

DOI: 10.31319/2519-8106.2(51)2024.317635
UDC 539.3

Belokon Yuriy¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technological Safety

Бєлоконь Ю.О., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

ORCID: 0000-0002-9327-5219 e-mail: belokon.zp@gmail.com

Sereda Dmytro², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of industrial engineering

Серєда Д.Б., кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування

ORCID: 0000-0003-4353-1365 e-mail: seredabp@ukr.net

Zholobko Bohdan¹, Postgraduate, Junior Scientific Assistant, Assistant of Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technological Safety

Жолобко Б.О., здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, молодший науковий співробітник, асистент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

ORCID: 0009-0005-5567-0743 e-mail: zholobko.ph@znu.edu.ua

Sahuliakin Oleksandr¹, Postgraduate, Junior Scientific Assistant, Assistant of Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technological Safety

Сагулякін О.Є., здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, молодший науковий співробітник, асистент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

ORCID: 0009-0009-9153-2806 e-mail: aleksandrsagulakin@gmail.com

Yavtushenko Anna¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technological Safety

Явтушенко А.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

ORCID: 0000-0003-1112-5426 e-mail: yavtushenko.anna.v@gmail.com

¹Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia

Запорізький національний університет, Запоріжжя

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

MODELING OF LOCAL PLASTIC DEFORMATION PROCESSES UNDER EXTREME OPERATING CONDITIONS

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛОКАЛЬНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ В ЕКСТИМАЛЬНИХ РОБОЧИХ УМОВАХ

The objective of this study is to conduct an in-depth analysis of the impact dynamics and deformation characteristics of an aluminum plate subjected to high-speed collision. This investigation aims to enhance the understanding of the material's response to high-velocity impact, identify potential weaknesses, and evaluate the effectiveness of aluminum alloys as a lightweight protective material. The research is particularly relevant for industries requiring a balance between structural integrity, weight optimization, and cost-efficiency. Traditional protective materials, such as steel, provide high strength but increase overall weight, limiting mobility in certain applications. Aluminum alloys

present a promising alternative for various engineering solutions, offering reduced weight while maintaining substantial durability.

Keywords: *impact dynamics, aluminum alloys, computational modeling, deformation analysis, lightweight protection, energy absorption, high-velocity impact.*

Мета дослідження полягає у проведенні глибокого аналізу динаміки удару та деформаційних характеристик алюмінієвої пластини в умовах високошвидкісного зіткнення. Основними завданнями роботи є вивчення особливостей поведінки алюмінієвого матеріалу при впливі великих динамічних навантажень, визначення потенційних слабких місць конструкції, оцінка ефективності алюмінієвих сплавів як легкого захисного матеріалу, а також розробка рекомендацій щодо підвищення їх міцності. Це дослідження має особливу актуальність у контексті сучасних вимог до створення конструкцій, що поєднують високу міцність, знижену вагу та економічну ефективність. Традиційні матеріали, такі як сталь, демонструють високу стійкість до механічних впливів, однак їх значна маса обмежує можливості застосування в багатьох сферах, наприклад, у транспортній галузі чи авіації, де мінімізація ваги є критичним параметром. Натомість алюмінієві сплави, зокрема Al 7039, мають низьку щільність та достатню міцність, що робить їх перспективними для вирішення завдань із захисту об'єктів, де важливим є баланс між захистом і мобільністю. Додатково метою є аналіз здатності алюмінієвих сплавів до поглинання енергії удару та оцінка їх довговічності в екстремальних умовах. Використання методів комп'ютерного моделювання, таких як явна динаміка (Explicit Dynamics), дозволяє з високою точністю дослідити процеси руйнування та пластичної деформації матеріалу, а також зекономити час і ресурси порівняно з проведенням реальних експериментів. Застосування моделі Джонсона-Кука забезпечує врахування впливу температури, швидкості деформації та зміцнення матеріалу на його поведінку під час удару, що дозволяє створити детальну картину процесів, які відбуваються в матеріалі. Окремий інтерес становить розробка багатошарових конструкцій із алюмінієвими пластинами, підсиленими керамічними матеріалами, для зменшення глибини проникнення та мінімізації фрагментації ударного тіла. Таким чином, отримані результати можуть бути застосовані для створення нових інженерних рішень у сферах авіаційної, автомобільної та військової промисловості, де вимоги до зниження ваги конструкцій поєднуються із забезпеченням високого рівня захисту.

Ключові слова: *динаміка удару, алюмінієві сплави, комп'ютерне моделювання, аналіз деформації, полегшений захист, поглинання енергії, високошвидкісний удар.*

Problem's Formulation

The study of modeling the impact of high-velocity objects on aluminum plates provides valuable insights into the material's behavior under impact loads and helps identify potential areas for improvement. This research holds practical significance in industries where a balance of protection, lightweight design, and cost-effectiveness is critical.

Traditional protective materials, such as steel, offer high strength but are considerably heavy, which can limit the efficiency and mobility of certain applications. Aluminum alloys present an alternative for scenarios requiring reduced weight and substantial durability, making them a viable choice for lightweight yet robust structural elements.

Analysis of recent research and publications

The analysis of scientific literature highlights the effectiveness of using mathematical and software modeling for various tests and experiments. Aluminum alloys have been examined as components of composite materials [1], as standalone protective materials [2], and in comparative studies with other materials [3, 4].

Computer modeling of material damage processes offers the ability to analyze deformation and fracture characteristics while achieving significant savings in time and resources. Additionally, it provides the advantage of flexible and adaptive process control. The literature review indicates a strong correlation between modeling results and experimental impact tests, confirming the rationality of using this approach.

Formulation of the study purpose

Study of damage features and plastic deformation of aluminum material.

Presenting main material

The Johnson-Cook fracture model was used to model the plate damage. This model takes into account strain hardening and the dependence of stress on strain rate and temperature.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{-p^n})(1 + C \cdot \ln \varepsilon^*)(1 - (T^*)^m), \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0},$$

where ε^p — is the effective plastic strain; $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0$ is the effective plastic strain rate, $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \cdot \text{s}^{-1}$; A , B , n , C , m are constants that depend on the material properties and are determined experimentally; T_0, T_m are the ambient temperature and melting point of the material.

The fracture deformation process is determined by the ratio:

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \varepsilon^*) (1 + D_5 T^*),$$

where D_i ($i = 1, \dots, 5$) are the material parameters; σ^* is the stiffness coefficient of the stressed state.

The failure model describes the damage history of each element using the damage parameter D . Failure of an element occurs when $D \geq 1$.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^{-p}}{\varepsilon^f}.$$

To reduce the total time for calculating the problem, an axisymmetric problem formulation with a constraint on the x-axis was created (Fig. 1) using the “fixed support” tool to the outer edges of the material under study.

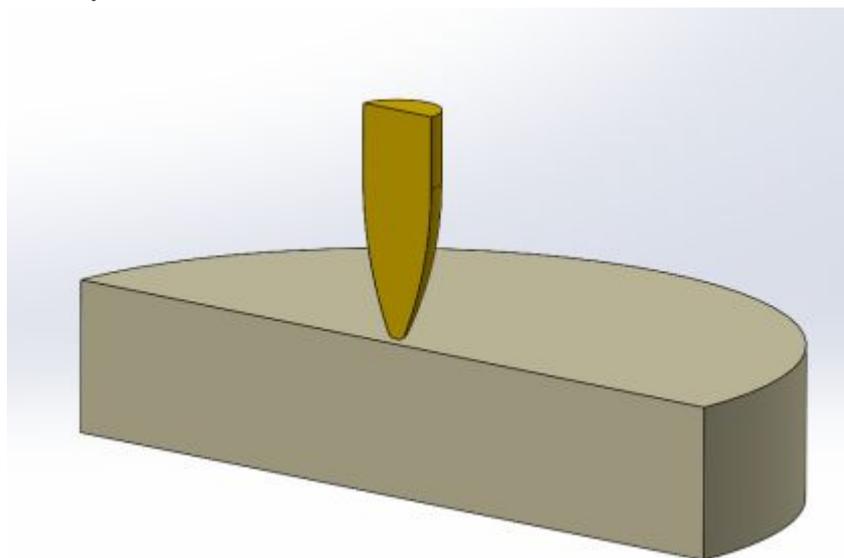


Fig. 1. Schematic representation of the axisymmetric model formulation

The formulation is shown schematically in Fig. 1. The finite element mesh was created using the “HEX Dominant” method for the plate and the “Tetrahedrons” method for the ball.

The mesh element size is 0.5 mm. The tetrahedral mesh was chosen for modeling the ball due to the optimal balance between the quality of the deformation modeling process and the resource intensity of modeling the named parameter.

Setting up analysis parameters:

- The general setting option in Explicit Dynamics was set to “High-speed”;
- The final calculation time is $1 \cdot 10^{-4}$ s;
- The material erosion parameter is erosion by plastic deformation and material fracture, where the plastic deformation parameter is 1.1; the inertia transfer of the compensated material is active.

The plate was chosen with a thickness of 10 mm and a radius of 25 mm. The object is of 5.45 mm. The object velocity is 900 m/s. The properties of both materials are presented in Tabl. 1 and 2. For the material aluminum 7039, the values of the coefficients for the Johnson-Cook model are presented.

Table 1. Material parameters of Al 7039 [5]

Property	Meaning	Unit
Density	2770	J /m ³
Heat capacity at constant pressure, C_p	875	J /kg·C°
Shore's module	2,76e+10	Pa
Mie-Grüneisen equation of state		
The Grüneisen coefficient	2	—
Setting C1	5328	m/s
Setting S1	1,338	—
The Johnson-Cook model		
Setting A	3,37e+8	Pa
Setting B	3,43+8	Pa
Setting C	0,41	—
Setting m	1	—
Setting n	0,01	—
Melting point	603,85	C°

Table 2. Material parameters of brass C37700 [6]

Property	Meaning	Unit
Density	8267	Kg/m ³
Heat capacity at constant pressure, C_p	377,1	J/kg·C°
Shore's module	3,7156e+10	Pa
Jung's module, E	9,995e+10	Pa
Poisson's ratio	0,345	—
All-round crimping module, K	1,0747e+11	Pa

The image depicts the results of a CAE (Explicit Dynamics) simulation of a high-speed object impacting an aluminum plate. The color scale on the left indicates the intensity of elastic stresses generated in the plate at the moment of impact.

The red areas represent regions with maximum stress values, while the blue areas denote minimum stress values. Stress values are measured in units of "mm^{-№}," reflecting the level of deformation at various points on the plate. The maximum stress value at this stage is 0.04945 mm^{-№}. The finite element mesh visualizes the structure and distribution of elements used for modeling the material and monitoring stress behavior. Red markers may indicate material fragments or particles separated from the main body due to elevated stress levels. This analysis provides a visual representation of the impact zone, stress intensity distribution, and potential regions of material deformation or failure under load.

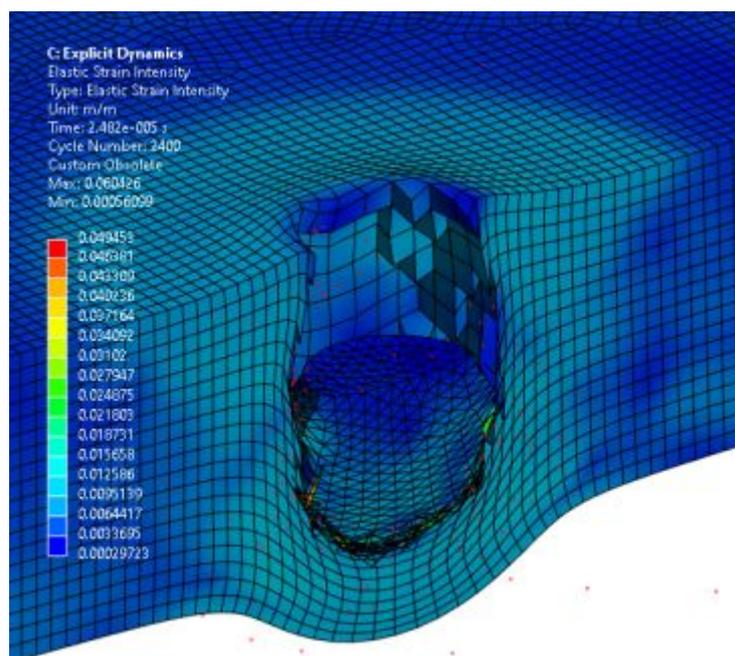


Fig. 2. Elastic Strain intensity

The change in the kinetic energy of the object is approximately 422.46 J (Fig. 2), but it rapidly decreases to zero, indicating that the energy is completely absorbed by the plate material. In contrast, the internal energy of the plate increases from 0 J to about 100 J, where it stabilizes, indicating that the energy transfer due to deformation is complete.

The **Hourglass Energy** value remains low at around 10 J, indicating minimal numerical errors in the model (Fig. 3). The contact energy shows negative values, starting at about -47.338 J and stabilizing at zero, indicating the end of the interaction between the object and the plate.

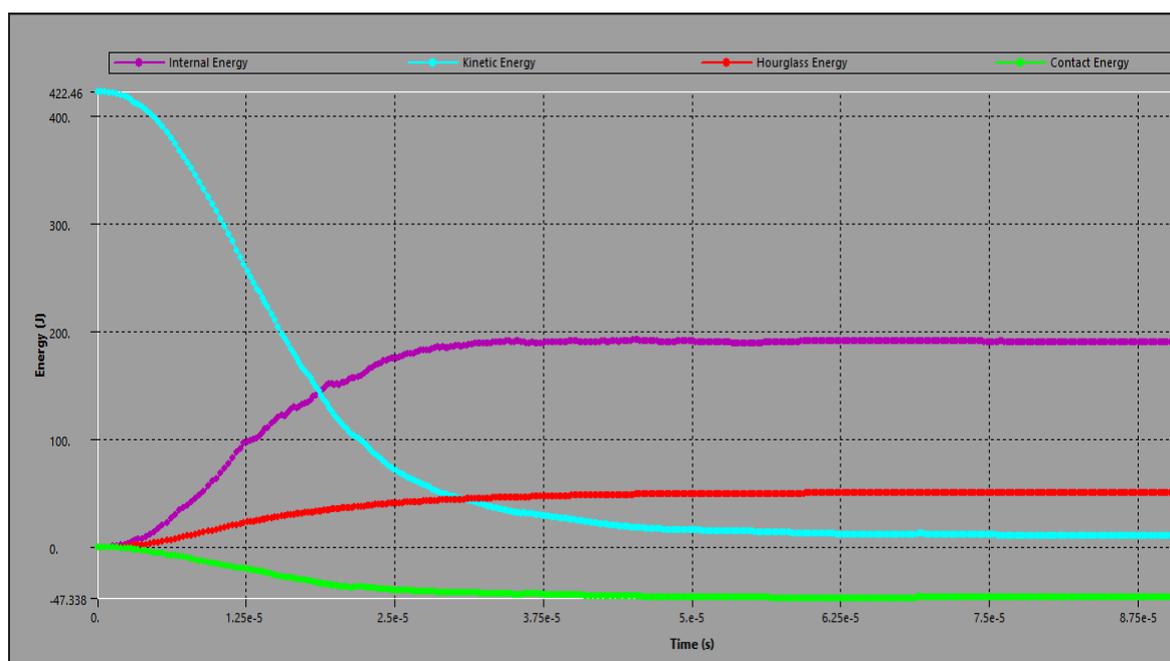
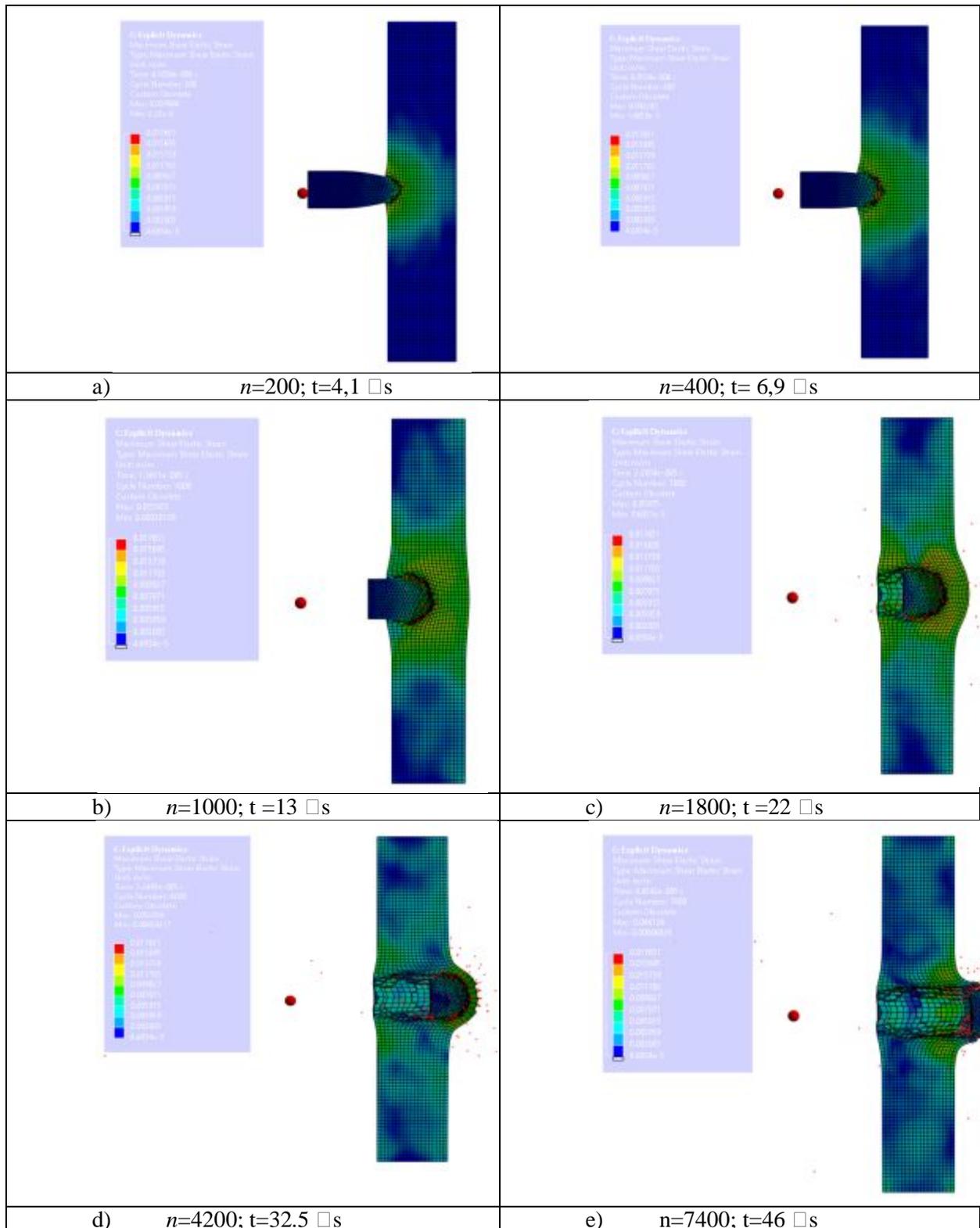


Fig. 3. Graph of the dependence of the specific energy of the material on time

The progress of the simulation by cycles and demonstration of Von Mises stresses is presented in Tabl. 3.

Table 3. demonstration of step-by-step penetration and breakdown of the plate and Von Mises stresses



The image shows the stages of modeling the impact of an object on aluminum plate at different time intervals. Each snapshot shows the stress distribution in the plate at different time points, which characterizes the process of object penetration and material deformation.

a) $t=0$ s – Initial state, before contact. The plate is in an undeformed state.

b) $t=14.29$ s – The beginning of the ball penetration. The initial deformation of the plate around the contact zone is visible.

c) $t=20.03$ s – The penetration process continues, the deformation increases, and more intense stress is visible around the contact zone.

d) $t=24.15$ s – The deformation zone becomes wider, the stress is spreading further into the plate.

e) $t=27.67$ s – The object penetrates deeper into the plate, the strain continues to expand radially from the impact point.

f) $t=30.79$ s – The final stage of the simulation, when the plate deformation reaches its maximum values and the object has reached the maximum penetration depth.

This set of images illustrates the process of object interaction with aluminum and shows how the impact energy is transferred to the material, causing its plastic deformation and stress distribution in the impact zone.

Conclusions

The paper investigates the damage process of a 7039 aluminum alloy plate under the impact of a solid brass object with a diameter of 5.45 mm. The modeling results were consistent with experimental data from similar studies, confirming the validity of the chosen approach. The simulation demonstrated complete penetration of the plate by the object, accompanied by its partial fragmentation. To achieve the desired level of impact resistance, it is recommended to reinforce the aluminum plates with a layer of alumina ceramic, which would minimize object's fragmentation and significantly reduce the depth of penetration. The detailed design and optimization of such a reinforced composite structure will be the focus of future research.

References

- [1] Erdem, M., Cinici, H., Gokmen, U., Karakoc, H., Turker, M. (2016). Mechanical and ballistic properties of powder metal 7039 aluminum alloy joined by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26, 74–84.
- [2] Flores-Johnson, E. A., Saleh, M., Edwards, L. (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 1022–1032.
- [3] Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Cheilytko A. (2020). Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials*, 440-445.
- [4] Pírez-Bergquist, S. J., Gray, G. T., Cerreta, E. K., Trujillo, C. P., Pírez-Bergquist, A. (2011). The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminum armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29–30), 8733–8741.
- [5] Cadoni, E., Dotta, M., Forni, D., Bianchi, S., Kaufmann, H. Strain rate effects on mechanical properties in tension of aluminum alloys used in armour applications. *EPJ Web of Conferences*, 26 (2012): 05004. DOI: 10.1051/epjconf/20122605004.
- [6] Davis, J. R. (2001). *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*. ASM International, Metals Park, OH.

Список використаної літератури

1. Erdem M., Cinici H., Gokmen U., Karakoc H., Turker M. Mechanical and ballistic properties of powder metal 7039 aluminum alloy joined by friction stir welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. Vol. 26. P. 74–84.

2. Flores-Johnson E.A., Saleh M., Edwards L. Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38. P. 1022–1032.
3. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials*. 2020. P. 440-445.
4. Pírez-Bergquist S.J., Gray G.T., Cerreta E.K., Trujillo C.P., Pírez-Bergquist A. The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminum armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Issues 29–30. P. 8733–8741.
5. Cadoni E., Dotta M., Forni D., Bianchi S., Kaufmann H. Strain rate effects on mechanical properties in tension of aluminum alloys used in armor applications. *EPJ Web of Conferences*. 2012. Vol. 26. Article 05004. DOI: 10.1051/epjconf/20122605004.
6. Davis J.R., Davis & Associates. *ASM Specialty Handbook - Copper and Copper Alloys*. ASM International, Metals Park, OH. 2001.

Надійшла до редколегії 14.11.2024