</sup>, ВС7 – 5 мДж/см<sup>2</sup>, ВС16 – 23 мДж/см<sup>2</sup>, ВС17 – 40 мДж/см<sup>2</sup>. Завдяки розробці цих вибухових сполук виріщені такі практичні задачі:

- вперше створено та апробовано метод випро-

бовування міцності матеріалів та стійкості конструкцій до дії механічних імпульсів навантаження субта мікросекундної тривалості при помірних густинах імпульсу – 0,1–1,0 кПа·с. Регулювання тривалості дії здійснюється шляхом зміни концентрації зв'язуючого матеріалу у вибуховій сполузі або вибором відповідного типу ВР.

- запропоновано та реалізовано способи формування профільованих детонаційних хвиль за рахунок геометричної форми лазерного пучка (сферичної збіжної, кільцевих ковзних збіжних та розбіжних хвиль, лінійної ковзної, плоскої);

- розроблено методи обробки матеріалів тиском (зміцнення, зварювання), засновані на лазерному методі ініціювання плоских зарядів ВС;

- остворені теоретичні основи та технічні можливості до оптичної системи ініціювання вибухових зарядів, основними елементами якої є оптичний капсуль-детонатор, світлопровідна мережа та оптичний квантovий генератор. Розроблено на основі ВС7 оптичний капсуль-детонатор, що виявляє рекордно велику чутливість до дії лазерного моноімпульсу – ~10 мкДж, експериментальний зразок трьох канального ОКГ з електронною затримкою спрацювання каналів відносно один одного для потреб OPSIN.

Результати роботи можуть бути використані у машинобудуванні при розробках нових способів і методів обробки матеріалів вибухом, що базуються на використанні профільованих детонаційних хвиль, випробуванні міцності матеріалів та стійкості конструкцій до дії механічних імпульсів навантаження. Розроблені основи створення оптичних систем ініціювання вибухових речовин можуть бути використані при практичній реалізації безпечних систем ініціювання у гірничодобувній промисловості. Методи створення профільованих детонаційних хвиль дозволяють застосовувати їх у наукових дослідженнях стану речовини при екстремально великих значеннях тиску, вивчені у лабораторних умовах взаємодії детонаційних хвиль із перешкодами, між собою тощо.

### Список джерел

1. Roth J. (1964). Initiation of Lead Azide by High-Intensity Light. *The Journal of Chemical Physics*, 41(7), 1929-1936.
2. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н. . (1966). Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора. Физика горения и взрыва, (3), 132-133.
3. Карабанов Ю.Ф., Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. (1977). Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 5–8.
4. Волкова А.А., Зинченко А.Д., Санин И.В., Таржанов В.И. (1977). Временные характеристики иницирования ТЭНа лазерным излучением. Физика горения и взрыва, (5), 760–766.
5. Александров Е.И., Вознюк А.Г. (1978). Иницирование азида свинца лазерным излучением. Физика горения и взрыва, (4), 86–91.
6. Карабанов Ю.Ф., Боболев В.К. (1981). Зажигание инициирующих взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением. Доклады АН СССР, 256(5), 1152–1155.
7. Hagan J.T., Chaundhri M.M. (1981). Low energy Lazer initiation of single crys. of lead aside. *J. Mat. Sci.*, 16(9), 2457–2466.
8. Чернай А.В. (1982). Об инициировании химической реакции в ТЭНе. Физика горения и взрыва, (6), 48–53.
9. Барановский А.М. (1986). Зажигание прессованных смесевых составов лазерным излучением. Физика горения и взрыва, (3), 95–96.
10. Чернай А.В., Кучугурный Ю.П. (1986). О поглощении света микроядерными азидами свинца. Деп. в ВИНТИ, №7571 – В86. ИТМ. АН УССР. Днепропетровск, 12 с.
11. Барановский А. М. (1986). Оптика и особенности инициирования ТНРС лазерным моноимпульсом. Гидродинамика взрыва. Новосибирск : ИГ СО АН СССР, 33–39.
12. Чернай А.В., Соболев В.В., Барташевская Л.И., Чернай В.А., Илюшин М.А. (2006). Применение лазерного метода инициирования взрывчатых веществ для обработки материалов. *Strategy of Quality in Industry and Education*, 1. Varna (Bulgaria), 289-294.
13. Соболев В.В., Чернай А.В. (2011). Лазерный способ инициирования зарядов взрывчатых веществ и примеры использования его на практике . Взрывная технология. Эмпирика и теория. Достижения. Проблемы. Перспективы. Тула: ТулГУ, 111-117.
14. Чернай А.В., Соболев В.В., Студинский Н.М., Гуменик И.Л. (1995). О системе оптического инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ. Металлургическая и горнорудная промышленность, (1), 47-49.
15. Чернай А.В., Соболев В.В., Студинский Н.М. (1995). Особенности зажигания ВВ лазерным моноимпульсом и перспективы построения оптической системы инициирования. Промышленные взрывчатые вещества и средства их взрыва. Шостка, 1, 15-19.
16. Sobolev V., Chernay A., Studinski N. (1996). OPSIN – a new system of blast-hole change blasting in explosives. 5-th International symposium on mine planning and equipment + selection. San Paulo. Brazil, 441-443.
17. Соболев В.В., Чернай А.В., Кашуба О.И. (1996). Нова оптическа система за иницииране на сондажни взривни заряди. Минно дело и геология, (9), 16-18 (Болгария).
18. Соболев В.В., Чернай А.В., Чернай В.А., Илюшин М.А. (1997). .К вопросу о разработке системы лазерного взрываия зарядов ВВ. Высокоэнергетическая обработка материалов. Сб. науч. тр. Днепропетровск: Арт-Пресс, 63-67.
19. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А., Мазарченков В.А. (1995). Упрочнение материалов путем лазерного подрыва взрывчатых составов. Промышленные взрывчатые вещества и средства их взрываия. Шостка, 1, 73-75.

20. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А., Мазарченков В.А. (1996). Лазерный подрыв взрывчатых составов. Упрочнение материалов. Импульсные процессы в механике сплошных сред. Николаев, 233.
21. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А. (1996). Практическое применение лазерного метода инициирования ВВ. Химическая физика процессов горения и взрыва. Черноголовка: ЧИХФ РАН, 2, 89-90.
22. Соболев В.В., Чернай А.В., Илюшин М.А. (1997). Лазерный подрыв взрывчатых составов. Исследование прочности материалов. Проблемы производства промышленных взрывчатых веществ на современном этапе и утилизация боеприпасов. Тез. междунар. научно-произв. конф. Павлоград, 35.
23. Чернай А.В. (1998). Применение лазерного метода инициирования взрывчатых веществ для упрочнения материалов взрывом. Металлофизика и нов. технологии, (2), 76-79.
24. Чернай А.В., Соболев В.В. (1993). Метод получения профицированных детонационных волн, основанный на лазерном инициировании взрывчатых составов. Воздействие высоких давлений на материалы. Сб. науч. тр., К.: ИПМ НАН Украины, 165-170.
25. Чернай А.В., Соболев В.В., люшин М.А., итник Н.Е. (1994). О методе получения механических импульсов нагружения, основанном на лазерном подрыве покрытий из взрывчатых составов. Физика горения и взрыва, (2), 67-73.
26. Chernai A.V., Sobolev V.V., Ilushin M.A., Zhitnik N.E. (1994). Generating mechanical pulses by the laser blasting of explosive coatings. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 30(2), 239-242. <https://doi.org/10.1007/BF00786134>
27. Chernaj, A.V., obolev, V.V., Iyushin, M.A., hitnik, N.E. (1994). The method of obtaining mechanical loading pulses based on a laser initiation of explosion of explosive coatings. Fizika Gorenija i Vzryva, 30(2), 106-111.
28. Чернай А.В.. Соболев В.В. (1995). Лазерный метод получения профицированных детонационных волн для обработки материалов взрывом. Физика и химия обработки материалов, (5), 120-123.
29. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А. (1996). Получение профицированных детонационных волн путем лазерного инициирования взрывчатых составов. Физика и техника высоких давлений, (4), 62-69.
30. Чернай А.В., Соболев В.В., Чернай В.А., Илюшин М.А., Длугашек А. (1999). Обработка многослойных материалов плоскими ударными волнами. Высокоэнергетическая обработка материалов. Сб. науч. тр. НГАУ, (8). Днепропетровск: Сич, 221-227.
31. Зазимко В. І., Кулівар В. В. (2018). Про деякі особливості течії хімічних реакцій в зарядах вибухових речовин, збуджених світловим імпульсним випромінюванням. Вісті Донецького гірничого інституту, (1), 143-153. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi\\_2018\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vdgi_2018_1_19).
32. Чернай А.В., оболев В.В., ернай В.А., Илюшин М.А., Бунчук Ю.П. (2003). Зажигание взрывчатых веществ импульсным лазерным излучением. Физика импульсной обработки материалов. Днепропетровск: Арт-ПРЕСС, 267-314.
33. Чернай А.В. (1996). О механизме зажигания конденсированных вторичных ВВ лазерным импульсом. Физика горения и взрыва, (1), 62-69.
34. Чернай А.В. О (1997). механизме зажигания инициирующих взрывчатых веществ лазерным моноимпульсом. Физика и техника высоких давлений. (4), 60-68.
35. Соболев В.В., Куливар В.В., Кириченко А.Л., Зазимко В.И. (2017). Возможные механизмы зажигания взрывчатых веществ лазерным импульсным излучением. Форум гірників- 2017. Дніпро: Нац. гірничий у-нт, 219-228.
36. Kugychenko O.L., Kulivar V.V. Skobenko O.V. Khalymendyk O.V. (2019). A technique to measure sensitivity of explosives to the effect of laser pulse radiation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4), 11-15.
37. Куливар, В. В., Кириченко, А. Л. (2018). Расчет оптических характеристик микроразмерных неоднородностей взрывчатых веществ с использованием теории Ми. Форум гірників – 2018. . Дніпро: НТК ДП, 84-89.
38. Соболев В.В., Рудаков Д.В., Баскевич А.С., Кириченко А.Л. (2020). Физико-математические модели в задачах лазерного инициирования взрывчатых веществ. Киев: ФОП Буря Е.Д., 108 с.
39. Jach K.E., Sobolev V.V., Kurliak A.V. (2022). Modeling of the effect of laser pulsed radiation with a solid (pp. 372-381). Scientific Collection «InterConf», 134., Порту (Португалия), 423 с.
40. Соболев В.В., Чернай А.В., Чернай В.А., Білан Н.В. (2007). Фізична модель запалювання лазерним моноімпульсом світлоочутливих речовин з великою густиною розсіювачів. Форум гірників – 2007. Д.: НГУ, 174-181.
41. Соболев В.В., Чернай А.В. (2013). Использование метода монте-карло для решения задачи возбуждения детонации в заряде ВВ лазерным моноимпульсом. Информационный бюллетень Украинского союза инженеров-взрывников, (1), 3-8.
42. Чернай А.В., Соболев В.В., Білан Н.В., Илюшин М.А. (2008). Квантовомеханический расчет распада химических связей AgN<sub>3</sub> под действием лазерного моноимпульса. XIV Симп. По горению и взр. Горение и кинетика. Черноголовка: ИПХФ РАН, 189.
43. Soboliev V.V., Chernay A.V., Bilan N.V. (2010). Quantum-mechanical calculation of the AgN<sub>3</sub> chemical bonds stability at action of laser radiation. Explosive production of new materials: science, technology, business and innovations. Moscov: TORUS PRESS, 71-72.
44. Chernay A., Sobolev.V., Nalisko N. (2016). Methods of assessing safe environment emergency response after the air-gas explosions. Scientific Israel – Technol. Advan.,18(3), 98-105.

45. Соболев В.В., Куливар В.В. (2023). Изучение случайных процессов в задачах лазерного инициирования взрывчатых композитов. Norwegian Journal of development of the International Science, (122), 122-135. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10381230>
46. Чернай А.В., Соболев В.В., Романова А.С. Особливості розподілу щільності енергії по перетену лазерного променю. Форум гірників 2016: Дніпро: Національний гірничий університет, 2016. – Т.1. – С. 163-170.
47. Илюшин М.А., Соболев В.В., Чернай А.В. (1997). Светочувствительные взрывчатые составы. Проблемы производства промышленных взрывчатых веществ на современном этапе и утилизация боеприпасов. Тез. конф. Павлоград: ПХЗ, 35-36.
48. Чернай В.А., Соболев В.В. (1997). Аномальная чувствительность к детонационному превращению при воздействии лазерного моноимпульса – новое свойство взрывчатых составов. Плазмотехнология-97. Сб. науч. тр. - Запорожье: РИП Видавець, 223-226.
49. Чернай А.В., Соболев В.В., Чернай А.В., Дlugашек А., Березовски Д., Илюшин М.А. (1999). Лазерное инициирование взрывчатых составов на основе комплексного взрывчатого вещества Ди(3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол) медь (11) перхлорат. Высокоэнергетическая обработка материалов /Сб. науч. тр. НГАУ, (8). Днепропетровск: Сич, 214-220.
50. Илюшин М.А., Соболев В.В., Чернай В.А. (2001). Инициирующие взрывчатые вещества и составы в оптических системах инициирования пиро-средств. Науковий вісник НГА України, (1), 73-76.
51. Чернай А.В. Соболев В.В., Чернай В.А., Илюшин М.А., Дlugашек А. (2003). Лазерное инициирование взрывчатых составов на основе ди (3-гидразино-4-амино-1,2,3-триазол)медь (II) перхлорат. Физика горения и взрыва, (3), 105-110.
52. Чернай А.В., Соболев В.В. (1995)/ Новые взрывчатые составы, аномально высокой чувствительности к инициированию лазерным моноимпульсом. Высокоэнергетическая обработка материалов, 1. Днепропетровск: ГГАУ, 124-127.
53. Соболев В.В. (2010). Закономерности изменения энергии химической связи в поле точечного заряда. Доп. НАН України, (4), 88-95.
54. Sobolev V., Bilan N., Filippov A., Baskevich A. (2011). Electric stimulation of chemical reactions in coal. Technical and Geoinformational systems in Mining, 125-130.
55. Sobolev V., Bilan N.V., Baskevich A.S., Stefanovich L.I. (2018). Electrical charges as catalysts of chemical reactions on a solid surface. Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4), 50-58. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/7>
56. Илюшин М. А., Целинский И. В., Судариков А. М. (2006). Разработка компонентов высоко-энергетических композиций. Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 150 с.
57. Илюшин М. А., Судариков А. М., Целинский И.В. (2010). Металлокомплексы в высокоэнергетических композициях. Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 188 с.
58. Sobolev V. V., Chernay A.V., Bilan N.V. (2014). Blasting of explosives charges via a laser monopulse. Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations. Cracow: Nokturn, 212-213.
59. Соболев В.В., Чернай А.В. (2014). Оптическая система инициирования зарядов взрывчатых веществ. Розробка, використання й екологічна безпека сучасних гранульованих та емульсійних вибухових речовин. Кошице 2-9 лютого 2014. Кременчук: КрНУ, 49-54.
60. Соболев В.В., Чернай А.В., Оболонский Р.В. (2011). Элементы оптической системы инициирования зарядов взрывчатых веществ. Перспективы освоения подземного пространства. Днепропетровск: НГУ, 114-117.
61. Романова А.С., Куливар В.В., Соболев В.В. (2016). Элементы оптической системы инициирования и некоторые их характеристики. (С. 26-29). Сучасні технології ведення буровибухових робіт та безпека застосування гранульованих і емульсійних вибухових речовин. Їх економічна ефективність і техногенна безпека. Кременчук: КрНУ, 68 с.
62. Соболев В.В., Куливар В.В., Романова А.С., Зазимко В.И. (2016). Некоторые технические особенности оптического модуля лазерной системы инициирования зарядов взрывчатых веществ (С. 13-16). Сучасні технології ведення буровибухових робіт та безпека застосування гранульованих і емульсійних вибухових речовин. Їх економічна ефективність і техногенна безпека. Кременчук: КрНУ, 68 с.
63. Соболев В.В., Ищенко Б.С., Куливар В.В. Романова А.С. (2017). Физико-технические особенности оптической системы инициирования зарядов взрывчатых веществ (С. 126-128). Перспективи розвитку будівельних технологій. Дніпропетровськ: НГУ, 135 с.
64. СОБОЛЕВ В.В., КУЛИВАР В.В., ДАРАГАН Т.В. (2022). ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ИНИЦИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ. MULTIDISCIPLINARY ACADEMIC NOTES. SCIENCE RESEARCH AND PRACTICE. MADRID, 524-529. <https://doi.org/10.46299/isg.2022.1.15>
65. Соболев В.В., Куливар В.В. (2022). Експериментальні дослідження ініціювання світлоочутливих вибухових композитів лазерним моноімпульсом. 1. Матеріали і прилади (р. 171-178). Scientific collection «Interconf», 119. Monterrey (Mexico).
66. Соболев В.В., Куливар В.В. (2022). Задержка зажигания взрывчатых веществ при инициировании излучением лазерного импульса (с.603-607). Society and science. problems and prospects. London, 628 p. <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.I.III>
67. СОБОЛЕВ В.В., КУЛИВАР В.В., БАЛАКИН О.О. (2022). ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНІЦІЮВАННЯ

- СВІТЛОЧУТЛИВИХ ВИБУХОВИХ КОМПОЗИТІВ ЛАЗЕРНИМ МОНОІМПУЛЬСОМ.**
3. ВИМІРЮВАННЯ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ВИБУХУ (Р. 164-170). SCIENTIFIC COLLECTION «INTERCONF», 119: ). MONTERREY, MEXICO.
68. Соболев В.В., Чернай А.В., Студинский Н.М. (1995). О методике измерения чувствительности взрывчатых составов и импульса продуктов взрыва. Высокоэнергетическая обработка материалов, 1. Днепропетровск: ГГАУ, 136-141.
69. Kyrychenko O.I.. (2018). On the influence of the density of laser beam energy on the sensitivity of explosive substances to laser radiation. Naukovyi Visnyk NHU, (6), 48-56.
70. Chernay A., Sobolev.V., Nalisko N. (2016). Methods of assessing safe environment emergency response after the air-gas explosions. Scientific Israel – Techn. Advant., 18(3). 98-105.
71. NALISKO N., SOBOLEV V., RUDAKOV D., BILAN N. (2019). SSESSING SAFETY CONDITIONS IN UNDERGROUND EXCAVATIONS AFTER A METHANE-AIR MIXTURE EXPLOSION 01008. Web OF CONFERENCES, 123 UKRAINIAN SCHOOL OF MINING ENGINEERING – 2019, bERDIANSK, uKRAINE, sep., 3-7, [HTTPS://DOI.ORG/10.1051/E3SCONF/201912301008](https://doi.org/10.1051/E3SCONF/201912301008)
72. Чернай А.В., Соболев В.В., Налисько Н.Н. (2016). Сравнительный анализ взрывного импульса в физическом и численном эксперименте при оценке безопасных условий ликвидации аварий. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, (3), ч. 1, 70-75.
73. Чернай А.В., Соболев В.В., Налисько Н.Н. (2016). Экспериментальная проверка методики численного расчета импульса взрывной волны на баллистическом маятнике. Форум гірників 2016: Дніпро: НГУ, 1, 105-113.
74. Илюшин М., Шугалей И., Судариков А. (2017). Высокоэнергетические металлокомплексы: синтез, свойства, применение. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic publishing GmbH&CO.KG, 268 с.
- 75 Chernai, A.V., Sobolev, V., Chernaj, V.A., Il'yushin, M.A., Dlugashek, A. (2003). Laser initiation of charges on the basis of di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazol)-copper (II) perchlorate. Fizika Gorenija i Vzryva, 39(3), 105-110.
76. Chernai A.V., Sobolev V.V., Chernai V.A., Ilushin M.A., Dlugashek A. (2003). Laser Ignition of Explosive Compositions Based on di-(3-hydrazino-4-amino-1,2,3-triazole)-Copper(II) Perchlorate. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 39(3), 335-339.
77. Чернай А.В., Соболев В.В., Чернай В.А., Білан Н.В. (2007). Ініціювання світлоочутливих вибухових речовин вузькими лазерними пучками. Форум гірників –2007”. Дніпропетровськ: НГУ, 168-173.
78. Соболев В.В., Чернай А.В., Илюшин М.А. (1996). Высокочувствительные к лазерному воздействию взрывчатые составы. Химическая физика
- процессов горения и взрыва. Черноголовка: ЧИХФ РАН, 2, 89-90..
79. Соболев В.В., Чернай А.В., Илюшин М.А. (2010). Экологически безопасное полимерсодержащее ВВ для лазерного инициирования. Информационный бюллетень Украинского союза инженеров-взрывников, (4), 12-14.
80. Кириченко А.Л., Куливар В.В., Соболев В.В. (2017). Взрывчатые композиты, высокочувствительные к импульсному лазерному излучению. Вісті Донецького гірничого інституту, 32(41), 138-146.
81. Соболев В.В., Куливар В.В., Кириченко А.Л .(2017). Первичные взрывчатые вещества для лазерных систем инициирования. Матер. II Міжнар. науково-технічна інтернет-конференція «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі». – Кривий Ріг: КНУ, с. 166.
82. Соболев В.В., Скобенко А.В., Куливар В.В. (2022). Експериментальні дослідження ініціювання світлоочутливих вибухових композитів лазерним моноімпульсом. 2. чутливість азиду свинцю. Scientific Collection InterConf, 119: Monterrey, Mexico; p. 1791-188.
83. Sobolev V.V., Kulivar V.V. (2022). laser initiation of photosensitive explosive composites (p. 369-373). Scientific Collection «InterConf», 132 Washington, 511 p. ISBN 979-1-293-10109-3
84. ЧЕРНАЙ А.В., СОБОЛЕВ В.В. К (1994). ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЗАЖИГАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ МОНОИМПУЛЬСОМ. ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ, (2), 111-115.
85. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А., Житник Н.Е., Петрова Н.А. (1996). К вопросу о механизме зажигания взрывчатых составов лазерным моноимпульсом. Химическая физика, 15(5), 134-139.
86. Chernai, A.V., Sobolev, V.V., Il'yushin, M.A., Zhitnev, N.E., Petrova, N.A. (1996). On the mechanism of ignition of energetic materials by a laser pulse. Chem. Phys. Reports, 15(3), 457-462.
87. Chernay A.V., Sobolev V.V., Ilushin M.A. (1996). On the Mechanism of Energetic Materials By a laser Pulse. Chem. Phys. Reports. 15, 457-462.
88. Sobolev V.V., Skobenko O.V., Kononenko M.M., Kulivar V.V., Kurlyak A.V. (2023). Profiled detonation waves in the technologies of explosion treatment of metals. Metallofizika i noveishie tekhnologii, 45(11), 1349–1384. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.11.1349>
89. Чернай А.В., Соболев В.В., Илюшин М.А., Чернай В.А., Шараубура А.Д. (2001). Нагружение материалов плоскими ударными волнами методом лазерного инициирования взрывчатых составов. Физика и техника высоких давлений, (3), 94-100.
90. Чернай А.В., Соболев В.В., Студинський Н.М., Фомічов В.В. (.2000). Спосіб одержання збіжної сферичної детонаційної хвилі та пристрій для його здійснення. Патент на винахід №17521 Україна, заявл. 31.03.95; бюл. (1), 4 с.
91. Соболев В.В., Куливар В.В., Кириченко А.Л., Зазимко В.И. (2018). Способ формирования

сходячихся циліндрических ударних волн.: Перспективи розвитку будівельних технологій. Дніпро, НГУ, 136-141

92. Sobolev V.V. Skobenko O.V., Usyk I.I., Kulivar V.V., Kurliak A.V. 2021. Formation of converging cylindrical detonation front. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 6),. 49-56 <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/049>

93. Соболев В.В., Куливар В.В. Випробування оптичного детонатора миттєвої дії (pp. 276-284). Scientific collection «Interconf», (121): Umeå, Sweden, 2022. 409 P.

94. Чернай А.В.. Соболев В.В., Чернай В.А. (2000). Применение лазерного метода инициирования взрывчатых веществ для упрочнения металлов взрывом. Металлургическая и горнорудная промышленность, (8/9), 379-381.

95. Соболев В.В., Чернай А.В. (2009). Обработка металлов взрывом с применением лазерного инициирования зарядов взрывчатых веществ (С. 173-181). Высокоэнергетическая обработка материалов. Д.: АРТ-Пресс, 248 с.

96. Sobolev V.V., Chernai A.V., Ilushin M.A., Chernai V.A. (2006). Shock Processing of Metals upon Laser Initiation of Explosives. Shock-assisted Synthesis and Modification of Materials, Moscov: Torus Press Ltd, 119.

97. СОБОЛЕВ В.В., СКОБЕНКО О.В., КУЛІВАР В.В. (2023). ІНІЦІОВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ ВИБУХОАВІХ РЕЧОВИН ЛАЗЕРНИМ ІМПУЛЬСНИМ ВИПРОМІНОВАННЯМ (с.322-332). MODERN

ASPECTS OF MODERNIZATION OF SCIENCE: STATUS, PROBLEMS, DEVELOPMENT TRENDS, , ISTANBUL, 344 C. <HTTPS://DOI.ORG/10.52058/35>

98. Соболев В.В., Чернай А.В., Чернай В.А. (2001). Маркировка нефтяных труб лазерным инициированием микрозарядов взрывчатых веществ. Сб. научн. Тр. НГАУ, 3, (11), 181-187.

99. Sobolev V.V., Kovrov O.S., Nalisko M.M., Bilan N.V., Tereshkova O.A. (2021). Compound physical and mechanical effects stimulating metastable diamond formation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4): 47-55; <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/047>.

100. Sobolev, V.V., Gubenko, S.I., Rudakov D.V., Kyrychenko O.L., Balakin O.O. (2020) Influence of mechanical and thermal treatments on microstructural transformations in cast irons and properties of synthesized diamond crystals. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020, № 4, p. 53-62; <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020>

101. Sobolev V.V., Hapieiev S.V., Skobenko O.V., Kulivar V.V., Kurliak A.V. (2022). On the mechanism of ionization of atoms at compression of a substance converging by front of the shock wave. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (3), 57-66. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/057>

102. Sobolev V., Cabana E.CF., Howaniec N., Dychkovskyi R., Jura B., Bałk A., Iwaszenko S, and Smoliński A. (2020). Estimation of Dense Plasma Temperature Formed under Shock Wave Cumulation. Materials (Basel), Nov; 13(21): 4923, 1-9; <https://doi: 10.3390/ma13214923>.

# SOCIAL SCIENCES

## THE INFLUENCE OF SOCIAL INNOVATION IN A TERRITORIAL PROCESS (CASE STUDY ALBANIA)

**Aldona Minga,**

*Doctor of Philosophy*

*Fan S Noli University of KORCA*

**Ilir Sosoli,**

*Doctor of Philosophy*

*Fan S Noli University of KORCA*

**Dorjan Marku**

*Doctor of Philosophy*

*Fan S Noli University of KORCA*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573945](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573945)

### **Abstract**

We will discuss what social innovation is, how it can be used in the territorial context in Albania and the impact it has on the development of communities and regions. In Albania, social innovation has influenced the development of the territory by bringing new and creative solutions to social challenges. Some examples of social innovation include social startups, incubators and innovation hubs, projects in the field of tourism and cultural heritage, as well as projects for the improvement of the environment and the protection of nature. These efforts have aimed to address social problems and promote the sustainable development of the territory. However, there is still room for further growth and development of social innovation in Albania, and cooperation between the public sector, non-governmental organizations and the private sector is important to create a supportive environment for social innovation.

**Keywords:** Social innovation, territory, factor, development, economy.

### **Concept of Social Innovation**

The early concept of innovation in economic development and entrepreneurship was popularized by Joseph Schumpeter, a German economist. Innovation, according to him, includes the elements of creativity, research and development, new processes, new products or services, and advances in technology (Lumpkin & Dess, 2001). According to (Kuratko & Hodgetts, 2004), innovation is the creation of new wealth or the change and enhancement of existing resources to create new wealth.

Innovation is also seen as a process of idea generation, a development of an invention and ultimately the introduction of a new product, process or service to the market (Thornhill, 2006). Social Innovation is the process of developing and implementing creative and innovative solutions to address social challenges and improve the economic, social and environmental condition of a community.

The concept of social innovation represents a vision that includes the creation and development of new solutions to create value and improve social life and the social environment. This strategy uses innovation to meet social challenges, using a combination of creativity and new ways of thinking to bring about major and lasting changes in society.

Social innovation is closely related to transforming situations and creating innovative solutions to complex social challenges. These may include issues such as poverty, lack of education, limitations in access to health and social services, and environmental pollution, to name a few. In contrast to the use of traditional methods, social innovation aims to develop new, creative solutions oriented towards positive change in society.

Many writers and personalities have made significant contributions to the field of social innovation, including academics, activists and numerous professionals in social fields. One of the leading texts in this field is "The Power of Social Innovation" by S. Goldsmith (2010), which underlines that social innovation is a great power that enables us to develop new solutions to the biggest social challenges of our time. ours. Instead of just using the old methods, we need to go beyond them and build a more just and different reality. The emergence of social actors' initiatives to satisfy specific social needs and offer solutions to different problems derives mostly from the employment crisis and the reshaping of State interventions (Bouchard, 2011). In this context, social innovation plays a central role in solving new societal problems.

Success situations of social innovation include examples such as changes in the education system, the use of technology to address health problems, the creation of social business models and many others. These innovative solutions offer hope to address major social challenges and improve people's lives in ways that are sustainable and different from traditional methods.

Westley, F., & Antadze, N. (2010) explored a strategy for scaling social innovation and increasing its impact. He discusses the importance of collaboration, experimentation and adaptive learning in the process of scaling social innovations.

Nicholls, A., Simon, J., & Gabriel, M. (2015) provided an overview of new frontiers in social innovation research. Mulgan, G. (2006) explores the process of social innovation and identifies the stages and key elements involved. It discusses the role of actors, networks and context in driving social innovation processes. In

the book Murray, R., Caulier-Grice, J., & Mulgan, G. (2010) provided a comprehensive overview of social innovation, including case studies and examples from different sectors and countries. It covers topics such as citizen-led innovation, social finance and public sector innovation.

In Albania, social innovation is an important tool to improve territorial processes and to achieve sustainable goals at the local and regional level.

### **Social Innovation in Territorial Processes**

The role of territory is crucial in the context of social innovation and its impact on development. Territory, which refers to a specific geographical area, plays an important role in shaping the conditions and dynamics of social innovation processes.

1. **Contextual factors:** The territory offers a unique context that affects the emergence, implementation and diffusion of social innovation. Factors such as the socio-cultural environment, economic conditions, political structures and physical infrastructure shape the possibilities and constraints for social innovation initiatives.

2. **Cooperation and the formation of networks:** in a territory they serve as a basis for close cooperation and the creation of connections between different actors, including individuals, organizations, communities and institutions. Collaboration between different sectors and stakeholders within a territory has the potential to advance collective efforts and increase the effectiveness of interventions in the field of social innovation.

3. **Local knowledge and assets** are valuable resources for territories, providing specific knowledge, skills, resources and cultural heritage that can be harnessed to build social innovation. These local knowledge and assets not only contribute to the identification of relevant social needs, but also serve to co-create innovative solutions and ensure that interventions are relevant and sustainable by being rooted in the local context.

4. Social innovation usually focuses on **solving local challenges** and improving the quality of life for communities within a particular territory. Place-based solutions consider the unique features and needs of a particular geographic area. The aim is to create positive impacts in social, economic and environmental aspects, adapting to the specific context of that country.

5. The territory serves as an environment for the **development of policies and governance structures** that encourage and promote social innovation. Local and regional authorities play a key role in creating an enabling environment, providing resources and establishing supportive policies and regulations that facilitate social innovation processes.

In general, the territory is not just a background for social innovation, but an active actor that helps shape and adapt social innovation initiatives. The factors that determine the greater innovativeness of one area compared to another, are, in fact, much more complex. To the concept of physical proximity, we must add cultural proximity, that is a sense of belonging to an area, capacity for interaction with others, and shared

common values, which, in short, determine relational capital (Dedeire & Minga 2021). And it is precisely relational capital, consisting of various forms. Recognizing the role of territory enables a deeper understanding of contextual factors, collaborations and local dynamics that have an impact on the outcomes and sustainability of social innovation in a given geographic area. Recent researchers have identified a link between innovation and territorial change in the way businesses are organized, supply chains, and international networks emerge in response to new technologies and relationships between major manufacturing firms, suppliers, and buyers (Gereffi & Korzeniowicz, 1994). "A successful territorial innovation system can create the needed basis for cooperation among companies and specialization, improve the private-public dialog, encourage external stakeholders (suppliers, buyers, etc.) and accelerate innovation. Regional and territorial development are essential for improvement of the socio-economic conditions of the entire country (Kozak & Muca 2020)

### **The Impact of Social Innovation on Territorial Processes in Albania.**

Social innovation in Albania has had a significant impact on the transformation of the territory through the development of innovative projects and the undertaking of positive changes at the local and regional level. This type of innovation has played a key role in improving the quality of life for Albanian citizens, addressing social, economic and environmental challenges in a creative and innovative way.

One of the key dimensions of the impact of social innovation on territorial development is the connection between different actors, including local government, non-governmental organizations, the private sector and local communities. These actors collaborate to identify social challenges and develop innovative solutions that respond to the specific needs of local communities.

In the context of Albania, social innovation has been focused on many important sectors. One of the focuses has been improving public services, including education, health, infrastructure and transport. Through social innovation, projects and initiatives have been developed to improve citizens' access to these services and to address their needs in a more effective and innovative way.

Also, social innovation has influenced the field of local economic development in Albania. Through the creation of innovative projects in the sectors of tourism, agriculture, handicrafts, and information and communication technology, the creation of new jobs and the increase of the economic income of local communities have been stimulated.

In addition to the economic aspect, social innovation has an important impact on the social and cultural aspect of the territory. Through innovative community involvement projects, connections between individuals and different groups have been strengthened, promoting cooperation, solidarity and cultural diversity.

The impact of social innovation on territorial development in Albania requires strong institutional and financial support. It is important for the country's situation, that the government and appropriate institutions

create specific policies and programs to stimulate social innovation and provide financial resources for the development of innovative projects. Public-private partnerships serve as a key element to mobilize various resources and create a supportive environment for social innovation in Albania.

Social innovation has a significant impact on territorial processes in Albania, through innovative projects, cooperation between different actors, and institutional and financial support, social innovation contributes to the improvement of the territory in social, economic and cultural aspects. In the future, it is important to continue efforts to promote and strengthen social innovation in Albania, creating a supportive and encouraging environment for the development of the territory in a sustainable and inclusive manner.

### **The importance of institutional and financial support**

Institutional and financial support is of great importance for social innovation, not only at the global level, but also in the context of Albania. If I take it in the general context, institutional support provides the structure and legislation necessary to improve the environment in which social innovations operate. Public institutions, such as local and central governments, can create specific policies, laws and programs to promote and finance social innovation. Also, financial support is necessary to facilitate the development and growth of social innovation. Funds and financial resources, such as grants, investments and public-private partnerships, can be catalysts for the growth of innovative initiatives and for their expansion to achieve the greatest impact.

In the context of Albania, institutional support is necessary to improve the climate of social innovation. Government and public institutions should create dedicated policies and programs to promote social innovation, identify social challenges and facilitate the creation of partnerships with non-governmental organizations and the private sector.

However, the challenge of financial support continues to be stable in Albania. Beyond some local and international initiatives to provide funding and financial resources for social innovation, there is a need for greater investment in this direction. Public and private funds, as well as other funding sources, have the potential to help increase social innovation and create a supportive environment for territorial development in Albania.

Institutional and financial support provides opportunities for the creation and development of social innovations in a certain territory such as Albania. This support creates a more favorable environment for social innovations and contributes to improving the development of the territory, including solving social challenges, increasing economic income and promoting environmental sustainability.

In fulfilling the potentials of social innovation in the territorial processes in Albania, a stable institutional and financial support is necessary. Some key aspects are:

- Public and private investment: Financial interventions from government and private investors have

an important role in helping social innovation expand its impact. Public investments in infrastructure, social services and local development can create new opportunities for social innovation. At the same time, private investors can support innovative projects with the potential to bring about positive change in communities. It is very important to understand that innovation is essential for the improvement and development of businesses, generating more profits, as a result, this will lead to the development of the territory where it operates. (Jano, K. & Minga, A 2023)

- Public-private partnerships: Cooperation between the public and private sectors is essential for the promotion of social innovation in Albania. For example, strategic partnerships between local government and local business can encourage the development of social innovation projects in the territory.

A successful system of territorial innovation can create the necessary basis for cooperation between companies and specialization, improve private-public dialogue, encourage external stakeholders (suppliers, buyers, etc.) and accelerate innovation. Due to proximity, both geographically and in activities, the members of the spatial innovation system enjoy several benefits and economic advantages. (MINGA, A., & MUÇA, E. (2023). The absence of the economic structures in the process of collection and distribution of the products has encouraged the development of the direct circuits of commercialization, from rural producers to intermediaries, or from agro-enterprises to regional intermediaries. (Muca E, et al 2018)

- Technical assistance and training: Providing technical assistance and training to local actors is another important aspect to promote social innovation. Training in areas such as project management, social finance, new technologies and community leaders help increase capacities to develop and implement social innovation in territorial processes.

### **Coclusion**

Social innovation has a great impact on territorial processes in Albania. Using creativity, technology and collaboration, social innovation can improve access to basic services such as education, health, infrastructure, and influence the economic and social development of an area. However, to achieve success in using social innovation in territorial processes, it is important to understand the local and cultural context and adapt to it. Going down this path, it is necessary to involve local actors and link cooperation between them, including the government, non-governmental organizations and the community.

In this way, social innovation can serve as an effective tool to solve territorial challenges in Albania and improve the livelihood of local communities.

a. Improving dialogue and participation: Social innovation encourages the active participation of all local actors in territorial processes. Using new tools and technologies, it is possible to create virtual platforms, online surveys, mobile applications and other tools to encourage dialogue and citizen participation in the decision-making process.

b. Development of sustainable business models: Social innovation can contribute to the development of

sustainable business models at the local level. Through the implementation of social innovations, new opportunities can be created for local businesses, which can be based on the use of resources available in the territory, the trade of traditional products and the use of technology to increase efficiency and competitiveness.

c. The use of technology and innovation to solve the challenges of the territory: In Albania, social innovation can be used to address the specific challenges of a territory, such as public transport, water management, renewable energy infrastructure, etc. Using technology and social innovation, new solutions can be developed and the quality of life in the territory can be improved.

### References

1. G.T Lumpkin, Gregory G Dess. Linking two dimensions of entrepreneurial orientation to firm performance: The moderating role of environment and industry life cycle, *Journal of Business Venturing*, Volume 16, Issue 5, 2001, Pages 429-451, ISSN 0883-9026, [https://doi.org/10.1016/S0883-9026\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0883-9026(00)00048-3)
2. Nasser Fegh-hi Farahmand. Organizational Business Development of Hospital by Laboratory Services. *Journal of Business and Management Sciences*. 2013; 1(6):119-127. doi: 10.12691/jbms-1-6-1.
3. Thornhill, S. Knowledge, Innovation and Firm Performance in High-and Low-Technology Regimes. *Journal of Business Venturing*, 2006. 21, 687-703. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2005.06.001>
4. Goldsmith, S. The power of social innovation: How civic entrepreneurs ignite community networks for good. *Jossey-Bass*, 2010, 304. doi:10.1177/0899764010381625
5. BOUCHARD, M.J. "Social innovation, an analytical grid for understanding the social economy: the example of the Québec housing sector", *Service Business*, 2011, 6(1), 47-59
6. Westley, F., & Antadze, N. Making a Difference Strategies for Scaling Social Innovation for Greater Impact. *The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal*, 2010, 15(2), 1-19.
7. Gereffi, G. and Korzeniewicz, M., Eds., *Commodity Clains and Global Capitalism*, Praeger, Westport, 1994, 95-122.
8. Nicholls, A., Simon, J., Gabriel, M. Introduction: Dimensions of Social Innovation. In: Nicholls, A., Simon, J., Gabriel, M. (eds) *New Frontiers in Social Innovation Research*. Palgrave Macmillan, London. 2015. [https://doi.org/10.1057/9781137506801\\_1](https://doi.org/10.1057/9781137506801_1)
9. Geoff Mulgan, *The Process of Social Innovation, Innovations: Technology, Governance, Globalization*, 2006, 1, (2), 145-162.
10. Murray, R., Caulier-Grice, J., & Mulgan, G. *Social innovator series: Ways to design, develop andgrow social innovation*. The open book of social innovation. Nesta / Innovating Public Services, 2010.
11. Minga, A., et al. Local development through social and territorial innovation: A case study of Puka Region. *European Academic Research*. – Vol. X. – Issue 10. – January, 2023.
12. Jana, K., Minga, A., Muaremi, L. *The Role of the Business in the Development of the Territory* European Academic Research. – Vol. XI. – Issue 1. April 2023
13. Muca, E., Kapaj, A., Thoma, L. *EXPORT OPPORTUNITY AND CONSTRAINTS FOR FRUIT AND VEGETABLE PRODUCERS IN ALBANIA*. *Annals of Marketing Management and Economics*, 2018, 4 (1), 65-71. <https://doi.org/10.22630/AMME.2018.4.1.5>
14. KozakS., & Muça E. Is membership of the European Union a sufficient factor to improve the level of regional development? The case of Albania and voivodeships in Poland. *Scientific Journals of the Małopolska University of Economics in Tarnów*, 2020 46(2), 13-27. <https://doi.org/10.25944/znmwse.2020.02.1327>

## IMPACT OF AUTOMATION AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT ON UNEMPLOYMENT

Suleimanov S.

*PhD student (Baku State University),*

*Azerbaijan, Baku*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573951](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573951)

### **Abstract**

Unemployment is an important aspect of social problems. It can be assumed that many problems arise due to a lack of means of subsistence, and in the current world, having a job is the key to success and a means of earning income to support oneself. The advancement of automation is an inevitable development factor. Every year the world's population increases and unsolved social problems deepen. Automation is happening everywhere and at a rapid pace. Therefore, striking a balance between automation and social security is important.

Rapid development is making the situation more and more complicated. Technologies can gradually change absolutely all areas of production. People become less in demand in many areas of production (mainly the lower stratum of the population)

**Keywords:** unemployment, social problem, automatization, technological development.

It is widely accepted that technological change can lead to short-term job losses. The idea that they could lead to long-term increases in unemployment has long been controversial. Participants in the technological unemployment debate can be divided into optimists and pessimists. Optimists agree that innovation can disrupt jobs in the short term, but still believe that various offsetting effects avoid long-term negative consequences for jobs. While pessimists argue that, at least in some circumstances, new technologies could lead to a prolonged decline in the total number of workers in employment. The phrase "technological unemployment" was popularized by Keynes in the 1930s. At the same time, the issue of replacing human labor with machine labor has been discussed at least since the time of Aristotle.

Before the 18th century, both elites and common people generally had a pessimistic view of technological unemployment; however, due to the generally low levels of unemployment in the pre-modern period, the topic rarely aroused significant concern. In the 18th century, concerns about the impact of technology on jobs grew as mass unemployment grew, especially in Britain, which was then at the forefront of the Industrial Revolution. However, some economic thinkers have begun to counter these fears, arguing that overall the innovations will not have negative consequences for jobs.

These arguments were formalized at the beginning of the 19th century in the works of classical economists. In the second half of the 19th century, it became increasingly clear that technological progress was in the interests of all sectors of society, including the working class. Concerns about the negative impact of innovation have diminished. The claim that innovation will have long-term negative effects on employment has come to be called "Luddism" [1].

Changes in the nature of work take the form of its individualization and autonomization, which is due to the expansion of access of its subjects to significant amounts of information. These processes are manifested in the introduction of remote forms of employment among hired workers, the self-employed and crowdworkers, or participants in various projects on a

non-permanent basis. The introduction of digital platforms creates the prerequisites for the interaction of supply and demand subjects, as well as for the development of new and modification of traditional services, including home delivery, short-distance transportation, consulting activities, etc.

Another feature of the labor market in the context of digitalization of the economy is the increased dependence of labor activity on the technical system, since the processes of worker autonomy can be hampered by available technologies. Despite the fact that the work is individualized, the coordination of the participants' activities is carried out using digital platforms. Thus, digitalization provides work flexibility.

Digital platforms determine the dependence of participants on their inherent operating algorithms. For example, the emergence of digital platforms in the field of passenger transportation has allowed many drivers to find an independent form of activity and at the same time subjected them to the conditions determined by this platform [2].

An important feature of the world of work has become the blurring of boundaries between private and professional spaces, which is manifested in the possibility of inclusion in the labor process anywhere and at any time. This leads to a lack of restrictions on the length of the working day and working week, as well as disruptions to traditional work rhythms, which, in turn, disrupts vertical interactions and hierarchical structures, which are replaced by horizontal connections. If a hierarchical management organization presupposes a strict distribution of competencies and control over the flow of information by the leadership center, then in a network organization the availability and high speed of information flows allows employees to enter into effective interactions with outsiders and insiders.

An important feature of the world of work has become the blurring of boundaries between private and professional spaces, which is manifested in the possibility of inclusion in the labor process anywhere and at any time [3]. This leads to a lack of restrictions on the length of the working day and working week, as well as disruptions to traditional work rhythms, which, in

turn, disrupts vertical interactions and hierarchical structures, which are replaced by horizontal connections. The digital revolution is leading to a transformation of non-professional activities that are becoming collaborative (for example, the creation of Wikipedia by Internet users for free). Many activities based on open source resources and carried out by volunteers compete with classic activities. This is the case in software (Linux, Mozilla, Apache), film production, music creation, etc. At the same time, activities that were traditionally free are being commercialized (for example, renting a car on a one-time basis to a third party for the duration of a trip (Blablacar) or apartments (Airbnb). Thus, the boundary between personal and work time becomes blurred, which means a return to pre-industrial practices on a new technological basis.

The threat of technological unemployment is occasionally used by free market advocates as a justification for supply-side economics-style reforms to make it easier for employers to hire and fire workers. Conversely, it has also been used as an excuse to justify increased worker protections. Larry Summers proposes a vigorous, concerted effort to combat the "myriad of schemes" - such as tax havens, banking secrecy, money laundering, regulatory arbitrage - that allow those with great wealth to avoid paying taxes - to make it more difficult to amass vast fortunes without a reciprocal "great social contribution" " Summers proposed stricter

enforcement of antitrust laws; reducing "excessive" intellectual property protection; greater encouragement of profit-sharing systems that can benefit workers and give them a share in the accumulation of wealth; strengthening collective labor agreements; improving corporate governance; strengthening the financial regulatory system to eliminate subsidies on financial activities; easing land use restrictions that can lead to higher prices for land holdings; improving the professional training of young people and retraining of laid-off workers; increasing public and private investment in infrastructure development such as energy and transport [1].

### References

1. Barabash K. S. The impact of the digital economy on the change of the labor market. Science and education: economy and economics; entrepreneurship; law and management. 2018. No. 6(97).Pp.52-54.
2. Sadovaya E. S. Digital economy and the new paradigm of the labor market. World economy and International Relations. 2018. Vol. 62. No. 12. Pp.35-45.
3. Shvab K. Technologies of the Fourth Industrial Revolution, Moscow: Bambora, 2021. 320 p.
4. Woirol, Gregory R. (1996), The Technological Unemployment and Structural Unemployment Debates, Praeger

## INNER CONFLICT AND MOTIVATIONAL DISINTEGRATION IN ADOLESCENTS. CROSS-CULTURAL INVESTIGATION

**Tatiana Roșca**

*assistant professor, PhD student,*

*Free International University of Moldova*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573965](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573965)

### **Abstract**

Throughout life, everyone has experienced various inner conflicts related to certain situations or areas of life. However, today, more than ever, adolescents are facing inner conflicts which affect them quite deeply and determine them to experience a tension that sometimes translates into an existential crisis. This is due to the mental dispute between what they really want and what a society can offer them through the availability of life spheres. Thus, this research work focuses on the interdependence between the value and availability of various areas of life, which influence the motivation of adolescents, being an accurate indicator of their inner conflicts.

**Keywords:** adolescent, immigrant, inner conflict, availability, value, area of life, feeling of inner emptiness.

### **Introduction**

The feeling of inner conflict is a diffuse and poorly outlined feeling, especially due to its ambiguous characteristics which cause a lot of anxiety in adolescents. The psychological distress associated with this feeling is big, because the adolescent who is suffering from it cannot find a clear symptom with which to associate it. For this reason, this feeling is hard to define and hard to bear, because it is not easy to describe, to put into words and to delimit in the context of internal and external reality what a person experiences on an emotional level, because the boundaries in this sense are blurred.

Sometimes it can be really difficult to choose between certainties, desires and duties. Confusion is a sign that we are experiencing internal deadlock or conflict between opposing aspects, as we cannot find a solution between different needs and demands at that moment.

The term *inner conflict* refers to the experience where there are conflicting beliefs, desires, impulses, or psychological feelings. Psychology also uses the term *cognitive dissonance*, which translates into conflicting and inconsistent attitudes. A mental battle can occur at any point in a person's life, regardless of their field: relational, value, religious, moral, erotic, socio-ideological, etc.

Adolescents' inner conflict will be discussed in this study in relation to the axiological sphere and specific areas of life. Thus, we will analyze the internal psychological tension, translated into existential conflict, that discomfort and confusion about life and its future, fuelled by the perception of adolescents' powerlessness to have what they really want.

### **Methodology and methods**

This investigative research has the aim to obtain an overview of the inner conflict, connected to certain spheres of life and which is perceived by both Moldovan adolescents in the Republic of Moldova and Moldovan adolescents in Italy. Thus, this objective provides us with an additional piece of issues related to some particularities of age and migration circumstances, being a sketch of the young generation in the

diaspora in terms of the characteristics imposed by immigration status and the mechanisms by which this status influences adolescents' values.

*Research aim:* To investigate the inner conflict related to the axiological sphere in Moldovan adolescents from different ethnocultural backgrounds.

*The subject of the investigation* was to identify the impact of the sociocultural environment on the experience of inner conflict in adolescents.

Consequently, our goals were the following:

1. To investigate the inner conflict in adolescents;
2. To determine the level of disintegration in the sphere of personal motivation in adolescents.

For this purpose, the questionnaire on *The Value-Accessibility Ratio in Various Life Areas*, developed by E. B. Fantalova (Достанова, Кноппе, Климова, 1997), was administered. It has also been used quite widely by other researchers (Baciu, 2014, pp. 57-76; Secheiko, 2018, pp. 9-14; Tarnovschi, 2017, pp. 102-105; 8).

The questionnaire on *The Value-Accessibility Ratio in Various Life Areas* contains 12 values: *An active lifestyle; Health; Interesting jobs; Beauty of nature and art; Love; Material wealth; Presence of good friends; Self-confidence; Knowledge; Independence and freedom of action; Happy family life; Creation*.

The values are represented in 2 matrices. Each of these values matches a numerical rating. Thus, the respondents are instructed to select only one numerical rating from each cell. This way, no pair is omitted. Matrix 1 represents the choice of the most important value, while Matrix 2 represents the choice of the most accessible value in the near future. As a result, the choices of the subjects are counted and this allows us to obtain a total score for each value (Фанталова, 2011).

The research took place between December, 2018 and October, 2019. Accordingly, the research sample consisted of 215 adolescents (110, being from Moldova, Chișinău and Florești and 105, being from Italy, Lombardia, Emilia-Romagna, Liguria and Veneto). The adolescents were between 14 and 18 years old.

## Results and discussions

The following results emerged from the investigation:

Based on the average indicators of different areas of life, the spheres generating *anxiety and psychological concern* were delimited. Figure 1 shows the data on the number of young people experiencing inner conflict in each area of life.

Assessment of inner conflicts among Moldovan adolescents in the Republic of Moldova

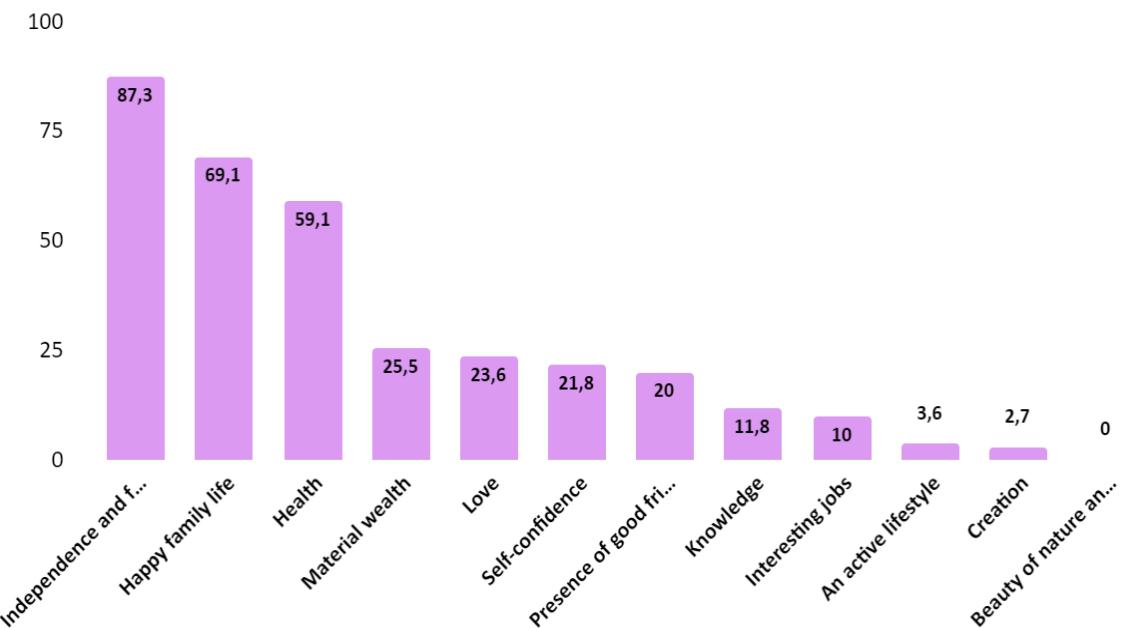


Figure 1. Assessment of inner conflicts among Moldovan adolescents in the Republic of Moldova

Figure 1 clearly indicates that there is a high number of adolescents with inner conflicts.

The conflicts that are the most prominent are associated with spheres such as *Independence and freedom of action* (87,3%), *A happy family life* (69,1%), and *Health* (59,1%). It is apparent that Moldovan adolescents in the Republic of Moldova view the prospect of possessing them as problematic.

In terms of *Independence and freedom of action*, we can notice that today's adolescents are likely to feel a lot of pressure from the entourage "to be in line with something", which certainly bothers them, as they have the characteristic need of their age to define themselves, to be independent and implicitly demanding the possibility to be responsible.

At the same time, they want a *Happy family life*, not with "friendly" parents, but with rules and limits that give them security, in which they feel appreciated

and accepted. They also see the meaning of the "happy family" in the relationships between its members, who help each other, support each other and love each other unconditionally. However, adolescents find it inconceivable and "hard to draw", which is putting pressure on them.

Regarding *Health*, adolescents described distrust of their ability to be in good health in the future. This fact indicates that adolescents are highly concerned about their health, but they are unsure if they can maintain it. Thus, we can assume that today's generation looks with skepticism at the quality of air, food, all of which creates psychological problems for them. Similarly, this concern may also be caused by the shortcomings of the medical system in the Republic of Moldova, fuelling adolescents' distrust in the skills of medical staff.

## Assessment of inner conflicts among Moldovan immigrant adolescents in Italy

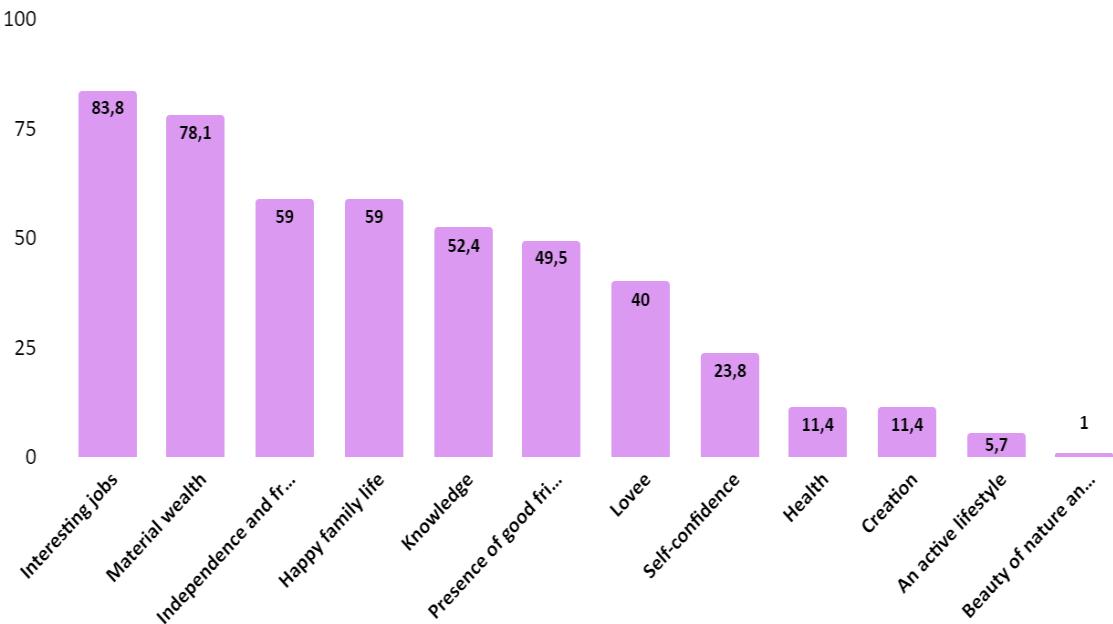


Figure 2. Assessment of inner conflicts among Moldovan immigrant adolescents in Italy

Figure 2 highlights the fact that immigrant adolescents have fairly pronounced inner conflicts. The most obvious conflicts refer to *Interesting jobs* (83,8%), *Material wealth* (78,1%), *Independence and freedom of action* (59%), *Happy family life* (59%), *Knowledge* (52,4%) and *Presence of good friends* (49,5%).

In relation to *Interesting jobs*, adolescents are aware that immigrants do not have free access to the labor market, so they are distrustful of attractive jobs.

A similar explanation is given for *Material wealth*, where the categories of jobs reserved for immigrants are less well paid and cannot guarantee financial stability, compared to the native population, as they are seasonal or strictly fixed-term and this is perceived by adolescents as a form of discrimination, causing them inner conflicts, which they find more difficult to cope with (Roșca, Caunenco, 2019, pp. 214-220). In addition, this sphere, being linked to work, can also be seen as a kind of recognition of personal involvement and capabilities or as a necessary means to live independently.

The value of *Independence and freedom of action* seems to be limited in the future of young people, too. This can interfere with the "condition of the foreigner", which is felt harshly by adolescents in the diaspora, as well as the freedom and right to choose Italian citizenship, which is a painful key for some of them. Thus, even if Italy is a democratic country, with solid principles related to freedom, in the case of foreigners it is quite reserved in terms of their access to different areas of public life "freedom, for young immigrants, is a

multi-semantic term, which is linked to democracy, the possibility of participating in collective decisions and equal opportunities, the freedom to fulfill yourself in the society where you grew up and to do what you want to do" (Shewartz, 1992, pp. 1-65).

Inner conflicts, related to the *Happy family life*, arise among immigrant adolescents, too. This value is seen in gloomy colors as a future perspective for adolescents, because they have already had the experience of family reunification, which left a painful mark on some of them and eroded the image of the *Happy family* in Italy.

In this context, *Knowledge* is also considered to be a sphere that is far from being available to young Moldovans. This is related to both the limited access to some educational institutions due to bureaucratic tactics, insufficient financial resources to cover tuition fees, and the disadvantaged position of the immigrant, all of which block the possibility of *Knowledge* at the middle or high school level (Roșca, 2021, pp. 172-181).

No less problematic, the sphere related to *The presence of good friends* is also seen. Immigrant adolescents have the difficulty of trusting the network of friends in the future. Even if this meets their need for protection, autonomy and recognition, over time, it can cause various forms of ethnic segregation, preventing their social integration in this way.

Furthermore, we intended to assess the feeling of inner emptiness in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova and Moldovan immigrant adolescents in Italy.

### Assessing the feeling of inner emptiness in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova

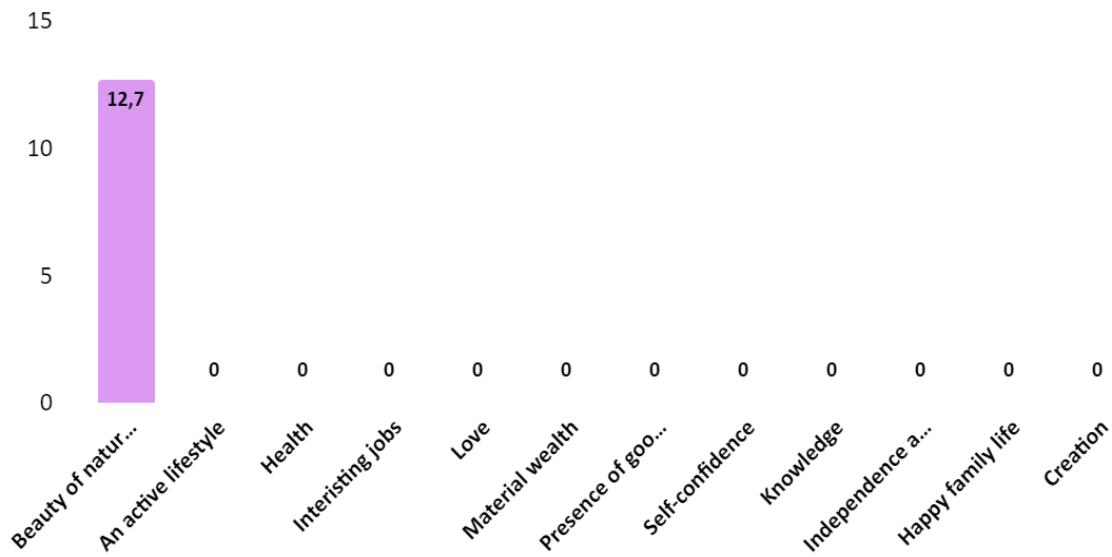


Figure 3. Assessing the feeling of inner emptiness in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova

As shown in Figure 3, the feeling of inner emptiness is related only to Beauty of nature and art.

### Assessing the feeling of inner emptiness in Moldovan immigrant adolescents in Italy

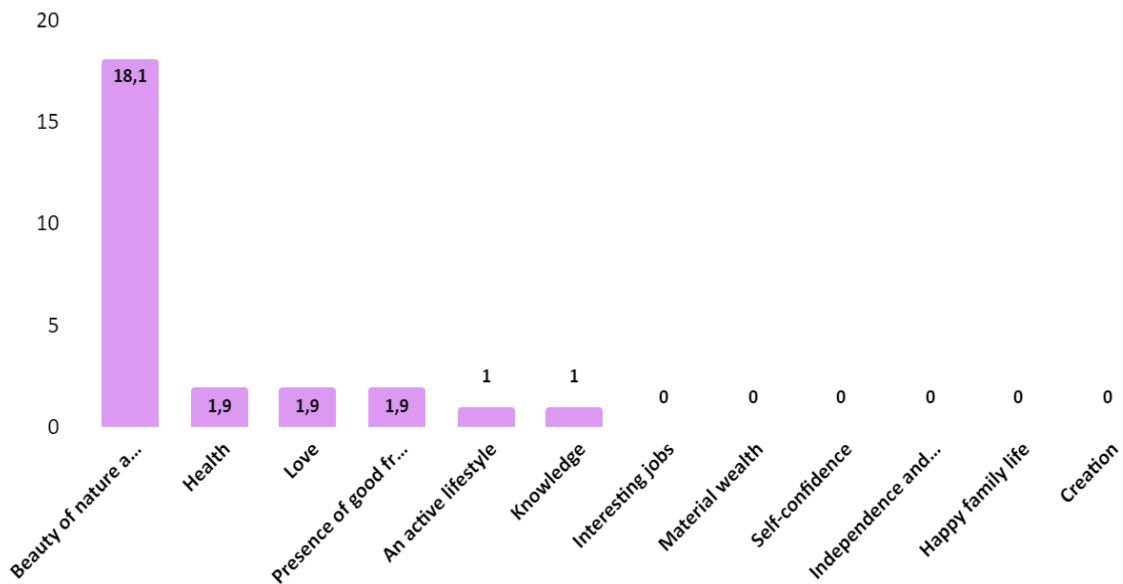


Figure 4. Assessing the feeling of inner emptiness in Moldovan immigrant adolescents in Italy

Figure 4 shows that immigrant adolescents have more inner conflicts than feelings of inner emptiness. The most pronounced feeling of inner emptiness is related to *The beauty of nature and art*.

Of particular interest is the degree of interdependence between *value* and *availability* of spheres of life for adolescents. This concept is based on the fact that the determining factors of the personal motivational sphere are fluctuating and gradually change depending on the circumstances of life, between the two planes of consciousness: the plan containing awareness of values, personal intentions, objectives for the future and

the plan related to accessibility, implementation of specific objectives, easily achievable, located in "visible psychological field" (Secheiko, 2018, pp. 9-14). In this sense, "value" and "availability" are not polar characteristics of the personal motivational sphere, but on the contrary, the stimulating power of different motives and the presence of inner conflicts, related to certain spheres of life, which largely depend on the nature of the relationship between "value" and "availability", reflecting the degree of mismatch and disintegration in the motivational sphere. As a result, this indicates the level of dissatisfaction with the current life situation, the presence of inner conflicts, the blockage of basic

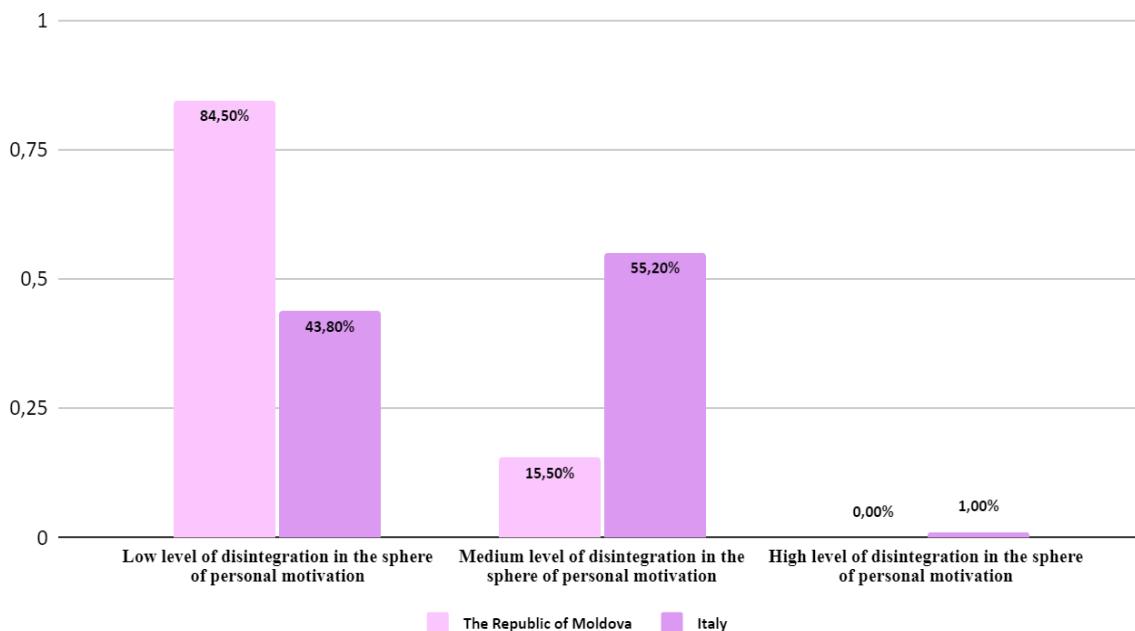
needs, on the one hand, and the level of self-realization, self-harmony, integration and internal identity, on the other.

Therefore for optimal assessment, it is important to recognize the nature and degree of dissociation (discrepancy) between "valuable" and "available", con-

nected to the main spheres of life, namely the divergence between what "is now" and what "should be", between "I want" and "I have", as well as between "I will" and "I can".

A picture of the levels of disintegration in the personal motivational sphere is shown in Figure 5.

### Levels of disintegration in the sphere of personal motivation in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova and Moldovan immigrant adolescents in Italy



*Figure 5. Levels of disintegration in the sphere of personal motivation in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova and Moldovan immigrant adolescents in Italy*

Figure 5 shows that 84,5% of adolescents in the Republic of Moldova have a low level of disintegration in the sphere of personal motivation and 15,5% - medium level, while 43,8% of immigrant adolescents in Italy have a low level, 55,2% - medium level and 1,0% - high level.

Thus, in order to portray the complexity of the feeling of disintegration in the motivational sphere, present in the profile of the contemporary adolescent, we have resorted again to comparisons of the level of disintegration in the sphere of personal motivation (R) in Moldovan adolescents in the Republic of Moldova and Moldovan adolescents in Italy, which we obtained using the Mann-Whitney U Test.

Therefore, based on the obtained result ( $U=3414$ ,  $Z=-6,246$ ,  $p<0,001$ ) following the comparisons of disintegration levels in the sphere of personal motivation, we observed the existence of significant differences between the two groups of adolescents, where Moldovan adolescents in Italy have a significantly higher level of disintegration than adolescents in the Republic of Moldova.

In order to have a clearer picture, we tried to compare the levels of disintegration in the sphere of personal motivation according to gender and place of living. Thus, after comparing the level of disintegration in the sphere of personal motivation (R), obtained by adolescent girls and adolescent boys in Italy  $U$

( $U=1156,5$ ,  $Z=-1,330$ ,  $p=0,183 >0,05$ ), we noticed the lack of statistically significant differences in this regard. However, statistically significant differences were observed between adolescent girls and adolescent boys in the Republic of Moldova ( $U=1036$ ,  $Z=-3,958$ ,  $p<0,001$ ), where adolescent boys have demonstrated a significantly higher level of disintegration, compared to adolescent girls.

At the same time, we compared the results obtained by Moldovan adolescent girls in the Republic of Moldova and Moldovan adolescent girls in Italy. In this sense, statistically significant differences ( $U=801,5$ ,  $Z=-5,472$ ,  $p<0,001$ ) are highlighted. Thus, Moldovan adolescent girls in Italy had a significantly higher level of disintegration than adolescent girls in the Republic of Moldova. The same thing was noted in the results of comparisons between Moldovan adolescent boys in the Republic of Moldova and Moldovan adolescent boys in Italy ( $U=943$ ,  $Z=-2,921$ ,  $p<0,01$ ). In this regard, having confirmed the existence of statistically significant differences, we can state that Moldovan adolescent boys in Italy show a significantly higher level of disintegration than Moldovan adolescent boys in the Republic of Moldova.

#### CONCLUSIONS

1. In terms of internal psychological tension, related to certain spheres of life, the number of adoles-

cents with inner conflicts, both in the Republic of Moldova and in Italy, is quite high. In this sense, it is remarkable that some spheres of life, for both groups of young people, generate anxiety and psychological concern, which suggests the distrust of young people in certain institutions and systems, which are influenced by both the Moldovan and Italian social context.

2. Based on the interdependence between the value and availability of spheres of life, the levels of disintegration in the motivational sphere of adolescents were outlined, which reflects their state of dissatisfaction with the current situation regarding the spheres of life, the presence of conflicts and internal blockages related to self-realization, integration and identity. Thus, the majority of adolescents in Moldova have a low level of disintegration in the sphere of personal motivation, while adolescents in Italy, more than half, have a medium level. This translates into the fact that the characteristics of the sociocultural context in which the socialization of adolescents takes place have a significant impact on both their value sphere and inner motivation.

3. The comparative results of the levels of disintegration in the sphere of personal motivation according to gender and place of living reveal the following conclusions:

a) Adolescent boys in the Republic of Moldova demonstrate a higher level of motivational disintegration compared to adolescent girls in the Republic of Moldova;

b) Moldovan adolescent girls in Italy show a statistically significant higher level of disintegration compared to adolescent girls in the Republic of Moldova;

c) Moldovan adolescent boys in Italy have a higher level of motivational disintegration than Moldovan adolescent boys.

## References

1. Baciu, T. Caracteristica valorilor adolescenților din societatea moldovenească în proces de transformare. În: Formarea competențelor de rezolvare a problemelor psihologice în procesul instruirii inițiale și continuă a psihologilor, Chișinău, n. 43, 2014, pp. 57-76.
2. Roșca, T. Memoria migrației: interviu în profunzime cu adolescenții imigranți din diaspora moldovenească din Italia. În: Vector european, nr. 1, 2021, pp. 172-181;
3. Roșca, T., Caunenco, I. Identitatea etnică la adolescenții imigranți: continuitate vs discontinuitate. In: EcoSoEn, nr. 3-4, 2019, pp. 214-220.
4. Schwartz, S. H. Universals in the content and structure of values: Theoretical advances and empirical tests in 20 countries. In: Advances in experimental social psychology, New York, Academic Press, vol. 25, p. 1992, pp. 1- 65.
5. Secheiko, O. Conflictele intrapersonale a blogherilor: perspectivă psihologică. In: De Gruyter Open, 2018, pp. 9-14;
6. Tarnovschi, A. Particularitățile psihologice ale personalității copilului cu maladii respiratorii cronice. Teză de doctor în psihologie, Chișinău, 2017, pp.102-105.
7. Достанова, М. Н., Кнопре, Е. В., Климова, Е. А. Подросток на перекрестке эпох, М. Генезис, 1997.
8. Фанталова, Е. Б. Факторы возникновения внутриличностного конфликта у студенток старших курсов. In: Электронный научный журнал, Современные проблемы науки и образования, nr. 6, 2011.

# TECHNICAL SCIENCES

## DOMAIN-DRIVEN DESIGN AND HEXAGONAL ARCHITECTURE

**Jana Milojevic,**

*MSc., Master of organizational studies,*

*University of Belgrade,*

*Republic of Serbia*

**Ognjen Pantelic**

*PhD., Associate Professor,*

*University of Belgrade,*

*Republic of Serbia*

[DOI: 10.5281/zenodo.10573973](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573973)

### **Abstract**

The thesis Development of an application based on hexagonal architecture and Domain-Driven Design focuses on elaborating and analyzing key concepts and principles of Domain-Driven Design and their implementation through hexagonal software development architecture.

The first part of the paper is grounded in the theoretical description of Domain-Driven Design concepts and Hexagonal Architecture, also known as "Ports and Adapters" and "Clean" architecture. The thesis discusses the essence and significance of creating modular applications through the precise separation of public abstractions and implementation details, by isolating domain logic from infrastructure and utilized technologies. Additionally, the thesis also emphasizes the importance of logically segregating code into modules, communication via APIs, and the subsequent decoupling of application components. This is noted for its impact on the capabilities for code testing, the introduction of new features, and the upgrading or replacement of existing technologies and business functionalities, as well as the potential for transforming modules into individual microservices.

The aim of the paper is to address key concepts of Domain-Driven Design and hexagonal architecture and to consider the importance of encapsulation, abstraction, and protection of business logic from the rest of the system as their primary tenets. The theoretical part of the paper allows for the identification of the advantages of hexagonal architecture over monolithic, single-module software architecture, as well as potential challenges in its implementation and maintenance.

**Keywords:** Domain-Driven Design, Ports and Adapters, Hexagonal Architecture, development, architecture, modules.

### **Introduction**

The growth in size and the consequential complexity of business domains inevitably generates the necessity for adequate adaptation and redefinition of software, along with subsequent modifications of the business workflows without disruptions of the existing ones.

The growth of the codebase is directly correlated with the increase in software complexity, making it challenging to maintain the code in an organized and structured manner as per the initial design concepts. Throughout numerous development iterations, in the absence of strict adherence to architectural guidelines, maintaining separation of concerns and properly decoupling of classes and modules becomes increasingly challenging.

Addressing the previously mentioned issues, the foundation for elaborating on this work will be Domain-Driven Design and hexagonal architecture as approaches to software development with a significant degree of alignment between software artifacts and key business concepts and goals.

The paper "Domain-Driven Design and hexagonal architecture" pertains to the elaboration and analysis of key concepts and principles of Domain-Driven Design and their implementation through the hexagonal architecture.

The paper is based on a theoretical description of the concepts of DDD and hexagonal architecture, also known as "Ports and Adapters" and "clean" architecture. It explores the essence and significance of creating modular applications through the precise separation of public abstractions and implementation details, achieved by isolating domain logic from infrastructure and used technologies.

Furthermore, the significance of logically partitioning code into modules is underscored, emphasizing communication via APIs and the consequential decoupling of the application components. It highlights their impact on code testing capabilities, the introduction of new along with upgrading and replacing existing technologies and business functionalities, as well as the potential for transforming modules into individual microservices.

The goal of the paper is to delve into the key concepts of DDD and hexagonal architecture, exploring the significance of encapsulation, abstraction, and safeguarding business logic from the rest of the system as their primary tenets.

Additionally, the paper facilitates the identification of the advantages of the hexagonal architecture compared to monolithic and single-module software architecture, as well as potential challenges in its implementation and maintenance.

In the subsequent sections of the paper, the previously mentioned terminologies and their associated concepts will be thoroughly examined. Concretely, the paper will delve into DDD and hexagonal architecture, exploring their logical components, potential implementation scenarios, and offering a comprehensive mapping along with pertinent guidelines for integrating these models into a specific framework.

#### *Domain-driven design*

The rising complexity trend in contemporary business domains undoubtedly necessitates the need for adequate alignment of software, accompanied by subsequent modifications, while simultaneously preserving the integrity of the software and ensuring its compliance with current business processes.

The technical aspects of software, coupled with factors such as the absence or inadequately defined documentation, unclear and ambiguous goals, and resource constraints, may contribute to a negative impact on the potential complexity of the software. Furthermore, insufficient comprehension of the software, particularly as its complexity grows, may limit the possibilities for its secure adaptation and expansion.

To minimize risks and neutralize potential negative impacts stemming from the growth of software complexity, it is an imperative to exert effective control over complexity, involving appropriately defining software models and their corresponding architecture, while maintaining continuous monitoring and revision of the state and changes in its structure.

The key to successful complexity control lies in a robust model that transcends a superficial understanding of the domain by introducing a foundational structure (Santoso, 2018).

The term Domain-Driven Design was coined and established by Eric Evans in his seminal book "Domain-Driven Design: Tackling Complexity in Software" and it serves as a framework for systematically making design decisions in complex software domains.

The premises of the mentioned book are twofold, implying that the primary focus of most software projects should be on the domain and domain logic on one hand, and that complex domain design should be based on the domain on the other.

In line with the foregoing, DDD represents an approach to software development with a complex business domain that enables its efficient development, testing, maintenance, and modification, with its primary focus being the mapping of business concepts into software code by placing domain logic at the center of software development.

DDD pertains to the translation of business domain concepts into software artifacts (Penchikala, 2008) and is predominantly employed in applications where the domain model holds a pivotal role. In the realm of DDD, the domain model stands as the primary wellspring for designing and developing software that is intricately aligned with the business logic of the user domain, while concurrently downplaying the technical facets of the application (Hippchen, Giessler, Steinegger, Schneider & Abeck, 2017).

Additionally, DDD defines concepts and patterns that aid in the effective design of software in accordance with business requirements. It involves an approach to software development focused on various aspects of the domain – its structure, functions, logic, and language.

However, DDD does not prescribe a specific technology, methodology, or development approach; instead, it encompasses a set of concepts, principles, and best practices based on logically separating code into modules, isolating domain logic, and causally addressing technical and domain-related issues.

An architecture that separates technical concerns from domain concerns creates conditions for effectively adapting software to changes without undesired effects on unrelated parts of the code, enabling a cohesive design of individual components, making them simpler to interpret.

DDD provides a solid framework for designing and constructing business logic within the hexagonal architecture. The goal of DDD involves aligning software artifacts, such as design and documentation, with the business domain that the software addresses, resulting in the ability to swiftly respond to changing requirements driven by shifts in the business domain.

Additionally, with this development approach, the emphasis is placed on reducing technical debt, referring to the level of unnecessary complexity in the code. As well as this, elaborated concept can also encompass cruft, which represents the gap between the current code and the ideal setup of a software project (Vieira, 2022).

As previously mentioned, DDD fundamentally separates two spaces - the problem space and the solution space. The problem space abstractly models the primary business domain along with all its processes and dynamics. Within it, domain experts possess all the knowledge about these processes.

In contrast, the solution space corresponds to software artifacts and plays a role in the functioning and resolution of processes and issues in the problem space. When working in the solution space, to prevent misunderstandings in communication between developers and domain experts, a shared language is negotiated and adopted. This language represents more than just a glossary of terms, as it also defines the names of coding artifacts (e.g., class names), enabling interactive engineering sessions with domain experts.

However, adhering strictly and without further consideration to the aforementioned dictionary can, in many cases, lead to issues: What happens if different experts use the same lexicon to describe their domains (Vieira, 2022)?

By utilizing tools for tactical modeling, DDD also addresses the practical technical requirements of analysis and executive software development. These tools enable developers to create software that represents a tangible implementation of domain expert models, simultaneously being less prone to errors, scalable, and reliable. This approach generates a high likelihood of successful project completion within planned timelines (Vernon, 2012).

The effective implementation of DDD best practices relies on the existence of bounded contexts, a ubiquitous language, and related concepts (Vernon, 2012).

On the other hand, the inclination towards the functional classification of monoliths raises the question of how to identify stable, independent, and functional partitions along which decomposition is possible. DDD provides guidelines for the functional classification of domains, which, through the appropriate selection of subdomains and defining bounded contexts in software, also creates conditions for a sound technical decomposition. This technical decomposition is a prerequisite for breaking down the monolith and migrating to a microservices architecture (Lilienthal, 2019).

The decomposition of a system into modules or services is a challenging practical problem and a research question that has not been fully addressed yet. With the current trend towards microservices architecture, strategic DDD has become a popular technique for decomposing domains into so-called bounded contexts (Kapferer and Zimmermann, 2020).

The rise of complexity of monolithic software tends to reach a point where further improvements, upgrades, and maintenance become a significant burden. Single points of failure, characterized by potential breakpoints or bottlenecks resulting from the aforementioned challenges, encourage the fundamental engineering idea of dividing these monolithic applications into smaller services and eventually into microservices. This approach creates conditions for enhancing system performance and stability while simultaneously accelerating development cycles (Atanasov, 2017).

Overcoming the drawbacks related to the inconvenience of maintaining and upgrading new functionalities generated by monolithic architecture often entails and requires the reengineering of the current business system and its processes.

Specifically, and in line with the previously mentioned, the challenges of large and complex systems potentially find a solution in the migration of system components into separate entities – microservices. Their integration forms a distributed system of mutually independent individual services, with the potential for easier planning, development, upgrades, testing, and maintenance (Stojkov and Stojanov, 2021).

However, although microservices theoretically enable the single responsibility principle as one of the primary concepts of the SOLID architecture, the decomposition of existing services can lead to an accumulation of services and the creation of intricate relationships among them, increasing the overall system complexity (Mijušković, 2021).

The overarching issue with large software systems stems from their inherent complexity and the challenges associated with maintenance. In the early phases of development, the system's structure might not notably influence its performance and efficiency. Nevertheless, as the codebase anticipates growth in both scale and intricacy, the importance of sound architecture and structure becomes increasingly pivotal. Namely, a poorly defined and implemented architecture can result in difficulties comprehending the system.

A universal and pre-defined approach or strategy for transitioning from a monolithic to a microservices-based architecture does not exist. Nevertheless, examining common patterns observed in organizations that have successfully migrated their systems (Balalaie, Heydarnoori, Jamshidi, Tamburri, 2018) from monoliths to microservices can provide a valuable basis for understanding the strengths and weaknesses of implemented migration processes. This analysis can, in turn, aid in thoughtful consideration when making decisions about the planned migration for one's own system (Langurić and Zaki, 2022).

DDD provides several architectural patterns and templates, laying a solid foundation for creating "friendly" structured monoliths that can be transformed into microservices in a controlled manner. This generates conditions for a more comprehensive utilization of the benefits of both monolithic and microservices architectural concepts (Petrović, 2018).

Bounded context, one of the essential concepts in DDD, can be seen as a boundary that divides the domain model into zones, aiming to dissect and clarify potential ambiguities, uncertainties, and doubts that may arise during the development of domain-complex systems. Its purpose is to differentiate similar meanings without specific context in the domain model and clarify internal relationships within the defined context (Evans, 2004) (Newman, 2021).

However, when applying DDD to the development of microservices-based applications, several challenges may arise. Namely, DDD offers principles, patterns, activities, and examples for creating domain models as its key artifact. However, contrary to this, DDD does not provide a detailed and systematic development process for the application of these principles and patterns, nor does it categorize them within the field of software engineering (Hippchen, Giessler, Steinberger, Abeck, 2017).

In addition, there are no clear guidelines regarding the structuring of fundamental web application programming interfaces (web APIs), that, from a business perspective, hold strategic value. This underscores the need for them to be designed in a way that emphasizes quality (Iyer and Subramaniam, 2015).

DDD is a software development approach that emphasizes understanding the business domain and problem space, utilizing that understanding in the design and implementation of software. The primary idea of DDD is that software should reflect the real-world domain models, and the language and concepts used in creating software should align with those employed by domain experts, ensuring the proper alignment of the software with the business needs.

In DDD, the domain takes center stage in the development process, and it becomes the responsibility of the development team to closely collaborate with domain experts. The goal is to acquire a comprehensive and detailed understanding of the domain and its requirements. This understanding is then utilized to create a shared language and model that is suitable for use by all stakeholders involved in the software development process.

The software segment containing business logic and addressing specific domain problems usually represents only a small part of the overall software system, yet its importance is disproportionate to its size.

Layered architecture supported by DDD emphasizes the grouping of related functionalities within an application into distinct layers with a vertical hierarchy among them. Each layer is functionally connected to another with a shared role or responsibility, while their mutual communication is explicit and loosely coupled.

The principles underlying layered architecture involve abstraction, reusability, clearly defined functional layers, loose coupling, high cohesion, and encapsulation (Chavan, Murugan & Chavan, 2015).

However, unlike typical variations of layered architecture with conceptual layers, DDD entails isolating the domain logic from infrastructure and user interface layers. Namely, by isolating and shielding the domain layer, surrounded by the application layer, the model is enabled to encapsulate significant business knowledge.

When delving into DDD, it's crucial to recognize the essentiality and importance of maintaining architectural neutrality within both strategic and technical domain models. However, some form of architecture is still required around and between each model.

The hexagonal, "Ports and Adapters," or "clean" architecture, which will be elaborated on in the next section, involves an architectural solution that fully supports the concepts of DDD while simultaneously creating conditions for facilitating the implementation of service-oriented, REST, and Event-Driven architectures (Vernon, 2012).

Moreover, beyond just delineating responsibilities, the application architecture must abstract the intricacies of a complex domain. This higher-level abstraction serves to shield the presentation layer from the impact of changes in domain logic.

In contrast to typical layered architectural models, DDD envisions the core of the architecture as the domain layer, housing all the logic related to business operations. Surrounding it is the application layer, which abstracts the lower-level domain details through a coarse-grained application programming interface (API) representing the business scenarios of the application. Specifically, domain logic and the application layer are isolated and shielded from the incidental complexities of clients, frameworks, and infrastructure concerns.

In DDD, defining model boundaries involves establishing clear and unambiguous distinctions between various parts of the system. By identifying independent parts of the domain and forming bounded contexts, clear responsibilities are assigned to each, creating a well-organized domain model, resulting in easier development, maintenance, and scalability of the system, composed of smaller, manageable components.

In the realm of DDD architecture, the monolithic approach poses a potential pitfall as it amalgamates all bounded contexts into a single entity without establishing distinct physical boundaries between them. This inevitably results in the blurring of distinct language

boundaries meant to represent individual contexts, consequently allowing the intrusion of the language from one context into another (Turis, 2019).

To circumvent the aforementioned issue, it is essential to maintain separate bounded contexts with minimal dependencies, ideally employing an anti-corruption layer or open host service, ensuring a clear segregation among contexts.

In addressing the mentioned issue, DDD introduces the concept of a bounded context, implying the definition of logical boundaries within which specific conditions and rules are consistently applied. Furthermore, within these boundaries, all terms, definitions, and concepts constitute a ubiquitous language.

By modeling the domain within the boundaries of a bounded context, it becomes a transition area from the problem space to the solution space (Santoso, 2018). Furthermore, by partitioning business domains into bounded contexts, the application becomes more maintainable, achieving good practices of loose coupling and reusability.

Additionally, maintaining the integrity of domain models within bounded contexts is crucial for developing robust and sustainable software systems. Bounded contexts defined in DDD emphasize explicit boundaries within the software system, where each defined subdomain has its own language, rules, and implementation requirements.

Therefore, maintaining and safeguarding the integrity of each model within the system and clearly defining the boundaries of their responsibilities in the code are crucial for developing a software system guided by DDD. By associating models with specific contexts, i.e., bounded contexts, defined based on the team's language and physical artifacts, conditions are created to sustain the system consistently and meaningfully, also being pivotal in managing complexity within the solution space.

Although the benefits of DDD are clear, its implementation generates certain technical challenges, primarily related to the time required to establish conditions for creating a successful software structure, synchronization of knowledge between domain and software experts, complexity in defining the domain model, and other aspects of implementing the considered architectural pattern.

Specifically, the challenges of implementing DDD are reflected in the time and effort required to establish a ubiquitous language and involve domain experts in the software development process, enabling their collaboration with software experts (Vernon, 2012). Challenges also arise from the complexity of creating and decomposing models, the bulkiness of the aggregate root, and the increased complexity of developing microservices-based software systems using DDD compared to monolithic architecture (Liu, 2021).

To overcome the challenges mentioned, careful consideration of the system architecture is required, along with the application of bounded contexts. Bounded contexts facilitate a clear definition of boundaries and model responsibilities, easing the understanding and maintenance of the system and fostering collaboration within the team.

Although agile methodologies offer effective management approaches for software development, providing frameworks for successful software solution implementation, their deficiency in supporting architecture construction and management (Dingsøyr & Moe, 2014) (Rost, Weitzel, Naab, Lenhart & Schmitt, 2014) can result in unnecessary redesign, architectural divergence, functional redundancy, and a subsequent escalation in system complexity. Undoubtedly, this is a challenge that deserves careful consideration (Mocker, 2009).

Overcoming the discussed challenges and successfully coordinating work, as well as developing scalable and reliable systems, requires proper management and architectural planning throughout the development process.

DDD fosters an iterative and incremental collaborative process for architecture development in an agile manner, leading to the advantages of its adoption and implementation. Specifically, a significant advantage of embracing and applying a development process based on DDD lies in the agile and iterative development approach it supports. DDD effectively addresses the existence of a software development architectural pattern while concurrently adhering to the principles of agile development.

On the other hand, DDD enables and enhances simpler communication among members of the development team. Thanks to the ubiquitous language, com-

munication between engineers and domain experts becomes significantly smoother. By establishing a common and ubiquitous language connected to the domain model early on, conditions are created for easier communication among development teams throughout the entire project lifecycle (Miteva, 2020).

Given that DDD is heavily grounded in the concepts of object-oriented analysis and design, nearly everything within the domain model is object-based, emphasizing aspects of modularity and encapsulation. This allows different components or even the entire system to be modified and improved on a regular, continuous basis, highlighting the flexibility that DDD ensures (Karam, 2018).

### Hexagonal architecture

Layered architecture is one of the architectural solutions that supports the primary principles of software design. This architectural pattern represents the most general type of architecture for distributed systems, based on the idea of dividing the application into an arbitrary number of layers responsible for processing, data handling, and presentation, which can be separated physically and logically (Isailović, Stanković, Vasiljević & Ristić, 2021).

Despite the existence of diverse adaptations and interpretations of multilayered architecture to tailor the application structure to project requirements, the exclusive focus of DDD and hexagonal architecture will be on the hexagonal architecture as a representative of the considered architectural pattern.

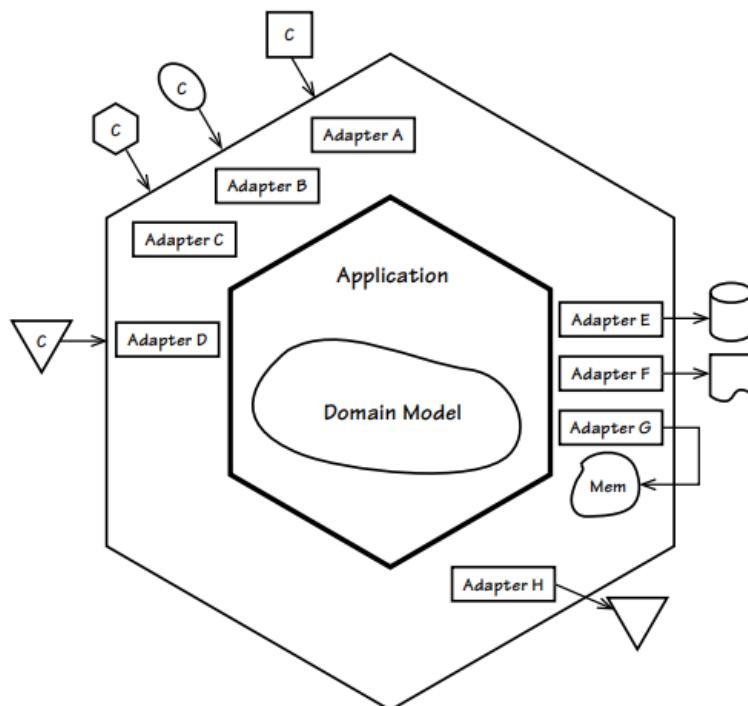


Figure 1 – Hexagonal architecture with domain model in its center (Vernon, 2012)

Hexagonal architecture, also known as "Ports and Adapters" or "Clean" architecture, is an example of layered software design with a primary emphasis on separating business logic from infrastructure and the technologies used. The hexagonal architecture defines three building blocks – the user interface, business logic, and infrastructure (Storožev, 2021).

Hexagonal architecture, initially proposed in 2007 by Alistair Cockburn, a co-author of the Agile Manifesto, seeks to overcome the limitations of layered architecture. This architectural approach isolates the business logic and places it at the core (referred to as the core application in hexagonal architecture), exposing interfaces known as ports (Kolařík, 2019).

Cockburn's premise, as the originator of hexagonal architecture, underscores the application's versatility in being driven by users, programs, automated tests, and batch scripts. Importantly, it allows for independent development and testing, detached from the intricacies of infrastructure and specific technologies (Cockburn, 2005). Additionally, Cockburn emphasizes the need to separate the domain layer from the external world, including frameworks, user interfaces, and other technological and infrastructural details (Ilić, 2021).

Between the port and the external system lies an adapter that connects the business logic port to a specific technology (for example, a Data Access Object -

DAO - an abstract interface for a database). In this scenario, the core application is independent of the adapter, creating conditions for their easy interchangeability, such as substituting a generic Object Relational Mapping (ORM) for an optimized DAO (Kolařík, 2019). Furthermore, the architecture operates in a way that more than one adapter can be associated with a specific port (for example, the same business logic operation can be invoked either through a received message or a REST call) (Kolařík, 2019).

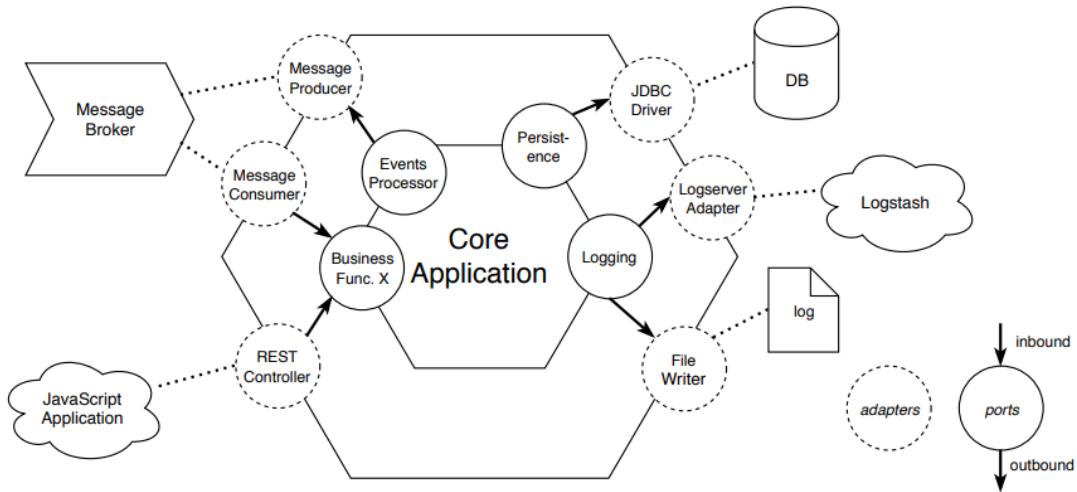


Figure 2 – Hexagonal architecture (Kolařík, 2019)

Although the term "hexagonal architecture" may sound complex, it actually represents a concisely defined design pattern where services, as components of business logic, do not communicate directly with external resources. Instead, services housed in the core of the application communicate with the layer of boundary interfaces, to which external services also connect to communicate with the interior of the application (Stojanović & Simović, 2019).

Hexagonal architecture fundamentally embodies a way of thinking, organizing, and modeling applications. It emphasizes an architectural pattern that involves centralizing the domain model at the core of the application and isolating it from technological code. This makes the software more resilient to changes, facilitates its continuous development, and allows the addition of new technologies without the need for significant refactoring (Vieira, 2022).

To prevent the leakage of technological details into the application core, protect business logic, and preserve its integrity, the concept of ports and adapters is used as a mediator between layers, where ports represent abstractions and adapters represent their concrete implementations (Callaway & Hunt, 2018).

Ports operate in two directions – inbound, managing calls to business logic from the external world by exposing core logic through a service interface, and outbound, defining how business logic communicates with the external world (Kolařík, 2019).

Adhering to hexagonal principles allows for structuring software in a way that reduces the effort needed

for understanding and maintaining code. Additionally, due to the specified architecture setup and adherence to the principles of dependency inversion, the code at the highest level is not dependent on the implementation of lower levels.

Hexagonal architecture involves an adapter layer that acts as a translation between the hexagon model and the external world in relation to it. Specifically, external systems communicate through ports with adapters, which then transform the request and forward it to the model.

Figure 2 illustrates that each type of client has its own adapter that transforms input protocols into inputs compatible with the application's internal API. Each side of the hexagon represents a different type of port, whether it is an input or an output. Three client requests arrive through the same type of input port (adapters A, B, and C), while one uses another type of port (adapter D). A possible assumption is that the first three use HTTP (browser, REST, SOAP, etc.), and the fourth uses AMQP (for example, RabbitMQ).

Hexagonal architecture does not explicitly define what a port signifies, making it a flexible concept. Any partitioning of ports involves receiving client requests and transforming their input by the adapter, after which it invokes an operation or sends an event to the application, transferring further control internally.

Additionally, a crucial note about the implementation of hexagonal architecture relates to its formation independently of the number of supported clients, relying solely on defined use cases. Therefore, any number

and type of clients can send requests through different ports, but each adapter delegates them to the application using the same API (Vernon, 2012).

The application receives client requests through its public API, and the boundaries of the application, defined by the internal hexagon, simultaneously represent the boundaries of the use case. In other words, use cases should be based on the functional requirements of the application, isolating them from the number of different clients or output mechanisms.

When the application receives a request through its API, it utilizes the domain model to fulfill all requests that involve executing business logic, meaning that the application's API is formed as a set of application services that are direct clients of the domain model (Vernon, 2012).

Large and complex applications require the existence of multiple entities, models, services, and code in general. Following the Separation of Concerns (SoC) principle involves separating the code into multiple parts based on the responsibilities they possess. As previously mentioned, this ensures the sustainability and smooth growth of the application, allowing for easier replacement of functionalities within the application.

Separating architecture using ports and adapters allows for easy modification and upgrades without touching the business logic. Additionally, achieving a multilayered architecture is desirable in the context of software maintenance and upgrades while simultaneously facilitating easier testing of the application without the need for connected elements (for example, the entire application can be tested in a black-box manner without the need for a database) (Kolařík, 2019).

Namely, the architecture setup based on separating domain logic from infrastructure and utilized technologies enables it to be independent of implementation details, making it suitable for testing without any dependencies on other systems. Specifically, business rules can be tested without the user interface, database, or any other external element (Konuklar, 2020).

Moreover, developing the fundamental business logic independently of external interfaces simplifies the process of making system changes without concerns about impacting other interfaces and testing can be conducted seamlessly without the need for configuring or adjusting external interfaces (Słomka, 2020).

#### *Hexagonal architecture and DDD*

DDD and hexagonal architecture, also known as the Ports and Adapters architecture, are software design approaches aimed at creating software systems that are not only easy to comprehend, maintain, and evolve but are also more flexible, sustainable, and aligned with the specific needs of the business domain. These approaches complement each other, providing a powerful combination for building robust and adaptable software systems.

At a high, abstract level, hexagonal architecture is employed to separate the business logic of an application from the technical implementation details and its infrastructure. Concurrently, DDD offers a systematic approach to establishing a shared understanding of the business domain and its modeling through code.

In hexagonal architecture, the application core is encircled by a set of ports (interfaces) that define how to access the application core, along with a set of adapters connecting the application core to external systems like databases or user interfaces. The application core houses the system's business logic, independent of any specific technology or infrastructure.

When combining these two approaches, hexagonal architecture distinctly separates the business logic from the technical intricacies of its infrastructure, while DDD establishes a common language and comprehension of the business domain. This proves vital in shaping and guiding the design and implementation of the application core. Both design approaches are employed to craft software systems that align with business requirements. However, despite notable similarities, there are also key distinctions between the two approaches.

Indeed, DDD focuses on establishing a shared understanding of the business domain and leveraging it to guide software design. On the other hand, hexagonal architecture concentrates on separating and isolating the business logic of the application from its technical implementation details.

Related to previously stated, particularly within the realm of architectural layers and the dependencies generated among them, hexagonal architecture typically implies a clear distinction between the application core and the surrounding layers of ports and adapters. In contrast, DDD centers its focus on organizing code around the business domain, and the approaches to structuring the application itself can vary based on the specific needs of the domain.

Hexagonal architecture supports the application of DDD principles. Specifically, by separating the application logic from the input/output logic, domain objects can be developed independently of the user interface or database technology, promoting a clear separation of concerns (Słomka, 2020).

Additionally, in line with the concepts of DDD, hexagonal architecture advocates for test-driven development (TDD) by isolating the application logic from input/output logic and providing the conditions for easier writing of unit tests to verify functionality independently of other parts of the system.

In essence, hexagonal architecture not only encourages the utilization of DDD principles but also promotes test-driven development (TDD). By emphasizing these practices, the architecture seeks to establish a clear separation of responsibilities, fostering the creation of a more scalable and maintainable system, as highlighted by Słomka in 2020.

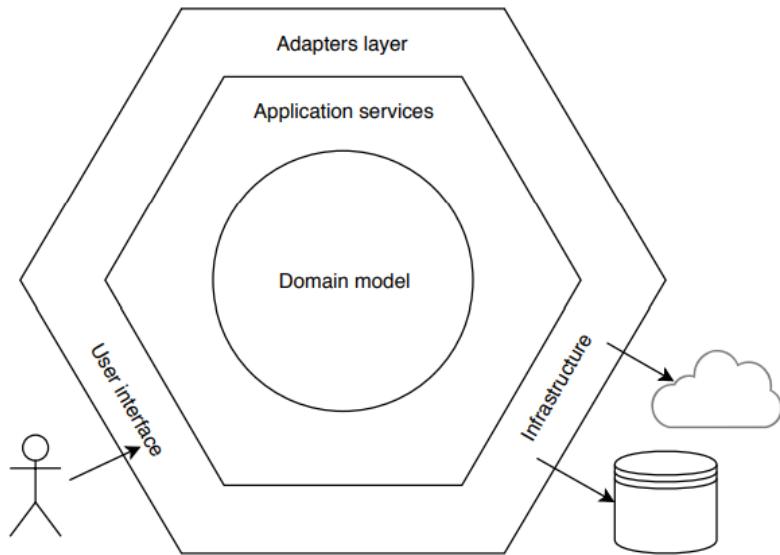
#### *Implementation of hexagonal architecture*

Current practices in implementing hexagonal architecture encompass variations in its application. While it can be employed at the system level, akin to a layered architecture, such an approach may diminish the primary advantages elucidated in the earlier sections of this paper.

A noteworthy example of best practices in hexagonal architecture involves crafting a hexagon within a bounded context, as depicted in the subsequent illustra-

tion. This implementation not only allows but also accentuates enhanced scalability of the application, drawing parallels with the scalability achieved through layers at the bounded context level in a layered architecture.

Ports will function as a communication channel between bounded contexts, while the role of a protective, anticorruption layer will be assumed by adapters,



*Figure 3 - Hexagonal architecture with one bounded context (Turis, 2019)*

The organization of system components and the consideration of forming software architecture as a monolith or microservices are ongoing discussions within the software community. Historically, when issues such as expensive computing resources and limited network bandwidth influenced software architecture, there was a tendency to consolidate numerous responsibilities into a single software unit to optimize the utilization of available resources and prevent network overload.

In the process of structuring the system, the seemingly simplest solution involves consolidating everything into one place, resulting in a monolithic architecture. This architecture ensures that the software is designed to be self-contained and independent (Rouse, 2016).

The advantages of this pattern lie in its self-contained nature-facilitating rapid development, especially in the initial phase, and straightforward implementation since only one component is involved. Additionally, the entire development occurs in the same location, such as a single virtual machine, eliminating delays in system calls caused by network-related obstacles and consequently achieving higher throughput compared to distributed systems (Turis, 2019).

However, precisely because everything is in one place, this architecture introduces inherent drawbacks. The development of the system as a single entity increases the likelihood of generating interconnected and interdependent code. Additionally, the inability to horizontally scale the system due to its size poses significant challenges associated with monolithic architecture. Specifically, adding another machine to support an isolated part of the system becomes unfeasible as it

generating conditions to preserve the integrity of the model within the bounded context and preventing the leakage and limitation of logic from one bounded context to another (Turis, 2019).

represents a bottleneck (Turis, 2019). The accumulation of responsibilities and the system's increasing complexity pose a serious risk of system failure, underscoring the importance and necessity of appropriately aggregating responsibilities in monolithic systems.

Monolithic architecture, despite occasional skepticism, can prove highly beneficial when applied judiciously, especially for smaller-scale systems that don't demand extensive scalability. Martin Fowler even advocates initiating application development with a monolithic architecture and transitioning to a more distributed solution only when the system's complexity surpasses the feasibility of remaining as a unified entity.

Reassessing monolithic software architecture and decomposing a sizable monolith into smaller, more manageable, and sometimes autonomous software components, often isolated within specific operational environments, yields substantial advantages in terms of the earlier-discussed separation of responsibilities. Nevertheless, alongside these benefits, it introduces considerations about managing complexity distributed across a network.

Hexagonal architecture can be applied to both monolithic and distributed systems. The hexagon contains elements responsible for describing the problems that the software addresses. Entities and value objects are key elements and fundamental concepts of DDD and hexagonal architecture. Entities represent things with an assignable identity, while value objects represent immutable components used to form the mentioned entities.

#### Discussion

DDD involves a holistic approach to software development with complex domain logic that requires a detailed and heterogeneous set of information sources,

knowledge, and expertise to ensure complete alignment of software with business priorities. Equally important, adopting a layered architecture guided by DDD results in technical design that is easier to maintain and upgrade, potentially extending the product's life cycle.

DDD, not being a "silver bullet" nor universal solution, is not suitable for straightforward software lacking a complex domain and without the need for an approach tailored to solving multiple problems. In contrast, DDD is not the right choice for a development approach in simple software without a complex domain where there is no need to implement an approach oriented towards solving multiple problems. However, contrary to the aforementioned, when designing and developing long-term software with significant domain complexity, where there are clear benefits from establishing a common language for information transfer in the development process, adopting DDD concepts may be of vital importance.

By adopting DDD, the development team gains the ability to construct a comprehensive overview of the project. This approach aids in coordinating software development aligned with business requirements, ensuring the creation of a comprehensive product without compromising its quality. Additionally, it assists in maintaining consistency throughout the entire design process, simplifying intricate issues and effectively bridging the gap between the business and technical facets of the development process.

The increase in interest and focus on the DDD theme results from the industry's shift towards developing microservices software architecture. Bounded contexts and the overall domain philosophy described in DDD are aimed at addressing the challenges of transitioning from outdated monoliths to microservices or constructing new platforms based on microservices architecture from scratch, leveraging the benefits of decentralization and loosely connected execution units.

Microservices architecture offers significant advantages over traditional architectures, ensuring scalability, accessibility, and flexibility. Although the hexagonal architecture was initially considered for monolithic applications, there is no doubt that the benefits of its use are well reflected in microservices architecture.

The entire discussion on the selection of software architecture becomes relevant due to the potential for generating conditions for the long-term maintenance and development of software. The hexagonal architecture is a design pattern for creating sustainable and adaptable software applications, ensuring a simultaneous reduction in complexity and the achievement of flexibility in the software system by separating the application logic from infrastructure and external dependencies.

However, despite being intended for complex software with detailed and intricate business logic, the hexagonal architecture can certainly ensure the long-term stability and scalability of applications with slightly less complexity. The proper implementation of the hexagonal architecture and related concepts from other development frameworks such as DDD, on which the mentioned architecture is based, can undoubtedly bring

significant value to the system and the enterprise as a whole.

Finally, the demonstration of communication between unrelated modules is ensured by the hexagonal architecture, providing enhanced ease of maintenance and the capability to change any part of the application without fear of regression in another part. The design and implementation of intricate software not only adhere to the architectural pattern proposed by DDD and the hexagonal architecture but also encapsulate the broader perspective inherent in the entire development paradigm.

## References

1. Atanasov, M. (2017), Pucanje monolitnih aplikacija i potreba za mikroservisima, dostupno na: <https://startit.rs/pucanje-monolitnih-aplikacija-i-potreba-za-mikroservisima/>
2. Balalaie, Armin & Heydarnoori, Abbas & Jamshidi, Pooyan & Tamburri, Damian & Lynn, Theodore. (2018). Microservices migration patterns. Software: Practice and Experience. 48. 10.1002/spe.2608., dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/326601142\\_Microservices\\_migration\\_patterns](https://www.researchgate.net/publication/326601142_Microservices_migration_patterns)
3. Callaway, J., & Hunt, C., (2018), Practical Test-Driven Development using C# 7: Unleash the power of TDD by implementing real world examples under .NET environment and JavaScript. Birmingham: Packt Publishing, dostupno na: <https://www.oreilly.com/library/view/practical-test-driven-development/9781788398787/>
4. Cockburn, A., (2005), "Hexagonal architecture," [alistair.cockburn.us](http://alistair.cockburn.us/Hexagonal+architecture), dostupno na: <http://alistair.cockburn.us/Hexagonal+architecture>
5. Chavan, P. U, Murugan, M. and Chavan, P. P., "A Review on Software Architecture Styles with Layered Robotic Software Architecture," 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation, 2015, pp. 827-831, doi: 10.1109/ICCUBEA.2015.165., dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7155963>
6. Dingsøyr, T., Moe, N.B.: Towards principles of large-scale agile development. In: Dingsøyr, T., Moe, N.B., Tonelli, R., Counsell, S., Gencel, C., Petersen, K. (eds.) XP 2014. LNBP, vol. 199, pp. 1–8. Springer, Cham (2014), dostupno na: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14358-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14358-3_1)
7. Evans, E., (2004), Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software. Addison-Wesley, ISBN: 0321125215, dostupno na: <https://www.oreilly.com/library/view/domain-driven-design-tackling/0321125215/>
8. Hippchen, B., Giessler, P., Steinegger, R., Schneider, M., Abeck, S., (2017), Designing Microservice-Based Applications by Using a Domain-Driven Design Approach. International Journal on Advances in Software (1942-2628). 10. 432 - 445., dostupno na: [https://cm.tm.kit.edu/download/domain\\_driven\\_micro\\_service-architecture.pdf](https://cm.tm.kit.edu/download/domain_driven_micro_service-architecture.pdf)
9. Ilić, G., (2021), Razvoj web aplikacije za pretraživanje jeftinih avionskih letova, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike Varaždin,

- dostupno na: <https://repozitorij.foi.unizg.hr/islandora/object/foi:6792/datastream/PDF/view>
10. Isailović, S., Stanković, M., Vasiljević, D., Ristić, L., (2021), Osnove distribuiranih sistema i distribuiranog programiranja, Metodologija stručnog i naučnog rada, Matematički fakultet, dostupno na: [http://www.programskijezići.matf.bg.ac.rs/seminarski/teorija/03\\_DistribuiraniSistemi\\_IsailovicStankovicVasiljevicRistic.pdf](http://www.programskijezići.matf.bg.ac.rs/seminarski/teorija/03_DistribuiraniSistemi_IsailovicStankovicVasiljevicRistic.pdf)
  11. Iyer, B., Subramaniam, M., (2015), "The Strategic Value of APIs," dostupno na: <https://hbr.org/2015/01/the-strategic-value-of-apis>
  12. Kapferer, S., Zimmermann, O. (2020). Domain-Driven Service Design. In: Dustdar, S. (eds) Service-Oriented Computing. SummerSOC 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1310. Springer, Cham, dostupno na: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64846-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64846-6_11)
  13. Karam, L. M., (2017), An Introduction to Domain Driven Design and Its Benefits, dostupno na: <https://dzone.com/articles/an-introduction-to-domain-driven-design-and-its-be>
  14. Kolařík, V., (2019), Applying the Normalized Systems Theory on Microservice Architecture, dostupno na: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81234/F8-DP-2019-Kolarik-Vincenc-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
  15. Konuklar, T., (2020), Hexagonal (Ports & Adapters) Architecture, dostupno na: <https://medium.com/idealo-tech-blog/hexagonal-ports-adapters-architecture-e3617bcf00a0>
  16. Langurić, M., Zaki, L. (2022), Migrating monolithic system to domain-driven microservices Developing a generalized migration strategy for an architecture built on microservices, KTH School of Engineering Sciences in Chemistry, Biotechnology and Health, dostupno na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1666477/FULLTEXT01.pdf>
  17. Lilenthal, C., (2019), From monoliths to modular architectures and microservices with DDD, dostupno na: <https://jaxlondon.com/blog/from-monoliths-to-modular-architectures-and-microservices-with-ddd/>
  18. Liu, A., (2021), Domain Driven Design(DDD) and Microservice decomposition, dostupno na: <https://masteranyfield.com/2021/07/28/domain-driven-designddd-and-microservice-decomposition/>
  19. Mijušković, V. (2021), Mainstream stručnjak odgovara na vaša pitanja o mikroservisima – šta treba znati pre upuštanja u ovu avanturu?, dosupno na: <https://www.netokracija.rs/mikroservisi-184922>
  20. Miteva, S., (2020), The Concept of Domain-Driven Design Explained, dostupno na: <https://dev.to/microtica/the-concept-of-domain-driven-design-explained-1ccn>
  21. Mocker, M., (2009), What is complex about 273 applications? untangling application architecture complexity in a case of European investment banking.
- In: 2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences HICSS 2009, pp. 1–14. IEEE
22. Newman, S. (2015). Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media. ISBN: 978-1491950357, dostupno na: <https://www.oreilly.com/library/view/building-microservices-2nd/9781492034018/>
  23. Penchikala, S., (2008), Domain Driven Design and Development In Practice, dostupno na: <https://www.infoq.com/articles/ddd-in-practice/>
  24. Petrović, A. (2018), DDD i CQRS u fokusu septembarskog Java meetupa u Startit Centru Beograd, dostupno na: <https://startit.rs/java-meetup-u-beogradskom-startit-centru/>
  25. Rost, D., Weitzel, B., Naab, M., Lenhart, T., Schmitt, H., (2015), Distilling best practices for agile development from architecture methodology. In: Weyns, D., Mirandola, R., Crnkovic, I. (eds.) ECSA 2015. LNCS, vol. 9278, pp. 259–267. Springer, Cham (2015), dostupno na: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23727-5>
  26. Rouse, M, (2016). monolithic architecture, dostupno na: <https://whatis.techtarget.com/definition/monolithic-architecture>
  27. Santoso, P.C., (2018), Breaking Complexity Using Domain-Driven Design, dostupno na: <https://www.mitrais.com/news-updates/breaking-complexity-using-domain-driven-design/>
  28. Stojanović, S. & Simović, A., (2019), Serverless Applications with Node.js Using AWS Lambda and Claudia.js, Manning Publications, dostupno na: <https://www.manning.com/books/serverless-applications-with-node-js>
  29. Stojkov, A., & Stojanov, Z. (2021). Pregled metoda za migraciju softverskih sistema na mikroservisnu arhitekturu. Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC), 11(2), 152–162. <https://doi.org/10.5937/jemc2102152S>
  30. Storožev, M., (2021), Exploration of Techniques to Visualise Code Quality, University of Tartu
  31. Słomka, K. (2020), Using Hexagonal Architecture and DDD together for robust software design, dostupno na: <https://blog.slomka.pro/using-hexagonal-architecture-and-ddd-together-for-robust-software-design-d4b06a9beec3>
  32. Turis, M., (2019), Domain-driven design with architectural patterns, Masaryk University, Faculty of Informatics, dostupno na: <https://is.muni.cz/th/agyz7/Thesis-Turis.pdf>
  33. Vernon, V. (2012). Implementing domain-driven design. Place of publication not identified: Addison-Wesley Professional, dostupno na <https://media.oiipdf.com/pdf/152e8f22-51e8-4e04-86c9-1de1f6820e4b.pdf>
  34. Vieira, D., (2022), Designing Hexagonal Architecture with Java : An architect's guide to building maintainable and change-tolerant applications with Java and Quarkus, Packt Publishing, ISBN-13 9781801816489, ISBN-10 1801816484

**AUTO-WAVE PHYSICS OF PLASTICITY****Zuev Lev Borisovich,***Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk***Barannikova Svetlana Aleksandrovna,***Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk***Gorbatenko Vadim Vladimirovich***Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia, Tomsk*[DOI: 10.5281/zenodo.10573989](https://doi.org/10.5281/zenodo.10573989)**АВТОВОЛНОВАЯ ФИЗИКА ПЛАСТИЧНОСТИ****Зуев Лев Борисович***Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск***Бараникова Светлана Александровна***Доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск***Горбатенко Вадим Владимирович***Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск***Abstract**

The paper deals with the questions of the plastic flow nature in solids, being associated with the development of localized plastic flow. It is shown that plastic flow localization is a common feature of all deformation processes and can be observed throughout the process. Specific localization pictures - patterns of localized plastic flow - are autowaves that are generated in a deformed medium by ordering its defect structure. Localized plasticity patterns correlate with the work hardening stages revealed in mechanical tests. A two-component model of the development of localized deformation was proposed and analyzed to take into account the interaction of the elastic and plastic deformation components. This model describes the generation of localized plasticity autowaves in a number of materials. General regularities of the development of localized plastic flow at different stages of work hardening are found. An elastic-plastic strain invariant is introduced to relate the elastic and plastic properties of materials. It is shown that basic properties of deformed media result from this invariant.

**Аннотация**

В статье рассматриваются вопросы природы пластического течения в твердых телах, связанные с развитием локализованного пластического течения. Показано, что локализация пластического течения является общим признаком всех деформационных процессов и может наблюдаться на все протяжении процесса. Специфические картины локализации - паттерны локализованного пластического течения - являются автоволнами, которые генерируются в деформируемой среде за счет упорядочения ее дефектной структуры. Паттерны локализованной пластичности коррелируют со стадиями деформационного упрочнения, выявляемыми при механических испытаниях. Предложена и проанализирована двухкомпонентная модель развития локализованной деформации, учитывающая взаимодействие упругой и пластической компонент деформации. В рамках этой модели описана генерация автоволн локализованной пластичности в ряде материалов. Установлены общие закономерности развития локализованного пластического течения на разных стадиях деформационного упрочнения. Введен упругопластический инвариант деформации, устанавливающий взаимосвязь между упругими и пластическими свойствами материалов. Показано, что основные свойства деформируемых сред являются следствиями такого инварианта.

**Keywords:** plasticity, synergistics, metal, alloy, deformation, hardening, defects**Ключевые слова:** пластичность, синергетика, металл, сплав, деформация, упрочнение, дефекты**1. Введение**

Природа пластической деформации твердых тел остается одной из наиболее сложных и интересных проблем физики и механики конденсированных сред [1-3]. Научная сторона интереса к ней определяется тем, что природа пластичности является неотъемлемой частью понимания природы

твердого тела, необходимой, в частности, для прогнозирования формы его комплексного отклика на внешние воздействия разного типа. Кроме того, фактические знания о природе пластических свойств необходимы для оптимизации технологий обработки металлов давлением, расчетов поведения материалов в экстремальных условиях и других прикладных целей.

Стандартные подходы к проблеме пластичности основаны обычно на адекватном выборе соответствующих упрощенных моделей. Такой выбор чаще всего обоснован только прагматически и призван обеспечить решение тех или иных частных задач, связанных с пластическим формоизменением конкретных материалов. Подобные подходы в большинстве своем остаются совершенно неудовлетворительными при попытках универсального описания характера феномена пластичности в целом.

Такое положение вызвано хорошо известными трудностями корректного учета важных свойств пластически деформируемой среды, препятствующими успешному использованию упрощенных моделей [4, 5]. Анализируя их, прежде всего следует указать на *нелинейность* деформируемой среды, под которой на макроскопическом уровне имеется ввиду сложная форма связи между напряжениями и деформациями при пластическом течении на разных масштабных уровнях. На дислокационном уровне нелинейность приводит к прерывистому развитию деформации, начиная со скачкообразного движения индивидуальных дислокаций и заканчиваая скачками деформации при реализации эффекта Портевена-Лешателье [3].

Кроме того, пластически деформируемая среда является *активной* [6]. В применении к рассматриваемой проблеме активность подразумевает наличие в среде концентраторов упругих напряжений, которые можно рассматривать как распределенные по объему источники потенциальной энергии. При пластическом течении эти области релаксируют (распадаются), порождая новые дислокации и их ансамбли, играющие роль новых концентраторов. В общем случае активные среды способны к самоорганизации, то есть, к самопроизвольному формированию структур [7].

Представления о сложности деформируемой среды дополняются тем, что она обладает долговременной памятью о внешних механических воздействиях. Природа этой памяти также определяется необратимыми процессами рождения дислокаций и формирования ансамблей решеточных дефектов. Это значит, что при пластическом течении в материале существуют *нелинейно связанные упругие*  $\varepsilon_{el}$  и *пластические*  $\varepsilon_{pl}$  деформации, в значительной степени различающиеся величиной, так что  $\varepsilon_{el} \ll \varepsilon_{pl}$ , а также своей природой. В ходе упомянутых выше актов релаксации концентраторов напряжений упругая деформация

переходит в пластическую, так что  $\dot{\varepsilon}_{el} + \dot{\varepsilon}_{pl} = const$ , а  $\dot{\varepsilon}_{el} = -\dot{\varepsilon}_{pl}$ .

И, наконец, результаты многочисленных исследований привели к пониманию того, что проблема пластического течения неразрывно связана с его *склонностью к локализации*, имеющей место на всех этапах процесса. Благодаря локализации, первоначально однородная среда в ходе деформации самопроизвольно расслаивается на деформируемые и недеформируемые объемы, границы которых часто бывают подвижными [8, 9]. При этом есть определенные основания считать, что склонность к локализации является той ключевой закономерностью, понимание природы которой способно обеспечить прогресс в решении проблемы пластичности в целом. Именно по этой причине целью настоящей работы является анализ существующих моделей развития локализованной пластичности материалов и оценка количественных параметров локализованного пластического течения твердых тел, а также поиск соотношений, связывающих эти параметры с другими важными характеристиками пластически деформируемой среды.

2. Автоволны локализованного пластического течения

Известен факт [3], что во многих случаях пластическое течение начинается как пространственно локализованный процесс, примером которого может служить деформация Людерса. Заканчивается пластическое течение также локализацией пластической деформации - формированием макроскопической шейки и вязким разрушением. Можно думать, что и все промежуточные стадии процесса формоизменения также протекают локализованным образом, а отсутствие соответствующих данных указывает на малую чувствительность используемых экспериментальных методик.

Действительно, экспериментальные данные, полученные на множестве различных материалов с использованием специально разработанной для этих целей методики [8, 9], показали, что пластическое течение на всех стадиях своего развития от предела текучести до разрушения протекает локализованным образом с формированием специфической картины – паттерна локализованной пластичности. Это утверждение справедливо для всех видов пластической деформации, включая активную деформацию и деформацию ползучести, деформацию за счет фазовых превращений, движения индивидуальных дислокаций и двойникования [3]. Типичный пример паттерна макролокализации пластического течения показан на рис. 1.

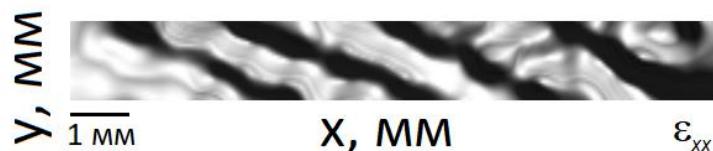


Рисунок 1. Паттерн локализации пластического течения. Активные в момент регистрации зоны деформации выделены темным цветом

Анализ экспериментальных данных показал, что прирост пластической деформации во время каждого последовательного шага деформирования сосредоточен только в активно деформирующихся зонах, чередующихся с зонами недеформирующегося материала. На это указывает наблюдаемая неоднородность распределения по образцу продольной  $\varepsilon_{xx}$ , сдвиговой  $\varepsilon_{xy}$  и ротационной  $\omega_z$  компонент тензора пластической дисторсии [2]

$$\beta_{ij} = \nabla r(x, y) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} + \omega_z. \quad (1)$$

Здесь  $r$  - вектор смещения при деформации, зависящий в плоском образце от координат  $x$ ,  $y$  и времени  $t$ . Поле векторов смещения  $r(x, y)$ , возникающее в деформируемом образце, восстанавливается с помощью спекл-фотографии. Для анализа получаемые таким образом результаты исследования графически представляются в форме зависимостей компонент тензора пластической дисторсии  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{xy}$  и  $\omega_z$  от  $x$ ,  $y$  и  $t$ , которые рассчитываются с помощью специально разработанных программ. Такие зависимости визуализируют паттерны локализованной деформации и делают их пригодными для детального количественного анализа. Он чаще всего состоит в построении зависимостей координат деформационных фронтов  $X$  от времени  $t$  ( $X-t$ -диаграмм), позволяющих оценить длину автоволны  $\lambda$ , период колебаний  $T$  и фазовая скорость распространения  $V_{aw} = \lambda/T$ .

Непосредственная количественная оценка показала, что общая деформация образца есть сумма парциальных вкладов деформации отдельных областей. В таком случае удлинение образца, задаваемое нагружающим устройством, можно вычислить как

$$\delta\varepsilon \approx \frac{\delta L}{L} \approx \frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_{xx}^{(mag)})_i l_i}{L} \approx \frac{N \cdot \langle \varepsilon_{xx} l \rangle}{L}, \quad (2)$$

где  $\delta\varepsilon \approx 10^{-3}$ ,  $N$  - число активных областей локализованного течения размером  $l$  в образце,  $\varepsilon_{xx}^{(mag)}$  - амплитуда компоненты тензора пластической деформации  $\varepsilon_{xx}$  в такой области,  $\langle \varepsilon_{xx} l \rangle$  - среднее удлинение в пределах активной области,  $L$  - длина образца, причем  $Nl < L$ . Справедливость соотношения (2) численно проверена на многих примерах наблюдаемых паттернов.

Анализ такого рода данных о локализации пластического течения привели к тому, что в 1994 году практически одновременно и независимо друг от друга были введены конкурирующие гипотезы об автоволновой [10] о волновой [11] природе пластического течения. Возникшая альтернатива была разрешена, благодаря обнаружению к этому времени двух существенных аргументов в пользу автоволновых представлений. Первый из них основан

на разных механизмах запуска волновых и автоволновых процессов. Если волновой процесс требует специфического (механического) внешнего воздействия на систему, то автоволновой возбуждается спонтанно за счет внутренних взаимодействий элементов среды. Из общих представлений о методике механических испытаний материалов следует, что соответствующие процедуры являются чаще всего квазистатическими, то есть, каких-либо толчков в нагружаемой системе не возникает.

Второй аргумент связан с различием скоростей распространения волновых  $V_{pw}$  и автоволновых  $V_{aw}$  процессов. Уже первые наблюдения развития паттернов локализации пластического течения показали, что экспериментально наблюдаемая скорость движения фронтов локализованного пластического течения  $V_{aw} \approx 10^{-5} - 10^{-4}$  м/с. В то же время скорости волн пластичности (волн Кольского [12]) или волн, обсуждаемых работе в [11]  $V_{pw}(\theta) \approx \sqrt{\theta/\rho_0} \approx 10 - 10^2$  м/с ( $\theta = d\sigma/d\varepsilon$  - коэффициент деформационного упрочнения,  $\rho_0$  - плотность материала,  $\sigma$  - напряжение,  $\varepsilon$  - деформация). Очевидно,  $V_{aw} \ll V_{pw} \ll V_t$ . Два эти обстоятельства позволяют считать, что в экспериментах [8-10] было обнаружено, изучено и описано новый тип нестационарных процессов пластической деформации – *автоволны локализованного пластического течения*. Последним была отведена важная роль в построении теории пластического течения материалов.

Очень существенным оказался тот факт, что при пластическом течении возможно формирование автоволн разного типа. Более того, экспериментально было установлено, что каждой стадии деформационного упрочнения соответствует определенный макроскопический паттерн локализации пластического течения с определенной кинетикой развития. Каждому из таких паттернов отвечает одна из стандартных автоволновых мод. В ходе пластического течения паттерн локализованного пластического течения закономерно эволюционирует в соответствии с изменениями закона деформационного упрочнения  $\theta(\varepsilon)$ , отвечающих переходам от одной стадии пластического течения к другой, как это показано на рис. 2 с помощью характерных для этих стадий экспериментальных  $X-t$ -диаграмм.

Полученные результаты привели к формированию нового взгляда на природу локализации пластического течения твердых тел под нагрузкой, который основан на том, что возможно существование всего четырех типичных паттернов (форм локализации), каждый из которых отвечает одной из стадий деформационного упрочнения, наблюдавшихся при пластическом течении. Такие стадии деформационного упрочнения могут быть выделены

с помощью стандартной процедуры после аппроксимации зафиксированной кривой пластического течения (рис. 2 а) уравнением Людвика [3]

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + K\varepsilon^n, \quad (3)$$

в котором  $K$  и  $\sigma_0$  - эмпирические константы.

Формальная процедура выделения стадий деформационного упрочнения основана на том, что при пластическом течении показатель упрочнения  $n$  в уравнении (3) принимает характерные для каждой из них дискретные значения, а именно

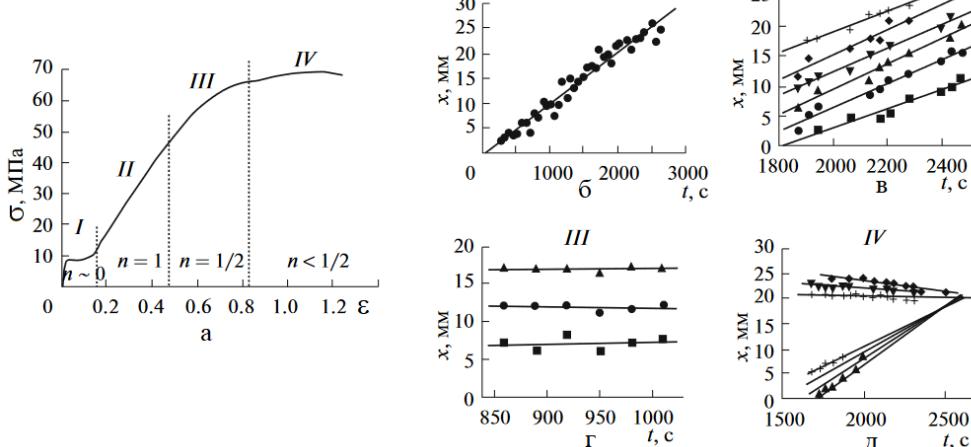


Рисунок 2. Кривая пластического течения, ее стадийность и Правило соответствия

Конечно, природа обсуждаемой стадийности процесса пластического течения детально исследовалась ранее, но возможность сопоставления каждой стадии вполне определенного и единственного типа автоволнового процесса [6] способствует выработке новой точки зрения на закономерности многостадийного процесса пластического формоизменения. Стало ясно, что локализованное пластическое течение твердых тел реализуется как последовательная смена автоволновых процессов, детерминированным образом эволюционирующих вдоль кривой пластического течения  $\sigma(\varepsilon)$  металлов, сплавов и других веществ. Это позволяет думать, что в основе стадийности деформационного процесса лежит смена автоволновых механизмов деформации. В деталях это выглядит следующим образом.

При деформации, соответствующей *площадке текучести*,  $\sigma = \text{const}$ , а  $\theta = 0$ , наблюдается движение одиночного очага локализованной пластичности (рис. 2 б), известного как полоса Людерса [3]. На ее фронте деформируемая среда переводится в новое состояние, характеризующееся другими механическими свойствами, структурой и механизмами деформирования. По этой причине подвижный фронт локализованной пластической деформации (фронт Людерса) может рассматриваться как аналог *автоволны переключения* в активной деформируемой среде [6].

Периодические деформационные процессы, наблюдавшиеся на стадиях *линейного деформационного упрочнения* (рис. 2 в) и *легкого скольжения* в

- (I)  $n \approx 0$  на стадии площадки текучести,
- (II)  $n = 1$  на стадиях легкого скольжения (в гцк-моноцисталах) и линейного деформационного упрочнения,
- (III)  $n = 1/2$  на стадии параболического деформационного упрочнения,
- (IV)  $n < 1/2$  на стадии предразрушения.

моноцисталах при  $\sigma \sim \varepsilon$  и  $\theta = \text{const}$ , можно представить как *фазовые автоворны* [6]. При таких режимах одни и те же объемы материала могут многократно возбуждаться через временной интервал - время рефрактерности, определяемое процессами, протекающими при деформации среды. Фазовые автоворны характеризуются длиной, частотой колебаний и скоростью распространения, однако последняя не может быть выражена через материальные характеристики среды [6].

На стадии *параболического деформационного упрочнения* при  $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$  и  $\theta \sim \varepsilon^{-1/2}$  формируется система эквидистантно расположенных неподвижных очагов локализованной пластической деформации, которая на этой стадии деформационного упрочнения, может интерпретироваться как *стационарная диссипативная структура* [6] (рис. 2 г). Пространственный период неподвижных распределений очагов  $\lambda$  совпадает с длиной автоворны на стадии линейного деформационного упрочнения. По существу, на этой стадии в образце существует совокупность слабо выраженных шеек, из которых впоследствии выживает только одна.

На стадии *предразрушения*  $\sigma \sim \varepsilon^n$ ,  $n < 1/2$ , следующей за параболической, очаги деформации снова становятся подвижными, но характер процесса на этом этапе сложнее по сравнению с тем, который наблюдается, например, на стадии линейного деформационного упрочнения. Можно видеть, что на этой стадии зависимости положений очагов локализованной деформации от времени  $X(t)$

прямолинейны и при экстраполяции сходятся в одной точке, образуя пучки прямых. Подобная ситуация может рассматриваться как *коллапс автоволнового процесса* развития локализованной пластичности, завершающийся образованием шейки разрушения. Скорости движения отдельных очагов на этой стадии процесса различны, но остаются постоянными, то есть, они с самого начала стадии предразрушения взаимно согласованы. Пример  $X-t$  диаграмм локализованной деформации на стадиях предразрушения представлен на рис. 2 д. Сопоставление данных для стадии предразрушения с кривыми пластического течения показывает, что такие паттерны локализованной деформации характерны для участков, предшествующей началу падения условных напряжений на диаграмме  $\sigma(\varepsilon)$ , то есть до тех пор, пока выполняется постулат Друкера теории пластичности о положительности работы внешних сил при приросте деформации [1]. Показанные на рис. 2 д зависимости справедливы для интервала напряжений  $\sigma_* < \sigma < \sigma_B$ , где  $\sigma_*$  – напряжение окончания параболической стадии деформационного упрочнения, а  $\sigma_B$  – временное сопротивление.

Анализ этих четырех картин локализации пластического течения и их сравнение с моделями и микроскопическими механизмами типичных автоворонковых процессов, описанных, например, в [6], показал, что каждой картине локализации может быть поставлена в соответствие стандартная автоворонковая мода - *авт волн переключения, фазовая авт волна, стационарная диссипативная структура, коллапс авт волны*. На этой основе можно сформулировать **Правило соотвествия**, согласно которому

- на площадке текучести наблюдается *авт волна переключения*,
- на стадиях линейного деформационного упрочнения и легкого скольжения возникает *фазовая авт волна*,
- на стадии параболического деформационного переключения реализуется *стационарная диссипативная структура*,

- стадии предразрушения отвечает *коллапс авт волны*.

Очень интересны для анализа автоворонковых мод локализованной пластичности стадии линейного деформационного упрочнения и легкого скольжения, для которых  $\sigma \sim \varepsilon$ . Фазовые авт волны отмечены при деформации моно- и поликристаллов с различной кристаллической решеткой, деформирующими за счет дислокационного скольжения, двойникования или фазового превращения. Их длина и скорость распространения измеряются с достаточной для количественного анализа точностью, так что в этих исследованиях удалось получить зависимость скорости распространения авт волны от коэффициента деформационного упрочнения  $V_{aw}(\theta)$ , закон дисперсии авт волн  $\omega(k)$  и зависимость длины авт волны локализованной пластичности от размера зерна деформируемого материала  $\lambda(\delta)$ .

Как оказалось, зависимость скорости распространения авт волны  $V_{aw}$  от  $\theta$  для стадий легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения имеет вид, показанный на рис. 3 а, и описывается формулой

$$V_{aw}(\theta) = V_0 + \frac{\Xi}{\theta}, \quad (4)$$

где  $V_0$  и  $\Xi$  – константы. То обстоятельство, что  $V_{aw} \sim \theta^{-1}$ , подтверждает обсужденное выше отличие авт волн локализованной пластичности от волн напряжений Кольского, для которых, как показано в [12],  $V_{pw} \sim \theta^{1/2}$ . Статистическая проверка подтвердила высокий уровень значимости коэффициентов корреляции величин  $V_{aw}$  и  $\theta^{-1}$  для стадий легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения. Закономерность, описанная соотношением (4), охватывает все без исключения полученные до настоящего времени данные для моно- и поликристаллов ГЦК, ОЦК и ГПУ чистых металлов и сплавов, кривая течения которых содержит названные стадии.

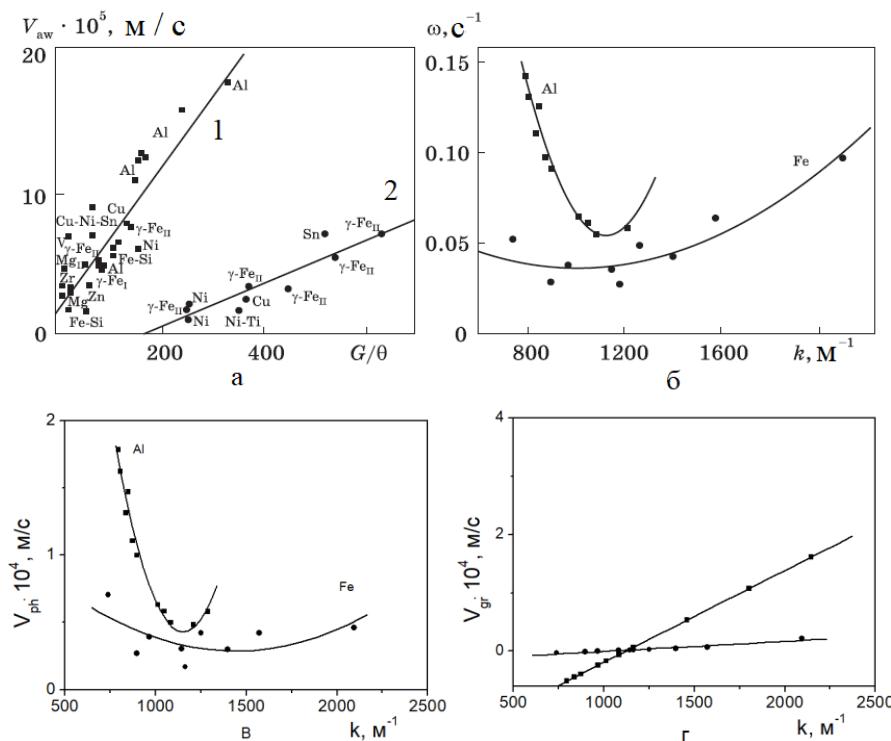


Рисунок 3. Характеристики фазовых автоволн локализованного пластического течения:  
скорость распространения (а); 1 – стадия линейного деформационного упрочнения, 2 стадия легкого скольжения; дисперсия (б), фазовая и групповая скорости (в и г)

Возможность независимого измерения длины автоволны  $\square$  и периода автоволнового процесса  $T$  позволила экспериментально найти форму закона дисперсии автоволн, то есть, зависимость  $\omega(k)$ , где  $\omega = 2\pi/T$  - частота,  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число. Эта зависимость показана на рис. 3 б и описывается квадратичным соотношением

$$\omega = \omega(k) = \omega_0 + a(k - k_0)^2, \quad (5)$$

где  $a$ ,  $k_0$  и  $\omega_0$  константы, различные для разных материалов. По экспериментальным данным можно получить показанные на рис. 3 в и г зависимости фазовой  $V_{ph} \equiv \omega/k$  и групповой  $V_{gr} \equiv d\omega/dk$  скоростей исследуемых волн от волнового числа  $k$ . Минимум зависимости  $\omega(k)$  находится при  $k = k_0 \approx 150 \text{ м}^{-1}$  ( $\lambda_0 \approx 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ). Автоволны такой длины распространяются без дисперсии, то есть,  $V_{ph} = V_{gr}$ . Асимметрия распределения экспериментальных точек, видимая на графике  $\omega(k)$  рис. 3 б, показывает, что возбуждаются только автоволны локализованной деформации с  $k < k_0$  или, соответственно,  $\lambda > \lambda_0$ . Положив  $V_{gr} = V_{ph} + k dV_{ph}/dk$ , найдем зависимость производной  $dV_{ph}/dk = (V_{gr} - V_{ph})/k$  от волнового

числа  $dV_{ph}/dk = \xi_0 + \zeta/k^2$ , где  $\xi_0$  и  $\zeta$  - эмпирические константы. Интегрирование этого выражения приводит к зависимости  $V_{ph} \sim (k + 1/k)$  для закона дисперсии типа (5). При этом интервал измеренных значений позволяет наблюдать только зависимость  $V_{ph} \sim 1/k$ .

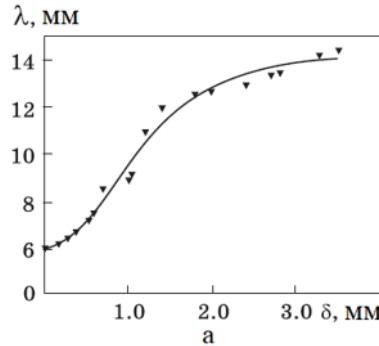
Из закона дисперсии (5) следует, что в спектре колебаний автоволн локализованного пластического течения  $\omega(k)$  существует щель шириной  $\omega_0 \approx 10^{-2} \text{ Гц}$ . Так как условие  $\hbar\omega_0 \ll k_B T$  выполняется при как угодно малых температурах, то спонтанная локализация пластической деформации должна возникать всегда. Действительно, связанная с локализацией течения скачкообразная деформация наблюдалась при  $T \leq 1 \text{ К}$ , а отсутствие локализации пластической деформации возможно только из-за геометрических ограничений при малых размерах образцов [6].

Зависимость длины автоволны локализации от размера зерна  $\delta$  в металле была экспериментально исследована на поликристаллическом алюминии, в котором методом рекристаллизации после разных деформаций выращивались зерна размерами  $5 \cdot 10^{-3} \leq \delta \leq 10 \text{ мм}$ . График полученной зависимости приведен на рис. 4 а. Дифференциальное уравнение, отвечающее функции  $\lambda(\delta)$ , может быть получено из следующих соображений. Пусть с ростом

размера зерна длина автоволны локализованной деформации также увеличивается из-за увеличения длины сдвига при акте деформирования. Очевидно, когда величина зерна приближается к поперечнику образца, темп прироста должен замедлиться, поскольку в этом случае длина сдвига становится меньше размера зерна. На основании этих рассуждений можно связать величины  $\lambda$  и  $\delta$  дифференциальным уравнением  $d\lambda/d\delta = a_1\lambda - a_2\lambda^2$ , в котором квадратичный член  $a_2\lambda^2$  учитывает замедление прироста  $\lambda$  в области больших  $\delta$ , а  $a_1$  и  $a_2$  - размерные положительные константы. Интегрирование этого дифференциального уравнения приводит к известной формуле логистической кривой

$$\lambda(\delta) = \lambda_0 + \frac{a_1/a_2}{1 + C \exp(-a_1\delta)}, \quad (6)$$

где константы  $\lambda_0 \approx 4$  мм,  $a_1 = 1.4$  мм<sup>-1</sup> и  $a_2 = 8.8 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>-2</sup> определены из данных эксперимента, а  $C \approx 2.25$  - постоянная интегрирования. Для проверки справедливости аппроксимации зависимости



$\lambda(\delta)$  логистической функцией (6) полученные данные представлялись в координатах  $\ln[\lambda^*/(\lambda - \lambda_0) - 1] - \delta$ , используемых для такой проверки. Данные рис. 4 б подтверждают пригодность уравнения (6) для описания зависимости  $\lambda(\delta)$ .

Интересны предельные случаи зависимости (6). В области малых зерен в диапазоне  $5 \cdot 10^{-3} < \delta < 5 \cdot 10^{-2}$  мм, очевидно,  $a_2\lambda^2 \ll a_1\lambda$  и  $d\lambda/d\delta \approx a_1\lambda$ , что приводит к  $\lambda \sim \exp \delta$ . В интервале крупных зерен  $5 \cdot 10^{-2} < \delta < 2.5$  мм, где рост длины волны замедляется, можно полагать, что относительный прирост  $\lambda$  пропорционален числу зерен на рабочей длине образца  $L$ , то есть,  $d\lambda/d\delta \sim L/\delta$  или  $d\lambda \sim L \cdot (d\delta/\delta)$ . Отсюда, очевидно, следует характерное для крупнозернистого Al логарифмическое соотношение  $\lambda \sim \ln \delta$ .

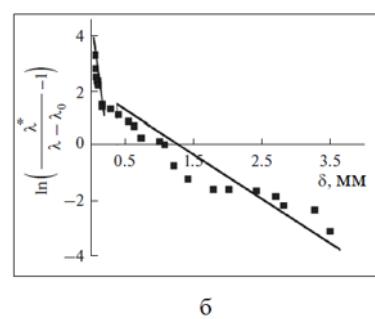


Рисунок 4. Зависимость длины автоволны локализации деформации  $\lambda$  от размера зерна  $\delta$  для Al: исходные данные (а); те же данные в функциональных координатах

Смена характера зависимости  $\lambda(\delta)$  от экспоненциальной к логарифмической происходит при условии  $\lambda = \lambda^*/2$ , что соответствует  $\delta \approx 0.25$  мм. Таким образом, длина автоволны локализованного пластического течения является структурно чувствительной величиной и сложным образом зависит от размера зерна материала.

Для описания наблюдаемых деформационных явлений необходимы уравнения автоволновых процессов пластического течения. Поскольку общая теория автоволновых процессов развита к настоящему времени достаточно детально [6], то математическая форма соответствующих уравнений, в принципе, известна и основной сложностью является выбор подходящих переменных для описания процессов пластической деформации. В общем виде эти соотношения представляют собой параболические дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных и имеют форму  $\dot{y} = \zeta(x) + Dy''$ . Такое уравнение, предложенное Колмогоровым, Петровским и Пискуновым (КПП-

уравнение) [13], формально возникает при добавлении нелинейной функции  $\zeta(x)$ , называемой *точечной кинетикой*, в правую часть дифференциального уравнения  $\dot{y} = Dy''$ , описывающего, например, диффузию (2-е уравнение Фика) или теплопроводность (уравнение Фурье). КПП-уравнения применяются сейчас для описания автоволновых процессов в активных средах разной природы [6].

Добавление нелинейной функции  $\zeta(x)$  в уравнение Фика не должно рассматриваться как чисто формальная операция. Именно появление этой функции открывает возможности описания генерации автоволн с их макроскопическим пространственным масштабом  $\sim \lambda$  в первоначально однородной системе. Явный вид функции  $\zeta(x)$  должен быть получен либо из физических соображений о природе конкретного механизма деформации, либо (при невозможности этого) может быть формально записан в виде многочлена с кубической нелинейностью. Второй вариант имеет существенные математически преимущества, но уступает первому из-

за возникающих трудностей при физической интерпретации такого рода функции.

Обратим также внимание на то, что наличие первой производной по времени в уравнении (6) подчеркивает необратимый характер описываемых им процессов, как и в случае диффузии. КПП-уравнения играют важную роль в анализе автоволновых процессов в термодинамически открытых системах разного типа при надлежащем выборе переменных.

В физике дефектов одна из первых попыток использования уравнения типа (6) принадлежит автору [14], который объяснил с его помощью вклад перераспределения перегибов на дислокационной линии в амплитудно-зависимое внутреннее трение металлов. В настоящее время такие идеи начинают широко применяться для описания самоорганизации дислокационных ансамблей при пластической деформации.

Так, например, авторы работы [15] применили автоволновые представления к проблеме скачкообразной деформации и к анализу формирования полос скольжения при деформации. Для этих целей они записали эволюционные уравнения для дислокационных ансамблей и рассмотрели условия формирования полос скольжения из первоначально хаотического распределения дефектов. Была предсказана сложная структура распространяющихся в деформируемой среде деформационных волн, которые состоят из головной части солитонного типа и осциллирующей хвостовой, постепенно отстающей при своем движении от головной. Этот эффект может быть одним из механизмов генерации фазовых автоволн в деформируемых средах. При рассмотрении проблемы устойчивости дислокационного ансамбля было показано, что флуктуации плотности дислокаций ведут к неоднородности поля внутренних напряжений в деформируемой среде.

Дислокационные механизмы самоорганизации и формирования дислокационных ансамблей наиболее последовательно рассмотрены в работах Малыгина [16, 17], где теоретически проанализировано соотношение между прочностью и пластичностью конструкционных материалов на примере кривых деформационного упрочнения ряда металлов и сплавов с ГЦК-решеткой. В основу положен критерий образования шейки в растягиваемом образце, а также кривая деформационного упрочнения, отражающая эволюцию плотности дислокаций в материале с ростом степени деформации и влияние на эту эволюцию структурных факторов.

На основе уравнений дислокационной кинетики теоретически обсуждается механизм деформационного упрочнения и образования фрагментированных дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях. Количественный анализ имеющихся данных по алюминию и алюминиево-магниевому сплаву показал, что деформационное упрочнение при больших деформациях и образование фрагментированных дислокационных структур связаны с взаимодействием и самоорганизацией геометрически необходимых

дислокаций. Их источником является локальная неоднородность пластической деформации вследствие градиента плотности дислокаций в границах дислокационных ячеек.

Характеризуя проблему в целом, следует сказать, что существующие модели автоволновых процессов, независимо от природы среды, основаны на взаимодействии двух конкурирующих факторов: автокаталитического (активатор) и демпфирующего (ингибитор), управляющих кинетикой процесса. Это означает, что для адекватного описания сложных систем необходимы два уравнения. В задачах химической кинетики одно из уравнений может описывать концентрацию активатора, а другое – ингибитора. В системах другой природы обоснование необходимых уравнений является более трудной задачей, потому что таких веществ может и не быть. Таким образом, выбор конкретных управляющих факторов требует хотя бы качественного понимания природы явлений в исследуемой среде.

Для локализованного пластического течения в роли активатора рассматривались деформации  $\varepsilon$ , а в роли ингибитора – упругие напряжения  $\sigma$ . При описании пластической деформации принято разделять тензор напряжений на девиаторную и шаровую части. За пластическое формоизменение ответственен тензор-девиатор, а шаровой тензор создает гидростатическое сжатие или растяжение, препятствуя пластической деформации в соответствии с законом упругости объемной деформации [2].

В пользу такого выбора управляющих факторов свидетельствует то, что при упругом растяжении образец адиабатически охлаждается, а при дислокационной деформации плоскости сдвига локально разогреваются. Эти тепловые эффекты противоположны по своему влиянию на процесс. Далее, выбор в качестве управляющих параметров пластической деформации и упругих напряжений, очевидно, удобен еще и тем, что имеется возможность экспериментального определения величин  $\sigma$  и  $\varepsilon$  непосредственно из диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$ . Наконец, такой выбор позволяет учесть пространственное разделение упруго напряженных зон и зон пластического сдвига, определяющее многомасштабность пластического деформирования.

Действие факторов, контролирующих развитие пластического течения, может быть следующим. Автокаталитический фактор (деформация) действует так, что каждый совершившийся сдвиг инициирует аналогичный процесс, необходимый для аккомодации, в соседнем объеме. Эффективный радиус действия этого фактора имеет порядок размера зоны сдвига  $l$ , а скорость его распространения соизмерима со скоростью движения дислокаций  $V_{disl}$ . С другой стороны, высвобождающаяся в каждом акте сдвига упругая энергия перераспределяется по объему, вызывая ост концентрации напряжений и затрудняющая пластическую деформацию. Это равносильно действию демпфирующего фактора, радиус действия которого порядка размера образца  $L \gg l$ , а скорость распространения

равна скорости упругих волн  $V_t >> V_{disl}$ . Такое соотношение между радиусами действия и скоростями распространения активирующего и ингибитирующего факторов, управляющих процессом, необходимо для генерации автоволн [6].

Часто при описании дислокационных механизмов пластической деформации в качестве активатора и ингибитора используют плотности подвижных и неподвижных дислокаций. В этом случае трудно оценить поведение этих величин при пластическом течении, и решение полученных уравнений требует использования не всегда оправданных допущений.

С учетом сделанного выбора управляющих факторов уравнения для деформации (активатор) и напряжения (ингибитор) могут быть введены по аналогии с КПП уравнением (фактически постулированы) в виде системы

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f(\varepsilon) + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = g(\sigma) + D_{\sigma\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2}. \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f(\varepsilon) + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = g(\sigma) + D_{\sigma\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Уравнения (6) и (7), описывающие скорости изменения деформаций и напряжений, содержат нелинейные функции (точечные кинетики)  $f(\varepsilon)$  и  $g(\sigma)$ , имеющие обычно  $N$ -образную форму. Смысл двойного индексирования коэффициентов  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  и  $D_{\sigma\sigma}$  в уравнениях (7) и (8) будет объяснен далее.

Важность уравнений (7) и (8) для описания автоволн локализованной пластичности делает желательным их вывод из уравнений механики. Уравнение (7) можно получить из условия [2], согласно которому: «Функции, входящие в закон движения континуума, непрерывны и имеют непрерывные частные производные по всем своим аргументам». Запишем на этом основании условие неразрывности пластического течения

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\varepsilon\varepsilon} \nabla \varepsilon), \quad (9)$$

где  $D_{\varepsilon\varepsilon} \nabla \varepsilon$  - поток деформации в поле градиента деформации. При  $D_{\varepsilon\varepsilon}(x)$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \cdot \frac{\partial D_{\varepsilon\varepsilon}}{\partial x} + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} = f(\varepsilon) + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \quad (10)$$

причем  $f(\varepsilon) = \varepsilon' D'_{\varepsilon\varepsilon}$  есть нелинейная функция деформации.

Уравнение (8) для скорости изменения напряжений следует из уравнения Эйлера для потока вязкой жидкости, записанного в форме [18]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i = - \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k}. \quad (11)$$

Здесь

$\Pi_{ik} = p \delta_{ik} + \rho v_i v_k - \sigma_{vis} = \sigma_{ik} - \rho v_i v_k$  - тензор

плотности потока импульса в вязкой среде,  $\delta_{ik}$  - единичный тензор,  $p$  - давление, а  $v_i$  и  $v_k$  - компоненты скорости потока. Тензор напряжений  $\sigma_{ik} = -p \delta_{ik} + \sigma_{vis}$  есть сумма упругих  $\sigma_{el} = -p \delta_{ik}$  и вязких  $\sigma_{vis}$  напряжений, то есть,  $\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{vis}$ , а  $\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_{el} + \dot{\sigma}_{vis}$ . Скорость релаксации упругих напряжений может быть записана как  $\dot{\sigma}_{el} \equiv g(\sigma) = -M \rho_{md} b (b/B) \sigma = -M \rho_{md} b V_{disl} \sim V_{disl}$ , где  $M$  - упругий модуль системы «образец - испытательная машина»,  $B \approx 10^{-5}-10^{-4}$  Па·с – коэффициент квазивязкого торможения дислокаций, а  $V_{disl} = (b/B) \cdot \sigma$  - скорость их движения.

Вязкие напряжения  $\sigma_{vis}$  контролируются скоростью распространения упругих волн в деформируемой среде  $V_t \approx V_{t0} + \beta \sigma$  [9], где  $V_{t0}$  - скорость поперечных упругих волн в отсутствии напряжений, а  $\beta = const$ . Если  $\sigma_{vis} = \eta \nabla V_t$ , где  $\eta$  - динамическая вязкость, то  $\dot{\sigma}_{vis}/\partial t = V_t \nabla \cdot (\eta \nabla V_t) = \eta V_t \partial^2 V_t / \partial x^2$ . Тогда скорость релаксации напряжений  $\dot{\sigma}_{vis}/\partial t = \eta V_t \partial^2 V_t / \partial x^2 = \eta \beta V_t \partial^2 \sigma / \partial x^2$ , и окончательно

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = g(\sigma) + D_{\sigma\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где  $D_{\sigma\sigma} = \eta \beta V_t$  - коэффициент переноса в уравнении (8).

Формально правая часть уравнения (12) содержит скорости релаксации упругих и вязких напряжений  $\dot{\sigma}_e = g(\sigma)$  и  $\dot{\sigma}_{vis} = D_{\sigma\sigma} \partial^2 \sigma / \partial x^2$ , соответственно. Но, если функция  $g(\sigma)$  учитывает перераспределение упругих напряжений между контактирующими микрообъемами на фронте существующего очага пластичности, то диффузионному члену  $D_{\sigma\sigma} \partial^2 \sigma / \partial x^2 \equiv \eta \zeta V_t \partial^2 \sigma / \partial x^2$  следует приписать ответственность за перераспределение напряжений в образце на макроскопическом масштабе.

В таком случае можно считать, что поток пластической деформации включает гидродинамическую и диффузионно-подобную компоненты. Первая из них описывается нелинейными функциями  $f(\varepsilon) \sim V_{disl}$  в уравнении (7) и  $g(\sigma) \sim V_{disl}$  в уравнении (8), связанными с непрерывным распространением деформации вдоль образца за счет последовательной релаксации локальных концентраторов напряжений. Она реализуется в форме непрерывного движения вдоль образца фронта деформации при последовательной активации локальных кон-

центраторов напряжений на нем. Вторая компонента определяется диффузионно-подобными членами  $D_{\varepsilon\varepsilon} \partial^2 \varepsilon / \partial x^2$  в уравнении (7) и  $D_{\sigma\sigma} \partial^2 \sigma / \partial x^2$  в уравнении (8). Она связана с дислокационными сдвигами при релаксации одного из сформировавшихся на предыдущих стадиях процесса концентраторов напряжений. Этот процесс обеспечивает зарождение очага деформации на расстоянии  $\sim \lambda$  от уже имеющегося фронта пластичности. Благодаря этому, возникает своеобразная *заброска деформации* на макроскопическое расстояние, чем порождается характерный макроскопический масштаб пластического течения  $\sim \lambda$ .

Выясняем физический смысл уравнения (10) для скорости пластической деформации, попытаемся установить его связь с известным уравнением дислокационной кинетики Тейлора-Орована [19]

$$\frac{\partial \varepsilon_{pl}}{\partial t} = b \rho_{md} V_{disl}, \quad (13)$$

где  $b$  - вектор Бюргерса, а  $\rho_{md}$  - плотность подвижных дислокаций. Рассмотрим функцию  $f(\varepsilon) = \varepsilon' \cdot D'_{\varepsilon\varepsilon}$  в правой части уравнения (10) для случая малой плотности подвижных дислокаций. Если последние распределены однородно на среднем расстоянии  $l$  друг от друга, то  $b/l$  - деформация сдвига при смещении одной дислокации на  $l$ , а  $l^{-2} \approx \rho_{md}$  - плотность подвижных дислокаций.

Тогда  $\varepsilon' = d\varepsilon/dl \approx \varepsilon/l \approx 1/l \cdot b/l \approx b\rho_{md}$ , и используя *диффузионное* представление  $D_{\varepsilon\varepsilon} \approx L_d \cdot V_{disl}$ , где  $L_d \approx \alpha x$  - длина пробега дислокаций, а  $V_{disl} = const$  их скорость, получаем:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \alpha b \rho_{md} V_{disl} + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Безразмерный коэффициент  $\alpha = L'_d \approx const$ , так что первый член в правой части совпадает с уравнением Тейлора-Орована (13), которое теперь следует рассматривать как частный случай уравнения (14), пригодный лишь для описания *точечной кинетики* деформируемой системы - релаксационного акта пластичности, обычно протекающего в форме нелинейного процесса скачкообразной деформации. Таким образом, уравнение Тейлора-Орована (13) для дислокационного описания пластического течения является частным случаем автоволнового уравнения пластического течения, описывает только гидродинамическую компоненту потока деформации и не учитывает возможность зарождения дефектов по всему объему деформируемой среды за счет вклада диффузионно-подобных членов  $D_{\varepsilon\varepsilon} \varepsilon''$  и  $D_{\sigma\sigma} \sigma''$ . Такие эффекты, вызванные неоднородностью дислокационного распределения, могут быть учтены в рамках

более общего уравнения (14), содержащего в правой части разные по своей природе компоненты потока пластического течения.

В диффузионно-подобной компоненте  $D_{\varepsilon\varepsilon} \varepsilon''$  величина  $D_{\varepsilon\varepsilon} \approx L_d V_{disl}$  при постоянном напряжении сдвига почти не меняется. Однако производная  $\varepsilon''$  может быть велика из-за неоднородности распределения дефектов. Из теории параболических дифференциальных уравнений [6], к которым относятся уравнения (7) и (8), известно, что скорость передачи взаимодействия между элементами среды в таких системах  $V^{(inter)} \rightarrow \infty$ . Естественно, такая ситуация физически нереализуема и должна быть заменена условием  $V^{(inter)} \approx V_t$ , ограничивающим предельную скорость передачи сигналов в непрерывной среде скоростью звука  $V_t$ . Таким образом, в пределе *заброска* деформационных процессов осуществляется со скоростью звука (скоростью распространения упругих волн). Речь в этом случае не идет о пробегах дислокаций на расстояния, соизмеримые с размером деформируемого тела. Но генерация сдвигов, удаленных от уже имеющихся активных деформационных зон, указывает на важную роль акустических явлений в инициировании новых дислокационных сдвигов на макроскопическом расстоянии от имеющихся очагов пластичности.

Система уравнений (7) и (8) пригодна для описания режимов пластической деформации, сопровождающихся образованием очагов локализованного пластического течения и формированием различных автоволновых мод. В рамках анализа этих уравнений удается объяснить существование автоволн переключения и фазовых автоволн локализованной пластичности. Уравнения (7) и (8) при иной интерпретации переменных также описывают различные режимы развития локализованной пластичности.

### 3. Двухкомпонентная модель автоволновой деформации

Многочисленные наблюдения процессов развития локализованного пластического течения привели к проблеме интерпретации полученных результатов и создания адекватной физической модели явления. Наиболее общие результаты экспериментальных исследований показали, что

- локализация пластического течения присутствует на всех этапах процесса формоизменения при активном нагружении и при ползучести,

- автоволновые дифференциальные уравнения параболического типа пригодны, по крайней мере, для качественного описания кинетики развития паттернов локализованной пластичности,

- локализация пластического течения характеризуется макроскопическим пространственным масштабом  $\lambda \approx 10^{-2}$  м.

Анализ развития пластического течения позволяет сказать, что расслоение деформируемой среды на деформирующиеся в данный момент (активные)

и недеформируемые (пассивные) объемы эквивалентно возникновению определенного порядка (структуре) в их расположении в пространстве образца. Это соответствует мнению Хакена [7], согласно которому: «*Система называется самоорганизующейся, если она без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру*». Понимание этого факта заставило привлечь к проблемам пластичности идеи синергетики – термодинамики открытых неравновесных систем. Николис и Пригожин [20] вообще полагали, что пластическую деформацию следует анализировать: «*Как часть общей проблематики нелинейных динамических систем, работающих вдали от равновесия*». Наиболее определенно об этом заявили Зегер и Франк, предложившие в работе [21] рассматривать пластическую деформацию как процесс структурообразования с привлечением термодинамики необратимых процессов в открытых системах. Они заявили: «*Мы можем ... подвести итог, заявив, что применение термодинамики необратимых процессов в открытых системах к проблеме структуризации при пластической деформации достаточно успешно на качественном уровне*».

С этим заявлением хорошо согласуются результаты многочисленных исследований [5], в которых изучались дислокационные структуры, формирующиеся в процессе пластического течения. Эволюция дислокационных субструктур по мере роста деформации может быть представлена следующим образом: хаотическое распределение дислокаций → скопления дислокаций → однородная сетчатая субструктура → дислокационные клубки →неразориентированные ячейки → ячеисто-сетчатая неразориентированная субструктура → ячеистая субструктура с разориентировкой→ ячеисто-сетчатая субструктура с плавной разориентировкой→ полосовая субструктура →субструктура с многомерными дискретными и плавными разориентировками→ фрагментированная субструктура.

Следение за режимами появления новых дислокационных субструктур при деформации металлов показало, что рождение новой структуры всегда происходит на фоне старой и сопровождается ее деградацией. Установлено, что движущей силой подобных превращений служит снижение энергии образующихся дислокационных субструктур [5], причем появлению новых субструктур отвечает соответствующее изменение действующего закона деформационного упрочнения

Идея Зегера и Франка [21] в последние десятилетия получила мощный импульс к развитию, благодаря проникновению в физику пластичности идей, представлений и методов синергетики. В ряде работ систематически были рассмотрены вопросы применения синергетики к описанию коллективных эффектов при пластической деформации. Плотность применения синергетических представлений к проблеме пластического течения была успешно продемонстрирована рядом авторов. Так в

частности, в таких исследованиях впервые удалось объяснить закономерности формирования автоволн локализованной пластичности при деформировании разных материалов и введены представления о гидродинамической и диффузионно-подобной моде пластического течения. Этот успех инициировал формирование системы взглядов на пластическую деформацию как на специфический процесс самоорганизации дефектной структуры на разных структурных уровнях с ее последующей эволюцией.

Многие авторы развивали описание процесса пластической деформации как неравновесного кинетического переходы, приводящего к возникновению локализации пластического течения. В рамках такого подхода деформируемый материал следует рассматривать как систему, способную генерировать разнообразные диссипативные структуры, более эффективные для реализации деформации по сравнению с движением отдельных, хаотически расположенных дефектов. В этих работах были также сформулированы определенные указания на возможность генерации автоволновых процессов при пластическом течении.

Модель локализованного пластического течения, по существу, эквивалентна модели развития процессов самоорганизации в деформируемой среде. Такая модель была построена на базе общей теории процессов самоорганизации, предложенной Кадомцевым [22], с точки зрения которого: «*В сложных открытых физических системах могут появляться тенденции к их расслоению на информационные и динамические подсистемы*». Такое расслоение является необходимым условием для реализации процессов самоорганизации. В принципе, этот взгляд согласуется с представлениями о конкуренции автокаталитического и демпфирующего факторов [6] при формировании автоволновых процессов. Можно предположить, что существование динамической и информационной подсистем, постулированных Кадомцевым, связано с этими факторами.

По этой причине, прежде всего, необходимо определить специфику сигнальной и динамической подсистем в пластически деформируемой реальной среде. Для этой цели сформулируем практически очевидные обязательные требования к ним:

- кинетика развития подсистем должна определяться явлениями, контролирующими процесс пластического течения,
- между подсистемами должно существовать взаимодействие такой мощности, чтобы акты в одной подсистеме вызывали отклик в другой,
- природа причинной взаимосвязи явлений, характерных для каждой подсистемы, должна быть строго определена, а механизм взаимодействия подсистем должен допускать возможность проверки и количественной оценки характеристических параметров пластического течения.

Формально в случае пластической деформации расслоение деформируемой системы может быть представлено в виде, показанном на рис. 5.

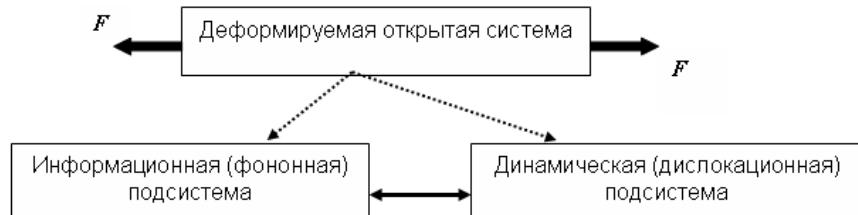


Рисунок 5. Блок-схема двухкомпонентной модели пластического течения

Перечисленные выше требования реализуются в **двухкомпонентной модели**, которая использует представления о взаимодействии упругой и пластической компонент деформации. Кинетику деформационного акта в этой модели определяет мозаика деформированных областей в деформируемой среде, отдельные элементы которой напряжены в различной степени. Мозаика деформационного поля сопряжена с системой концентраторов напряжений разного масштаба, которые могут находиться в ждущем (стационарном) или активном (релаксирующем) состояниях. Релаксация концентратора рассматривается как элементарный акт пластического течения.

В рамках модели динамическая и информационная подсистемы определены следующим образом:

- *динамическая подсистема* есть совокупность дислокационных сдвигов, двойников и других актов пластической деформации, непосредственно вызывающих пластическое формоизменение;
- *сигнальная подсистема* есть совокупность импульсов акустической эмиссии, порождаемых актами пластичности и инициирующих такие акты.

Со существование двух подсистем в деформируемой среде объясняет использование термина

**двухкомпонентная** в названии предложенной модели. Общий сценарий ее функционирования показан на рис. 6 и представляется следующим. Каждый релаксационный акт в динамической подсистеме сопровождается эмиссией упругого акустического импульса. Его энергия может быть поглощена другим концентратором, что инициирует его релаксацию, то есть, событие в динамической подсистеме. Состояние деформируемой среды характерно тем, что в системе концентраторов упругих напряжений блуждают случайные упругие импульсы, наложение которых на статические поля концентраторов повышает вероятность реализации релаксационных актов пластической деформации.

Согласно рис. 6, при реализации модели делаются следующие шаги:

- пластический сдвиг (релаксационный распад концентратора напряжений в динамической подсистеме), сопровождающийся излучением импульса акустической эмиссии (точка А на рис. 6),
- поглощение энергии акустического импульса другим концентратором и инициирование его термически активированной релаксации, то есть, нового сдвигового процесса (точка В на рис. 6),
- акустическую эмиссию при реализации нового сдвига (точка В на рис. 6) и повторение перечисленных шагов.

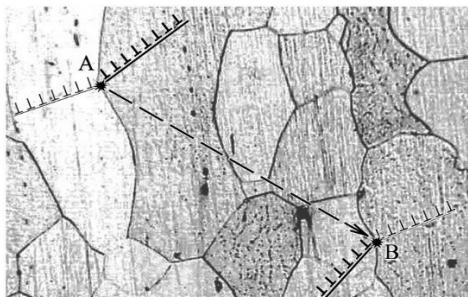


Рисунок 6. Функционирование двухкомпонентной модели. Исходные концентраторы напряжений обозначены жирными значками  $\perp$ . Возникающие сдвиги обозначены тонкими значками  $\perp$ . Стрелка АВ - путь распространения акустического импульса

Конкретизируя природу таких шагов, можно заключить, что в двухкомпонентной модели объединены два эффекта, изучаемые обычно порознь. Первый из них - акустическая эмиссия - сопровождает акты пластического течения и разрушения и используется обычно для контроля состояния материала. Второй - акустопластичность - состоит в пластификации материала при приложении к нему во время деформации осциллирующих напряжений ультразвуковой частоты. Иначе говоря, в двухкомпонентной модели пластическая деформация как генерация автоволновых мод является результатом

взаимодействия динамической и сигнальной подсистем.

Оценим количественно возможности предложенной модели, сравнив времена ожидания термически активированных актов сдвиговой релаксации [23] в отсутствии акустического импульса

$$\vartheta_{abs} \approx \omega_D^{-1} \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{k_B T}\right), \quad (15)$$

и при его наложении

$$\begin{aligned} \vartheta_{app} &\approx \omega_D^{-1} \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma\sigma - \delta U_{ac}}{k_B T} \right] \approx \\ &\approx \omega_D^{-1} \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma(\sigma + \varepsilon_{ac} E)}{k_B T} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

В этих соотношениях  $\omega_D$  - дебаевская частота,  $U_0$  - высота потенциального барьера, преодолеваемого в ходе релаксационного акта,  $\gamma \approx b^2 l \approx 10^4 b^3$  - активационный объем такого акта,  $l$  - размер области сдвига,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $E$  - упругий модуль. Для расчетов по формулам (15) и (16) примем, что энталпия активации процесса  $U_0 - \gamma\sigma \approx 0.5$  эВ [23]. Акустический импульс с амплитудой упругой деформации  $\varepsilon_{ac}$  снижает ее на  $\delta U \approx \gamma\varepsilon_{ac} E \approx 0.1$  эВ. Расчет для  $k_B T \approx 1/40$  эВ (при 300 К) показывает, что  $\vartheta_{abs} \approx 5 \cdot 10^{-5}$  с и  $\vartheta_{app} \approx 9 \cdot 10^{-7}$  с  $\ll \vartheta_{abs}$ . Эта грубая оценка подтверждает справедливость модели, объясняя ускорение процессов пластического течения при действии акустоэмиссионных импульсов.

Принципиальной проблемой, возникающей при объяснении природы крупномасштабной периодичности в расположении очагов локализации деформации, является согласование автоволнового масштаба  $\lambda \approx 10^{-2}$  м с масштабом дислокационных процессов  $10^{-10}-10^{-5}$  м. В рамках развивающейся модели возможное объяснение сводится к следующему. Пусть сдвиг эмитирует импульс поперечных упругих волн с частотой  $\omega_m \approx 10^6$  Гц, отвечающей максимуму интенсивности в спектре эмиссионного сигнала. Проходя через упруго напряженную область, импульс расщепляется на две ортогонально поляризованные волны, распространяющиеся со скоростями  $v_1$  и  $v_2 \neq v_1$  с длинами  $L_1 = v_1/\omega_m$  и  $L_2 = v_2/\omega_m$ . Разность длин волн

$$\delta L = L_2 - L_1 \approx \frac{v_2 - v_1}{\omega_m} \approx \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2\omega_m \rho_0 V_t} \approx 10^{-4} \text{ м} \quad (17)$$

при условии, что в уравнении (17) разность главных нормальных напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1 \approx 10^8$  Па, плотность материала  $\rho_0 \approx 5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а скорость звука  $V_t \approx 3 \cdot 10^3$  м/с. Вероятность активации нового сдвига растет при совпадении максимумов квадратов напряжений в обеих волнах, то есть, при наибольшей упругой энергии. Это отвечает условию  $L^2/\delta L \approx \lambda \approx 10^{-2}$  м и объясняет зарождение очагов пластичности на расстоянии  $\sim \lambda$  от существующего фронта деформации за счет акустического инициирования деформации.

Другой вариант оценки основан на анализе распространения акустического сигнала через зону с неоднородной плотностью дислокаций, например, существующий очаг пластического течения (рис. 7 а). Упрощая, положим, что плотность дислокаций в каждом из рассматриваемых фрагментов убывает от центра к периферии. Такой фрагмент характеризуется неоднородным распределением внутренних напряжений  $\sigma_i \approx Gb\rho_d^{1/2}$  [19]. Такую область в деформируемой среде можно рассматривать как акустическую линзу диаметром  $C$ . Вместе с существованием зависимости  $V_t \sim \sigma_i$  это вызывает поворот фронта плоской волны А-А, проходящей через такую область, на малый угол  $\alpha$ , как показано на рис. 7 а.

Оказывается, что волны от соседних областей, играющих роль линз, фокусируются на оси симметрии, где растет уровень упругих напряжений и, соответственно, повышается вероятность релаксационных актов пластичности. Это инициирует образование нового очага деформации на расстоянии  $\sim \lambda$  от исходного. Простой геометрический расчет, необходимые для которого детали и обозначения пояснены на рис. 7 а, показывает, что

$$\lambda \approx \frac{C}{2 \sin \alpha} \approx \frac{C}{2 \tan \alpha} \approx \frac{1}{\Delta V_t \delta / C V_t} \approx C \cdot \frac{C}{2 \delta} \cdot \frac{V_t}{\Delta V_t}. \quad (18)$$

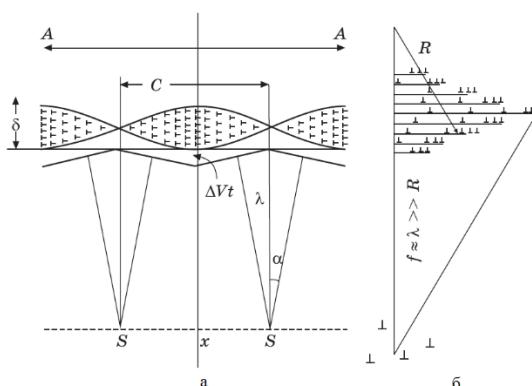


Рисунок 7. Распределение неоднородностей дислокационной структуры, играющих роль акустических линз (а); схема акустической линзы (б)

Количественную оценку эффекта удобно сделать для поликристалла Al, в котором скорость поперечного звука  $V_t \approx 3 \cdot 10^3$  м/с, а ее экспериментально найденное изменение в интервале пластических деформаций, соответствующих стадии параболического упрочнения,  $\Delta V_t \leq 10$  м/с. При размножении дислокационной ячейки  $\delta \approx 10^{-7}$  м и отношении  $C/2\delta \approx 10$  получаем  $\lambda \approx 10^{-2}$  м, что близко к экспериментально наблюдаемой дистанции между очагами локализованной деформации. Так как  $\lambda \gg C > b$ , то можно полагать, что соотношение (18) связывает микромасштаб дислокационной субструктурь с макромасштабом очагов локализованной деформации.

Возможен более простой вариант такой оценки. Поскольку скорость упругих волн в среде зависит от деформации, а дислокации обычно распределены неоднородно, образуя ансамбли разной формы и размера, то область неоднородности размером  $l_d$  можно рассматривать как акустические линзы с радиусом кривизны  $R \approx l_d$  и фокусным расстоянием (рис.7б)

$$f = \frac{R}{\kappa - 1}, \quad (19)$$

где  $\kappa = V_0/V$  - показатель преломления звуковых волн в деформируемой среде. Из экспериментальных данных следует, что почти до разрушения  $\kappa \leq 1.002$ ; при деформации Al  $R \approx l_d \approx 10^{-5}$  м. Тогда, согласно формуле (19),  $f \approx 5 \cdot 10^{-3}$  м. На этом расстоянии  $f \approx \lambda$  концентрируется дополнительная упругая энергия и растет вероятность распада концентратора напряжений и возникновения акта пластичности. Здесь начинает развиваться новый очаг локализации деформации. Так как величины  $\kappa$  и  $R$  определяются структурой и свойствами материала, то их эволюция при пластическом течении может определять перестройку автоволновой картины локализации деформации. Роль акустических линз могут играть дислокационные ансамбли с неоднородным распределением дислокаций (и внутренних напряжений) по объему - дислокационные клубки, ячейки и другие структуры.

В этих случаях варианты распределения и поведения макроскопических зон локализованной деформации могут быть связаны с изменением геометрии акустических линз (величин  $C$ ,  $\delta$  и их отношение  $C/2\delta$ ) или распределения дислокаций в них в ходе пластического течения. В соответствии с соотношением (18), увеличение размера фрагмента инициирует рост  $\lambda$  и может инициировать движение очага пластического течения вдоль оси растяжения на стадии линейного деформационного упрочнения.

Таким образом, в рамках предлагаемой двухкомпонентной модели развития локализованного пластического течения находит

непротиворечивое объяснение наиболее сложная проблема физики пластичности - возникновение макроскопического автоволнового масштаба в реальном деформируемом материале, структурные дефекты которого обладают много меньшим пространственным масштабом.

#### 4. Упругопластический инвариант деформации и следствия из него

Приведенные рассуждения подтверждают справедливость предлагаемой модели формирования автоволн локализованного пластического течения, которая основана на взаимодействии акустической (сигнальной) и дислокационной (динамической) подсистем в деформируемой среде. В таком случае в дополнение к автоволновым уравнениям (7) и (8), описывающим кинетику событий в этих подсистемах и недвусмысленно указывающим на тесную связь пластических и упругих явлений при деформации сплошной среды, необходимо уравнение явным образом связывающее эти два класса явлений. Такое уравнение было получено при численном анализе данных о развитии локализованного пластического течения по механизму распространения фазовых волн.

Как оказалось, наиболее интересная закономерность, связанная с распространением фазовых волн локализованной пластичности на стадии линейного деформационного упрочнения, состоит в том, что для всех исследованных материалов для этой стадии выполняется отношение

$$\frac{\lambda V_{aw}}{\chi V_t} \approx const, \quad (20)$$

где  $\chi$  - межплоскостное расстояние, соответствующее максимальной интенсивности рентгеновского рефлекса, а  $V_t$  - скорость распространения поперечных ультразвуковых колебаний, определяемые для соответствующих материалов по справочной литературе. Для выяснения универсальности отношения (20), были статистически проанализированы данные о величине отношения  $\lambda V_{aw}/\chi V_t$ , полученные нами в разное время при исследованиях локализованного пластического течения для разных вариантов деформации материалов:

- линейного деформационного упрочнения и легкого скольжения в моно- и поликристаллах металлов,
- деформации фазового превращения в интерметаллиде NiTi,
- деформации сжатия щелочно-галоидных кристаллов (KCl, NaCl, LiF),
- деформации сжатия горных пород,
- ползучести поликристаллического алюминия,
- деформации, реализующейся за счет движения индивидуальных дислокаций в монокристаллах Zn, CsI, NaCl, KCl, LiF [19]; в этом случае вместо длины автоволны локализованной деформации использовалась длина дислокационного пробега.

Таким образом, экспериментальными исследованиями были охвачены моно- и поликристаллические материалы, деформирующиеся скольжением

дислокаций, двойникование ( $\square$ -Fe, мрамор), фазовым превращением (никелид титана) и зернограницными процессами (песчаник). Можно ожидать, что полученные в таких условиях данные о величине отношения  $\lambda V_{aw}/\chi V_t$  будут достаточно общими.

На диаграммах деформации  $\sigma(\varepsilon)$  исследованных материалов имеются участки линейного деформационного упрочнения, на которых регистрировались фазовые автоволны локализованного пластического течения. Для исследованных материалов были установлены частные значения отношения  $(\lambda V_{aw}/\chi V_t)_i$ , найдены его среднее значение  $\langle \lambda V_{aw}/\chi V_t \rangle$ , дисперсия  $\sigma^2$  и вычислена средняя квадратичная ошибка среднего результата  $\pm \sqrt{\sigma^2/n}$ , так что  $0.2 \leq \hat{Z} \leq 1.3$ . Численный анализ экспериментальных данных позволил сделать заключение, что ( $\langle \dots \rangle$  – знак усреднения)

$$\left\langle \frac{\lambda V_{aw}}{\chi V_t} \right\rangle = \left\langle \frac{\lambda/\chi}{V_t/V_{aw}} \right\rangle = \langle \hat{Z} \rangle, \quad (21)$$

где  $\langle \hat{Z} \rangle_{n=38} = 0.48 \pm 0.04 \approx 1/2$ . Соотношение

(21), названное **Упругопластическим инвариантом деформации**, связывает характеристики упругих волн ( $\chi$  и  $V_t$ ) с характеристиками автоволн локализованного пластического течения ( $\lambda$  и  $V_{aw}$ ), объединяя упругую ( $\varepsilon \ll 1$ ) и пластическую ( $\varepsilon \approx 1$ ) деформации, одновременно развивающиеся в твердом теле. При этом произведение  $\chi V_t$  характеризует кинетику перераспределения упругих напряжений со скоростью  $V_t$ , а произведение  $\lambda V_{aw}$  выполняет ту же роль для перестройки паттернов локализованного пластического течения со скоростью  $V_{aw}$ .

С учетом достигаемой в экспериментах точности примем, что распределение величин  $\hat{Z}$  действительно является нормальным, то есть, изменения величины упругопластического инварианта в пределах  $0.2 \leq \hat{Z} \leq 1.3$  связаны только с экспериментальными погрешностями. Можно считать, что в качестве величины инвариантного соотношения следует принять значение

$$\langle \hat{Z} \rangle_{n=38} \approx \langle \hat{Z} \rangle_{n=37} \approx \langle \hat{Z} \rangle \approx 1/2.$$

Это означает, что упругопластический инвариант деформации есть закономерность, универсально пригодная для описания процессов пластического течения материалов независимо от их природы и действующих микромеханизмов пластичности. Для уточнения физического смысла инварианта (21) учтем, что  $V_t \approx \chi \cdot (\omega_D/2\pi)$  [24]. В таком случае, используя

соотношение  $\hbar\omega_D \approx k_B\theta_D$ , где  $\hbar = h/2\pi$  – постоянная Планка, а  $\theta_D$  – дебаевский параметр [24], получаем  $V_t \approx \chi \cdot (k_B\theta_D/h)$ . В таком случае можно от уравнения (21) перейти к уравнению

$$\lambda V_{aw} = \hat{Z} \chi V_t \approx \hat{Z} \chi^2 f_D \approx \hat{Z} \cdot \frac{\chi^2 k_B \theta_D}{h} \approx 10^{10} (\chi^2 \theta_D), \quad (22)$$

где  $\hat{Z}(k_B/h) = const \approx 10^{10}$ . Соотношение (22) позволяет оценивать значения  $\lambda V_{aw}$  непосредственно по известным решеточным характеристикам среды  $\chi$  и  $\theta_D$ . Расчеты показывают, что формула (22) правильно предсказывает порядок величины  $\lambda V_{aw}$ . Поскольку дебаевский параметр зависит от температуры  $\theta_D(T)$  [24], формула (22) применима для предсказания и анализа вида температурной зависимости параметра пластичности  $\lambda V_{aw}$ .

Как было сказано, инвариант (21) связывает характеристики упругой ( $\chi$  и  $V_t$ ) и пластической ( $\lambda$  и  $V_{aw}$ ) деформации, играя важную роль в развитии локализованной пластичности. Локализация пластической деформации – это самоорганизация нелинейной активной деформируемой среды, содержащей структурные дефекты. Общим признаком процессов самоорганизации в открытой термодинамической системе, какой является деформируемая среда, служит уменьшение ее энтропии в таком процессе. Это условие выполняется при генерации автоволн локализованной пластичности [8], так что использование энтропийного фактора для выяснения физической природы локализации пластической деформации обосновано.

В основе двухкомпонентной модели локализованной пластичности лежит конкуренция процессов рождения и распада концентраторов упругих напряжений. Это значит, что пространственно-временные распределения полей напряжений  $\sigma(x, y, t)$  и пластических деформаций  $\varepsilon(x, y, t)$  трансформируются взаимообусловленно, причем,  $V_t$  и  $V_{aw}$  контролируют кинетику трансформационных процессов соответствующих полей, а длины  $\chi$  и  $\lambda$  задают пространственные масштабы процессов перераспределения. Если уравнение инварианта (21) представить как

$$\frac{\lambda/\chi}{V_t/V_{aw}} = \frac{P_{scale}}{P_{kin}} = \hat{Z}, \quad (23)$$

то отношениям  $\lambda/\chi = p_{scale} > 1$  и  $V_t/V_{aw} = p_{kin} > 1$  на основании [25] можно придать смысл масштабной и кинетической термодинамических вероятностей. Первая из них  $p_{scale}$  интерпретируется как число возможных мест за-

рождения автоволны локализованного пластического течения в деформируемой среде, то есть, она определяет различие пространственных масштабов упругого и пластического деформационных процессов. Что же касается *кинетической* термодинамической вероятности  $p_{kin}$ , то она задает выбор деформируемой системой скорости автоволны из интервала ее физически возможных значений  $0 \leq V_{aw} \leq V_t$ .

С учетом сказанного из уравнения (23) следует соотношение

$$\Delta S = -k_B \ln p_{kin} + k_B \ln p_{scale} = -\Delta S_{kin} + S_{scale} = k_B \ln \frac{1}{2} < 0,$$

из которого следует, что в процессе генерации фазовой автоволны энтропия деформируемой системы уменьшается на  $-\Delta S = \Delta S_{scale} - \Delta S_{kin}$ . Знаки слагаемых  $\Delta S_{scale} > 0$  и  $\Delta S_{kin} < 0$  в уравнении (27) указывают на антагонизм вкладов названных факторов в природу локализованной пластической деформации. Вклад от различия масштабов  $\lambda/\chi = p_{scale}$  диссипативен, поскольку связан со структурой среды, а этот фактор есть причина дисперсии и вообще диссипативных процессов. Напротив, вклад от различия скоростей  $V_t/V_{aw} = p_{kin}$  уменьшает энтропию системы, видимо, сигнализирует о самоорганизации среды. Величина  $\Delta S < 0$  характеризует общее уменьшение энтропии при формировании фазовой автоволны локализации пластического течения, что характерно для процессов самоорганизации. Так как

$$\hat{Z} = \exp\left(-\frac{\Delta S}{k_B}\right) \approx \frac{1}{2}, \quad (28)$$

то  $\Delta S = k_B \ln 1/2 \approx -0.7 k_B$  на элементарный релаксационный акт.

Уточним полученные соотношения, рассмотрев связь упругих и пластических смещений элементов деформируемой среды при малом ее отклонении от равновесия. Вблизи энергетического минимума, соответствующего равновесию, скорости смещений при пространственно-временных трансформациях полей деформаций и напряжений в деформируемой системе с точностью до малых первого порядка могут быть приняты линейными по градиентам пластических и упругих деформаций [25]. Тогда

$$\dot{u}_{pl}^{(p)} \approx D_{ee} \nabla \varepsilon_{pl}, \quad (29)$$

$$\dot{u}_{el}^{(p)} \approx D_{\sigma\sigma} \nabla \varepsilon_{el}, \quad (30)$$

соответственно. Из-за нелинейности связи деформации и напряжения, задаваемой кривой пластического течения  $\sigma(\varepsilon)$ , нужно учесть также возникновение дополнительных к (29) и (30) скоростей

$$\dot{u}_{el}^{(ad)} \approx D_{e\sigma} \nabla \varepsilon_{pl}, \quad (31)$$

$$\ln \hat{Z} = \ln p_{scale} - \ln p_{kin}, \quad (24)$$

которое с помощью формулы Больцмана преобразуется в уравнения для изменений энтропии, связанной с разницей масштабов

$$\Delta S_{scale} = k_B \ln \frac{\lambda}{\chi} = k_B \ln p_{scale}, \quad (25)$$

и разницей скоростей

$$\Delta S_{kin} = k_B \ln \frac{V_t}{V_{aw}} = k_B \ln p_{kin}. \quad (26)$$

Окончательно из уравнений (24 – 26) вытекает

$$\dot{u}_{pl}^{(ad)} \approx D_{e\sigma} \nabla \varepsilon_{el}. \quad (32)$$

В общем случае система уравнений для пластической и упругой составляющей скоростей смещений может быть записана в виде

$$\begin{cases} \dot{u}_{pl} = D_{ee} \nabla \varepsilon_{pl} + D_{e\sigma} \nabla \varepsilon_{el}, \\ \dot{u}_{el} = D_{\sigma e} \nabla \varepsilon_{el} + D_{\sigma\sigma} \nabla \varepsilon_{pl}, \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_{pl} = D_{ee} \nabla \varepsilon_{pl} + D_{e\sigma} \nabla \varepsilon_{el}, \\ \dot{u}_{el} = D_{\sigma e} \nabla \varepsilon_{el} + D_{\sigma\sigma} \nabla \varepsilon_{pl}, \end{cases} \quad (34)$$

причем коэффициенты уравнений (33) и (34)

образуют матрицу  $\begin{bmatrix} D_{ee} & D_{e\sigma} \\ D_{\sigma e} & D_{\sigma\sigma} \end{bmatrix}$ , что объясняет

смысл индексации коэффициентов в уравнениях (7) и (8).

Согласно принципу симметрии кинетических коэффициентов Онзагера [25], недиагональные компоненты этой матрицы равны, то есть,  $D_{e\sigma} = D_{\sigma e}$ . В то же время диагональные коэффициенты матрицы  $D_{ee}$  и  $D_{\sigma\sigma}$ , которые являются коэффициентами автоволновых уравнений локализованного пластического течения (7) и (8), не обязаны быть равными: в [8], например, было показано, что  $D_{ee} \ll D_{\sigma\sigma}$ . Поскольку инвариант (21) связывает характеристики упругих и пластических процессов в деформируемой среде, его можно считать основным уравнением развивающейся автоволновой теории локализованного пластического течения. В пользу этого заключения говорит то, что из уравнения инварианта (21) можно вывести ряд следствий, которые не только позволяют понять природу значительного числа важных закономерности развития локализованной пластичности, но и описывают их количественно. Прежде всего, может быть получено соотношение для скорости распространения автоволн. Если уравнение инварианта (21) проинтегрировать по деформации  $\varepsilon$

$$\lambda \frac{dV_{aw}}{d\varepsilon} + V_{aw} \frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \hat{Z} \cdot \chi \frac{dV_t}{d\varepsilon} + \hat{Z} \cdot V_t \frac{d\chi}{d\varepsilon} \quad (35)$$

и записать результат относительно  $V_{aw}$ , то получим

$$V_{aw} = \left( \frac{d\lambda}{d\varepsilon} \right)^{-1} \left( \hat{Z} \cdot \chi \frac{dV_t}{d\varepsilon} + \hat{Z} \cdot V_t \frac{d\chi}{d\varepsilon} - \lambda \frac{dV_{aw}}{d\varepsilon} \right). \quad (36)$$

Межплоскостное расстояние  $\chi$  не зависит от пластической деформации, так что  
 $\hat{Z}V_t d\chi/d\varepsilon = 0$ , и

$$V_{aw} = \hat{Z}\chi \cdot \frac{dV_t}{d\lambda} - \lambda \cdot \frac{dV_{aw}}{d\lambda}. \quad (37)$$

Преобразования уравнения (37) приводят к соотношению

$$V_{aw} = \hat{Z}\chi \cdot \frac{dV_t}{d\lambda} - \chi \cdot \frac{dV_{aw}}{d\lambda} \cdot \frac{\lambda}{\chi} \approx V_0 + \frac{\Xi}{\theta}, \quad (38)$$

аналогичному ранее экспериментально полученной зависимости  $V_{aw}(\theta) \sim \theta^{-1}$  [8], если представить коэффициент деформационного упрочнения как отношению структурных параметров  $\theta \approx \chi/\lambda$ , где  $\chi \ll \lambda$ .

Далее запишем уравнение инварианта (21) в форме

$$V_{aw} = \frac{\Theta}{\lambda} = \frac{\Theta}{2\pi} \cdot k, \quad (39)$$

где  $\Theta = \hat{Z}\chi V_t$ . Если  $V_{aw} = d\lambda/dT = d\omega/dk$ , то  $d\omega = (\Theta/2\pi) \cdot k \cdot dk$ . В этом случае

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \frac{\Theta}{2\pi} \int_0^{k-k_0} k \cdot dk, \quad (40)$$

и закон дисперсии автоволн локализованного пластического течения приобретает квадратичную форму

$$\frac{d\lambda}{d\delta} = \hat{Z}\chi \cdot \frac{d}{d\delta} \left( \frac{V_t}{V_{aw}} \right) = \hat{Z}\chi \cdot \left( \frac{V_{aw} \cdot dV_t/d\delta - V_t \cdot dV_{aw}/d\delta}{V_{aw}^2} \right), \quad (44)$$

откуда следует

$$d\lambda = \hat{Z}\chi \cdot \left( \frac{dV_t}{d\delta} \cdot \frac{1}{V_{aw}} - V_t \frac{dV_{aw}}{d\delta} \cdot \frac{1}{V_{aw}^2} \right) \cdot d\delta = (a_1 \lambda - a_2 \lambda^2) \cdot d\delta, \quad (45)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{1}{V_t} \cdot \frac{dV_t}{d\delta} = \frac{d \ln V_t}{d\delta} \text{ и } a_2 = \frac{1}{\hat{Z}\chi V_t} \cdot \frac{dV_{aw}}{d\delta},$$

поскольку  $V_{aw} = \hat{Z}\chi V_t \cdot \frac{1}{\lambda}$ . Уравнение (45), очевидно, есть дифференциальное уравнение для функции  $\lambda(\delta)$ , обсуждавшейся выше. Как было показано, его решение есть логистическая функция (6), так что зависимость  $\lambda(\delta)$  есть следствие из инварианта (21).

Пусть определение длины автоволны производится в образцах разной длины  $L$ . В этом случае

$$\frac{d}{dL} (\lambda V_{aw}) = \frac{d\lambda}{dL} V_{aw} + \lambda \frac{dV_{aw}}{dL} = \hat{Z} \frac{d}{dL} (\chi V_t) = 0, \quad (46)$$

а

$$\frac{d\lambda}{dL} = - \frac{\lambda}{V_{aw}} \frac{dV_{aw}}{dL}. \quad (47)$$

$$\omega(k) = \omega_0 + \frac{\Theta}{4\pi} (k - k_0)^2, \quad (41)$$

где  $\Theta/4\pi \equiv \alpha$ . Это соотношение было установлено экспериментально.

Для количественной оценки, придав уравнению (22) форму

$$V_{aw} \approx \hat{Z}\chi^2 \frac{k_B \theta_D}{h} \cdot \frac{1}{\lambda} \approx \hat{Z}\chi^2 \frac{k_B \theta_D}{h} \cdot k \approx \zeta \cdot k, \quad (42)$$

можно вычислить коэффициент  $\zeta = \hat{Z}\chi^2 \cdot k_B \theta_D / h \approx \hat{Z}\chi^2 \cdot \omega_D$ . Зная величины  $\square$  и значения дебаевского параметра  $\theta_D^{(Fe)} = 420$  К и  $\theta_D^{(Al)} = 394$  К [24], находим  $\zeta^{(Fe)} \approx 3.7 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, а  $\zeta^{(Al)} \approx 4.45 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Это согласуется с приведенными в книге [8] вычисленными из экспериментальных данных о зависимости  $V_{aw}(k)$  значениями  $\zeta^{(Fe)} = (1.0 \pm 0.08) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\zeta^{(Al)} = (12.9 \pm 0.15) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Для анализа формы зависимости  $\lambda(\delta)$  запишем уравнение инварианта (21) в виде

$$\lambda = \hat{Z}\chi \cdot \frac{V_t}{V_{aw}}. \quad (43)$$

Так как скорости  $V_t$  и  $V_{aw}$  зависят от размера зерна  $\delta$ , то дифференцирование соотношения (43) по  $\delta$  дает

$$\frac{d\lambda}{d\delta} = \hat{Z}\chi \cdot \frac{d}{d\delta} \left( \frac{V_t}{V_{aw}} \right) = \hat{Z}\chi \cdot \left( \frac{V_{aw} \cdot dV_t/d\delta - V_t \cdot dV_{aw}/d\delta}{V_{aw}^2} \right), \quad (44)$$

При условиях  $\lambda = \lambda_0 = const$  и  $dV_{aw}/dL \approx V_{aw}/L$  имеем

$$\frac{d\lambda}{dL} \approx \frac{\lambda_0}{V_{aw}} \cdot \frac{V_{aw}}{L} \quad (48)$$

и  $d\lambda \sim dL/L$ , то есть,  $\lambda \sim \ln L$ , как было установлено экспериментально [9].

Можно показать, что из инварианта (21) следует уравнение автоволновой пластиичности. Для этого запишем инвариант в виде

$$\frac{\lambda}{\chi} = \hat{Z} \cdot \frac{V_t}{V_{aw}} \quad (49)$$

и примем, что  $\varepsilon \approx \lambda/\chi \gg 1$  - пластическая деформация. Применяя оператор  $\partial/\partial t = D \cdot \partial^2/\partial x^2$  к обеим частям уравнения (49), получаем

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \hat{Z}D \left( -V_t \cdot \frac{\partial^2 V_{aw}^{-1}}{\partial x^2} + V_{aw}^{-1} \cdot \frac{\partial^2 V_t}{\partial x^2} \right) = \hat{Z}D \left[ -V_t \cdot \frac{\partial^2 V_{aw}^{-1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (V_t/V_{aw})}{\partial x^2} \right]. \quad (50)$$

Заметим, что оператор  $\partial/\partial t = D \cdot \partial^2/\partial x^2$  очевидным образом может быть получен из универсального уравнения  $\partial y/\partial t = D \partial^2 y/\partial x^2$ . Если положить, что скорость распространения ультразвука  $V_t \approx const$  и  $V_t/V_{aw} \approx \hat{Z}^{-1} \cdot \lambda/\chi \approx \varepsilon$ , то

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\hat{Z}DV_t \frac{\partial^2 V_{aw}^{-1}}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}. \quad (51)$$

Нетрудно видеть, что это соотношение представляет собой реакционно-диффузионное уравнение для скорости деформации

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f(\varepsilon) + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \quad (52)$$

полностью эквивалентное введенному ранее автоволновому уравнению (7) для пластической деформации.

$$-\hat{Z}DV_t \frac{\partial^2 V_{aw}^{-1}}{\partial x^2} \approx -\hat{Z}^2 \cdot \chi V_t^2 \cdot b\omega_D \cdot \frac{V_{aw}^{-1}}{x^2} \approx -\hat{Z}^2 bV_t \frac{V_t/V_{aw}}{l^2} \approx -\hat{Z}^2 V^{*-1} b\rho_{mob} V_t. \quad (53)$$

Скорости дислокаций  $V_{disl}$  и ультразвуковых волн  $V_t$  пропорциональны друг другу, поэтому положим, что  $V_t \approx \alpha V_{disl}$ , где  $\alpha = const > 1$ . Тогда

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\alpha \frac{\hat{Z}^2}{V^*} \cdot b\rho_{mob} V_{disl} + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} = \alpha b\rho_{mob} V_{disl} + D_{\varepsilon\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}. \quad (54)$$

Очевидно, что уравнение Тейлора-Орована (13) отличается от уравнения (54) отсутствием диффузионного члена  $D_{\varepsilon\varepsilon} \partial^2 \varepsilon / \partial x^2$  в правой части. Его следует рассматривать как частный случай более общего уравнения деформационной кинетики, включающего, как сказано, гидродинамическую и диффузионно-подобную компоненты деформационного потока. Соответственно, дислокационные механизмы деформации, основанные на уравнении (13), суть частные случаи автоволновой модели пластического течения, справедливые при малых плотностях дислокаций. В этом пределе уравнение Тейлора-Орована допускает получение правильных результатов.

Интерпретация коэффициентов  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  и  $D_{\sigma\sigma}$  в уравнениях (7) и (8) может быть основана на том, что коэффициент  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  связан с плотностью подвижных дислокаций, а коэффициент  $D_{\sigma\sigma}$  определяется распределением напряжений. Из соображений размерности можно записать

$$D_{\sigma\sigma} \approx \sqrt{\frac{F}{\rho_0}}, \quad (55)$$

где  $F$  – сила натяжения образца во время испытания и

развивая этот анализ, можно уточнить связь развиваемого автоволнового подхода к пластическому течению с дислокационными моделями следующим образом. Сравнивая уравнения (13) и (51), можно заключить, что первый член в правой части уравнения (51)  $-\hat{Z}DV_t(V_{aw}^{-1})''$  аналогичен члену  $b\rho_m V_{disl}$  в уравнении Тейлора-Орована (13), если принять, что  $V_t \approx \chi\omega_D \approx b\omega_D$ , а  $D_{\varepsilon\sigma} = \hat{Z}D_{\sigma\varepsilon} = \hat{Z}\chi V_t$  а  $(V_{aw}^{-1})'' \approx V_{aw}^{-1}/x_2$ . При хаотическом распределении дислокаций  $x^{-2} \approx l^{-2} \approx \rho_m$ , где  $l$  – пробег дислокаций. Тогда

$$D_{\varepsilon\varepsilon} \approx \frac{d}{dt} \rho_{md}^{-1}. \quad (56)$$

Плотность подвижных дислокаций  $\rho_{md}$  экстремально зависит от деформации, а ее производная (56) может менять знак при деформации.

Из уравнения (55) следует, что  $D_{\sigma\sigma} \approx 1 \text{ м}^2/\text{с}$ . Величина  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  по уравнению (56), определяется менее точно, поскольку имеющиеся в литературе данные о плотности подвижных дислокаций на разных стадиях пластического течения отличаются в значительной степени. Однако используя экспериментальные данные, можно полагать, что  $10^{-8} \leq D_{\varepsilon\varepsilon} \leq 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , так что  $D_{\varepsilon\varepsilon} \ll D_{\sigma\sigma}$ . Выполнение этого условия, соответствующего более медленному распространению активатора (пластические деформации) по сравнению с ингибитором (напряжения или упругие деформации), обязательно для реализации процесса генерации автоволн в активных средах [6].

Коэффициент  $D_{\sigma\sigma}$  описывает перераспределение напряжений в объеме образца за счет случайных блужданий, а коэффициент  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  определяется

перестройкой дислокационной субструктурой. В таком случае  $D_{\sigma\sigma}$  можно считать характеристикой макроуровня пластического течения, а  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  связать с кинетикой развития деформации на мезоуровне. В диффузионном приближении представим эти коэффициенты в общем виде как произведения длины свободного пробега  $\mathbf{R}$  и скорости  $\mathbf{V}$ , то есть,  $D = \mathbf{R}\mathbf{V}$ . Под  $\mathbf{R}\square$ - можно понимать размер области неоднородности в деформируемой системе, а под  $\mathbf{V}$  – скорость перераспределения деформаций или напряжений в ней. Так как коэффициент  $D_{\sigma\sigma}$  связан с перераспределением напряжений, то характерная скорость этого процесса  $\mathbf{V} = V_t \approx 10^3$  м/с. В этом случае параметр  $\mathbf{R} \equiv l_\sigma = D_{\sigma\sigma}/V_t \approx 10^{-3}$  м можно считать мезоскопическим масштабом неоднородности пластической деформации. Для коэффициента  $D_{\varepsilon\varepsilon} \approx 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с, очевидно,  $\mathbf{V} \approx V_{disl} \approx 10$  м/с, и в этом случае  $\mathbf{R} \equiv l_\varepsilon \approx D_{\varepsilon\varepsilon}/V_{disl} \approx nb \approx 10^{-9}$  м, где  $n \approx 2-5$ , отвечает дислокационному масштабу пластического течения.

В результате возникает иерархия структурных уровней пластической деформации, которая основана на том, что коэффициенты  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  и  $D_{\sigma\sigma}$ , характеризующие макроскопический и мезоскопический масштабы автоволн, соответственно, содержат длины, характеризующие нижележащий уровень пластического течения. В таком случае уравнение

$$D_{\varepsilon\varepsilon} \approx l_d V_{disl} \quad (57)$$

связывает коэффициент  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  для мезомасштаба с дислокационной характеристикой  $l$ , а уравнение

$$D_{\sigma\sigma} \approx l_{meso} V_t \quad (58)$$

#### Параметры автоволновых процессов локализации деформации

Состав сплава (масс. %)	структура	$V_{av} \cdot 10^5$ м/с	$D_{\varepsilon\varepsilon} \cdot 10^7$ м <sup>2</sup> /с	$\mathbf{R} \cdot 10^9$ , м
Fe-0.1 %C-2 %Mn	поли	4.5	8.1	5.3
Cu – 10 %Ni – 6 %Sn	моно	6.5	7.6	5.2
NiTi (эквивалентный)	моно	1.0	0.8	0.6
Ni <sub>3</sub> Mn (упоряд. состояние)	поли	10.0	13.5	6.8
$\gamma$ -Fe	моно	3.5	7.8	4.3
$\gamma$ -Fe – 0.5%N	моно	2.7	2.0	1.0

Известно, что показатели механических характеристик поликристаллов (предел текучести, временное сопротивление, напряжение течения) зависят от размера зерна, согласно соотношению Холла-Петча [3]. Кроме того, ранее было установлено, что длина автоволны локализованной деформации связана с размером зерна логистическим уравнением (6). По этим причинам следует проверить выполнение инварианта (21) в разных диапазонах размеров зерна, проводя испытания поликристаллического алюминия, в котором методом рекристаллизации удавалось вырастить зерна

выполняет ту же роль для макро- и мезоскопического уровней. Соотношения (57) и (58) связывают масштабы пластической деформации так, что в транспортный коэффициент в качестве множителя входит масштаб нижележащего уровня. При этом пространственный масштаб нижележащего уровня определяет кинетику процессов на вышележащем через соответствующий диффузионный коэффициент автоволновых уравнений (7) и (8).

Результаты вычислений по формулам (57) и (58) представлены в таблице 1. Коэффициент  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  оценивался из экспериментальных данных по смещению фронтов деформации  $\delta x$  за время  $t$ , то есть, как  $D_{\varepsilon\varepsilon} \approx (\delta x)^2/t$ . При обсуждении соотношения масштабов примем во внимание также, что для автоволн в активных средах характерно наличие минимального размера системы  $l_{min}$ , допускающего реализацию такого процесса. Из равенства периода колебаний в системе  $\vartheta_{os} \approx 2\pi\omega^{-1}$  и характерного времени диффузии  $\vartheta_D \approx l_{min}^2/2D$  следует

$$l_{min} \approx (2D\vartheta_{os})^{1/2} \approx \left(4\pi \frac{D}{\omega}\right)^{1/2}, \quad (59)$$

где  $D$  – транспортный коэффициент. Используя для расчета  $l_{min}$  характеристики самых медленных деформационных процессов  $D \equiv D_{\varepsilon\varepsilon} \approx 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с и  $\omega \approx 10^{-3}$  Гц, можно получить оценку снизу  $l_{min} \approx 10^{-2}$  м, близкую к экспериментально наблюдаемой длине образца  $l_{min}^{(exp)} \leq 2 \cdot 10^{-2}$  м, при которой не могут возникать и не регистрируются автоволны локализации деформации.

Таблица 1

размером  $10^{-6} \leq \delta \leq 10^{-2}$  м. Результаты такой проверки, приведенные в таблице 2, указывают на выполнимость упругопластического инварианта для описания развития локализованной пластичности в этих условиях.

Из данных, экспериментально полученных в работах [8, 9], известно, что при переходе через граничный размер зерна  $\delta \approx 10^{-4}$  м скорость распространения ультразвуковых волн заметно падает вследствие их рассеяния на границах зерен. С учетом этого обстоятельства результаты вычислений

величин  $\lambda V_{aw}$  для двух диапазонов размеров зерен, приведенные в таблице 2, указывают на выполнимость инвариантного соотношения в таких условиях и связь автоволновых явлений деформации с соотношением Холла-Петча.

Таблица 2

**К проверке инвариантного соотношения (21)**

Диапазон размеров зерен м	$\chi V_t \cdot 10^7$ м <sup>2</sup> /с	$\lambda V_{aw} \cdot 10^7$	$\frac{\lambda V_{aw}}{\chi V_t}$
$5 \cdot 10^{-6} \leq \delta \leq 10^{-4}$	5.13	2.61	~0.5
$10^{-4} \leq \delta \leq 5 \cdot 10^{-3}$	6.17	3.12	~0.5

Полученные результаты исследований локализации пластического течения в поликристаллах алюминия с разным размером зерна, сведенные в таблицу 3, указывают на существование граничного размера зерна  $\delta_b \approx 0,1$  мм, при котором, по-видимому, меняются механизмы деформационного упрочнения. Как показано в [9], это изменение связано с разной степенью обогащения границ примесями. Эти данные частично проиллюстрированы также на рис. 8. Совокупно данные рис. 8 и таблицы 3 свидетельствуют об эффективности применения автоволновой модели к объяснению природы соотношения Холла-Петча.

В рамках двухкомпонентной автоволновой модели находит простое объяснение природа автоволн локализованной пластической деформации. Можно полагать, что в соответствии с кинетическим уравнением Тейлора-Орована  $\dot{\varepsilon} = ab\rho_{md}V_{disl}$  (13), задаваемое испытательной машиной условие постоянства скорости деформации  $\dot{\varepsilon} = const$  может быть удовлетворено только при условии  $\rho_{md}V_{disl} = const$ , выполнению которого способствует достаточно высокая плотность подвижных дислокаций  $\rho_{md}$  и достаточно большая скорость

движения  $V_{disl}$  в поле приложенных напряжений.

Когда названное условие нарушается, например, из-за снижения плотности подвижных дислокаций  $\rho_{md}$  или из-за падения скорости их движения при уменьшении эффективного напряжения, действующего на дислокацию с  $\sigma$  до  $\sigma - Gb\rho_d^{1/2}$  при деформационном упрочнении, то деформируемая среда может обеспечить постоянство скорости деформации, необходимое для целостности образца, появлением дополнительного вклада в величину скорости деформации, который может быть создан только работой диффузионно-подобного члена  $D_{\varepsilon\varepsilon}\varepsilon''$  в уравнении (54).

Наличие такого члена в уравнении скорости деформации, очевидно, способно объяснить не только генерацию новых очагов локализованного пластического течения (формирование автоволны локализованной пластичности), но и появление в деформируемой среде макроскопического масштаба  $\sim \lambda$ , то есть, формирование макроскопической автоволны локализованной пластичности одного из возможных типов. Представляется, что этот механизм лежит в основе генерации автоволн локализованной пластичности и является в достаточной мере общим.

Таблица 3

**Критические точки зависимости механических свойств от размера зерна**

Характеристика	$\delta_b$ м·10 <sup>4</sup>
Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_B$	1.5
Изменение наклона зависимости Холла-Петча $\sigma_f = \sigma_0 + k_f \delta^{-1/2}$	1.0
Исчезновение линейных участков на кривой зависимости $\sigma(\varepsilon)$	>0.5
Изменения коэффициентов зависимости $V_{aw} = V_0 + \Xi/\theta$	1.0-1.5
Пересечение зависимостей $V_{ph}(\delta)$ и $V_{gr}(\delta)$	0.1-0.15
Скорость распространения ультразвука	0.1
Минимум на дисперсионной кривой $\omega(k)$	1.0-1.5
Зависимость длины автоволны от размера зерна $\lambda(\delta)$	2.5
Значения инвариантного соотношения для крупных и мелких зерен	0.5

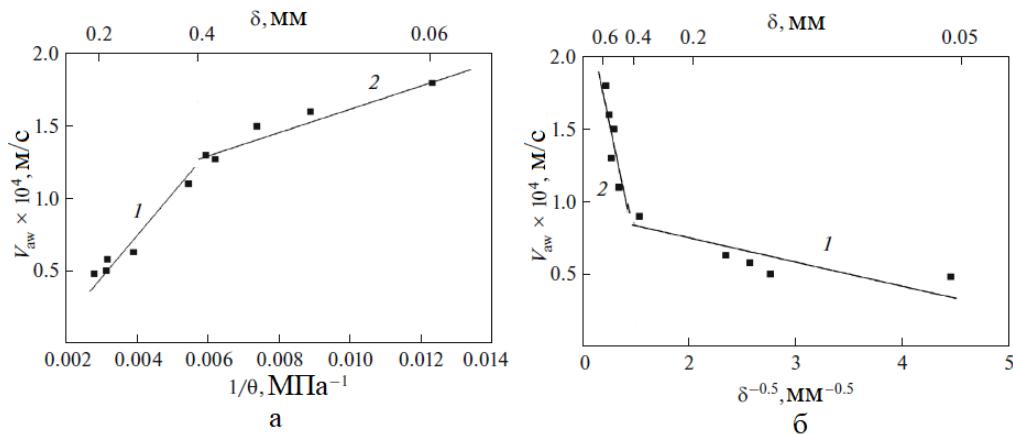


Рисунок 8. Скорость распространения автоволн как функция коэффициента деформационного упрочнения (а) и размера зерна (б): 1 -  $0,005 \leq \delta \leq 0,15 \text{ мм}$ ; 2 -  $0,15 \leq \delta \leq 5 \text{ мм}$

## 5. Заключение

Развиваемый в этой работе взгляд на проблему описания пластической деформации твердых тел ставит во главу угла макроскопические (автоволновые) закономерности развития локализованной пластической деформации. В рамках предложенного подхода локализация пластичности рассматривается как атрибут пластического течения, спонтанно возникающий в результате упорядочения деформационной (дефектной) структуры среды. Крупномасштабная пространственно-временная картина локализации – паттерн локализованного пластического течения - рождается в ходе самоорганизации деформируемой среды, то есть, обретения ею определенного порядка. Паттерны локализации оказываются коррелированными со стадиями деформационного упрочнения деформируемых металлов и сплавов. При этом деформируемая среда рассматривается как открытая система, эволюция которой контролируется как собственным состоянием, так и равномерным притоком энергии от внешнего нагружающего устройства. В рамках такого подхода теория пластичности приобретает право и возможности использовать понятия и аппарат синергетики.

С помощью синергетических представлений о природе возникновения порядка в открытых системах разработана двухкомпонентная модель локализованного пластического течения. В ее основе лежит причинная связь двух подсистем деформируемого тела: элементарных актов пластичности разной природы и сигналов акустической эмиссии, возникающих при этом. Математическая форма модели – упругопластический инвариант деформации – дает возможность сформировать непротиворечивый и достаточно наглядный метод макроскопического описания явления пластического течения. Этот метод пригоден для случаев деформации, реализующихся по разным механизмам, выполняется для материалов разной физико-химической природы и поэтому представляется в достаточной мере универсальным. Многие важные закономерности пластического течения нашли свое объяснение как следствия из упругопластического инварианта.

На базе этой модели удалось выстроить единую систему взглядов на природу макроскопически

локализованного пластического течения, учитывающую такие свойства деформируемых сред, как их неравновесность, нелинейность, активность, память и возможность потери устойчивости кристаллической решетки. Удалось количественным образом описать многоуровневый характер процессов в деформируемой среде. Предложенное описание охватывает кристаллическую решетку, дислокационный, мезоскопический и макроскопический уровни процесса, устанавливая количественное соотношение между пространственными масштабами деформационных процессов. Важным и интересным является тот факт, что деформируемый образец в процессе монотонного растяжения с постоянной скоростью можно рассматривать как универсальный генератор различных мод автоволновых процессов [26].

Принципиальным следствием предложенного подхода явилось выделение в пластически деформируемой среде нового типа макроскопических движений – автоволн локализованного пластического течения. Как выяснено, они возникают на всех стадиях пластической деформации и должны рассматриваться как проявления коллективных эффектов в развитии деформационной (дефектной) структуры. Тип автоволновой моды в деформируемой среде контролируется как собственным состоянием среды, так и непрерывным поступлением энергии от нагружающего устройства (используемой испытательной машины). В такой постановке новый подход естественным образом становится частью проблематики теории неравновесных систем, обретая права и возможности использовать ее фундаментальные понятия, идеальный и математический аппарат для решения задач и поиска плодотворных аналогий с уже решенными в других областях знания задачами [6, 7, 20]. Эта возможность представляется чрезвычайно ценной для понимания природы физики пластичности и выработки перспектив для ее эффективного развития.

Очень существенно, что удалось найти функциональную связь развиваемой автоволновой теории пластической деформации с высокоразвитой дислокационной теорией пластичности. Как выяснилось, последняя является предельным случаем первой для случая малых плотностей подвижных

дислокаций. Стало ясно, что названные теории являются не конкурирующими, а взаимно дополняющими, чем обеспечивается возможность использования многочисленных и вполне корректных в конкретных условиях дислокационных моделей при разработке общих механизмов, контролирующих формирование различных активных автоволновых мод локализованной пластичности в материалах разной природы и структуры.

За годы детальных исследований автоволновые представления о природе пластичности эволюционировали от разрозненных догадок о форме и природе актов локализации пластической деформации [10] до доказательства общего характера этого феномена и отыскания его главных закономерностей [8, 9]. Накопленный за это время объем данных о реализациях автоволновых механизмов пластической деформации подтвердил универсальность нового подхода и его применимость к анализу деформации материалов любой природы и обладающих любой структурой. В рамках автоволнового подхода нашла объяснение природа наиболее важных явлений, характерных для многостороннего эффекта пластического течения.

Можно сказать, что развивающаяся физика неоднородного пластического течения (физика автоволн локализованной пластичности) сегодня заняла в кругу физических дисциплин позицию, которую можно считать адекватной важному месту, по праву принадлежащему ей в совокупности общих представлений о строении и свойствах твердых тел различной природы. С другой стороны, как наука о самопроизвольном формировании структур, физика неоднородной пластичности в такой постановке вошла в перечень наиболее актуальных проблем современной науки – проблем спонтанного возникновения порядка в неравновесных системах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН; тема № FWRW-2021-0011.*

### Литература

1. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х т. – М.: Наука, 1984.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. В 2-х т. – М.: Наука, 1970.
3. Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. – Dordrecht: Springer, 2013.
4. Zaiser M. and Aifantis E.C. Randomness and slip avalanches in gradient plasticity. - Int. J. Plasticity, 2006, V. 22, N 8.
5. Messerschmidt U. Dislocation Dynamics during Plastic Deformation. - Berlin: Springer, 2010.
6. Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. – М.: Наука, 1987.
7. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: URSS, 2014.

8. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018.
9. Zuev L.B. et al. Plasticity: from crystal lattice to macroscopic phenomena. – Prog. Phys. Met., 2021, V. 22, N 1.
10. Зуев Л.Б. О формировании автоволн пластичности при деформации. - МФНТ, 1994, Т. 16, № 10.
11. Hähner P. Theory of solitary plastic waves. – Appl. Phys., 1994, V. A58, N 1.
12. Kolsky H. Stress Waves in Solids. – New York: Dover, 1963.
13. Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием количества вещества, и его применение к одной биологической проблеме. - Бюлл. МГУ. Серия А. Математика и механика, 1937, Т. 1, № 1.
14. Донт Г. К теории низкотемпературного максимума внутреннего трения в металлах. – Ультразвуковые методы исследования дислокаций. – М.: ИЛ, 1963.
15. Shibkov A.A. et al. Intermittent plasticity associated with the spatio-temporal dynamics of deformation bands during creep tests in an AlMg polycrystal. - Int. J. Plasticity, 2016, V. 86, N 8.
16. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов. - УФН, 1999, Т. 169, № 1.
17. Малыгин Г.А. Механизм пластического коллапса наноразмерных кристаллов с ОЦК-решеткой при одноосном сжатии. – ФТТ, 2018, Т. 60, № 6.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021.
19. Hull D. and Bacon D.J. Introduction in Dislocations. - Oxford: Elsevier, 2011.
20. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. - М.: Мир, 1990.
21. Seeger A. and Frank W. Structure formation by dissipative processes in crystals with high defect densities. - Non-Linear Phenomena in Materials Science. - New York: Trans. Tech. Pub., 1987.
22. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. - М.: Редакция УФН, 1997.
23. Caillard D. and Martin J.L. Thermally Activated Mechanisms in Crystal Plasticity. – Oxford: Elsevier, 2003.
24. Newnham R.E. Properties of Materials. – Oxford: University Press, 2005.
25. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. - Новосибирск: НГУ, 2000.
26. Зуев Л.Б. Кристаллическое тело как универсальный генератор автоволн локализованной пластичности. - Известия РАН. Сер. физич., 2014, Т. 78, № 10.

Nº51 2024

**Annali d'Italia**

ISSN 3572-2436

The journal is registered and published in Italy.

Articles are accepted each month.

Frequency: 12 issues per year.

Format - A4 All articles are reviewed

Free access to the electronic version of journal

**Chief editor:** Cecilia Di Giovanni

**Managing editor:** Giorgio Bini

- Hoch Andreas MD, Ph.D, Professor Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy (Munich, Germany)
- Nelson Barnard Ph.D (Historical Sciences), Professor (Malmö, Sweden)
- Roberto Lucia Ph.D (Biological Sciences), Department Molecular Biology and Biotechnology (Florence, Italy)
- Havlíčková Tereza Ph.D (Technical Science), Professor, Faculty of Mechatronics and Interdisciplinary Engineering Studies (Liberec, Czech Republic)
- Testa Vito Ph.D, Professor, Department of Physical and Mathematical management methods (Rome, Italy)
- Koshelev Andrey Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Faculty of Philology and Journalism (Kiev, Ukraine)
- Nikonorov Petr Doctor of Law, Professor, Department of Criminal Law (Moscow, Russia)
- Bonnet Nathalie Ph.D (Pedagogical Sciences), Faculty of Education and Psychology (Lille, France)
- Rubio David Ph.D, Professor, Department of Philosophy and History (Barcelona, Spain)
- Dziedzic Stanisław Ph.D, Professor, Faculty of Social Sciences (Warsaw, Poland)
- Hauer Bertold Ph.D (Economics), Professor, Department of Economics (Salzburg, Austria)
- Szczepańska Janina Ph.D, Department of Chemistry (Wrocław, Poland)
- Fomichev Vladimir Candidate of Pharmaceutical Sciences, Department of Clinical Pharmacy and Clinical Pharmacology (Vinnytsia, Ukraine)
- Tkachenko Oleg Doctor of Psychology, Associate Professor (Kiev, Ukraine)

and other experts

Edition of journal does not carry responsibility for the materials published in a journal. Sending the article to the editorial the author confirms it's uniqueness and takes full responsibility for possible consequences for breaking copyright laws

500 copies

Annali d'Italia

50134, Via Carlo Pisacane, 10, Florence, Italy

email: [info@anditalia.com](mailto:info@anditalia.com)

site: <https://www.anditalia.com/>