

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED MECHANICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345896

DEVELOPMENT AND POST-PROCESSING OF MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELS OF CONTACT PROBLEMS (p. 6–15)

Tetyana Zaytseva

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-3390>

Ganna Shyshkanova

National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0336-2803>

Yaroslav Honcharov

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8994-8895>

This study investigates the process of contact interaction between a rigid punch and an elastic half-space under the action of a centrally applied clamping load. The task addressed is automating the processing of results for data analysis.

This paper considers a problem for a punch with complex geometry. The contact zone has a doubly connected shape bounded by concentric ellipses, which complicates the analytical description of the stressed-strained state.

To solve the problem analytically, a perturbation method was applied, using the previously found expansion of the simple layer potential with a small parameter. This makes it possible to reduce the problem to a configuration with a circular ring whose exact solutions are known in the form of a series with recurrent coefficients. The obtained analytical results serve as a reference basis for assessing the accuracy of numerical modeling, for example, when constructing a finite element model. Such mathematical formalization makes it possible to effectively assess the reliability of the results.

Consequently, calculation models were built in the Ansys software environment taking into account features of the punch shape. Special software was developed that enables exporting calculation data to the MATLAB software package with subsequent post-processing to automate data processing. The proposed approach reduced the complexity of post-processing by approximately 45–55%.

It was found that with an increase in the eccentricity of the ellipse, the pressure under the punch increases. In the central zone, a lower pressure is recorded, which increases along the edges of the contact area. The numerical results correlate well with the analytical ones.

The results reported here could be used for strength calculations in engineering practice under conditions of contact interaction between structural elements of mechanical engineering where the contact zone has the shape of an elliptical ring.

Keywords: contact zone, punch, software tools, finite element method, analytical solution.

References

- Martyniak, R. M., Mykityn, M. M., Malanchuk, N. I. (2025). Thermomechanical contact of an elastic half-space and a rigid base under the action of a circular heat sink. *Materials Science*, 61 (1), 129–136. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00970-3>
- Popov, V. L., Heß, M., Willert, E. (2019). *Handbook of Contact Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58709-6>
- Barber, J. R., Ciavarella, M. (2000). Contact mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 37 (1-2), 29–43. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00075-x](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00075-x)
- Barber, J. R., Ciavarella, M. (2023). Approximate methods for contact problems involving beams. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 59 (2), 133–138. <https://doi.org/10.1177/03093247231200911>
- Saha, S., Kumar, V., Bhushan, A., Das, A. N. (2023). Mechanics of Indentation for an Elastic Half-Space by Punches. *Wseas Transactions On Applied And Theoretical Mechanics*, 18, 310–317. <https://doi.org/10.37394/232011.2023.18.29>
- Guz', A. N., Nemish, Yu. N. (1987). Perturbation of boundary shape in continuum mechanics (review). *Soviet Applied Mechanics*, 23 (9), 799–822. <https://doi.org/10.1007/bf00887782>
- Guz', A. N., Babich, S. Yu., Rudnitsky, V. B. (1998). Contact Problems for Elastic Bodies With Initial Stresses: Focus on Ukrainian Research. *Applied Mechanics Reviews*, 51 (5), 343–371. <https://doi.org/10.1115/1.3099009>
- Babych, S. Yu., Yarets'ka, N. O. (2021). Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses*. *International Applied Mechanics*, 57 (3), 297–305. <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01081-7>
- Ostryk, V. I., Ulitko, A. F. (2019). Circular interface crack with frictional contact of faces. *Matematychni Metody ta Fizyko-Mekhanichni Polya*, 47 (1), 84–94. Available at: <http://journals.iapmm.lviv.ua/ojs/index.php/MMPMF/article/view/2644>
- Ostryk, V. I. (2024). Contact problem for interfacial exfoliated inclusion. *Acta Mechanica*, 235 (9), 5863–5884. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04004-y>
- Savruk, M. P. (2021). Stress concentration near curvilinear holes and notches with unsmoothed contours. *Materials Science (Physicochemical mechanics of materials)*, 57 (3), 41–52. Available at: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001260776>
- Martyniak, R. M., Malanchuk, N. I., Kuzmenko, V. I., Mykhalchuk, H. Y., Chumak, K. A., Tkachuk, M. M. et al. (2022). Kontaktna mekhanika. Fryktsiyna i adheziyna vzaiemodiya poverkhon. Lviv: Vydavets Viktoriya Kundelska, 254. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/357335537>
- Li, Q., Wilhayn, J., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2022). Adhesive contacts of rough elliptical punches. *Mechanics Research Communications*, 122, 103880. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.103880>
- Vaisfeld, N. D., Protserov, Yu. S., Tolkachov, A. V. (2024). Axisymmetric Problem of Vibrations of Circular or Ring Punch on Elastic Half-Space*. *International Applied Mechanics*, 60 (3), 313–322. <https://doi.org/10.1007/s10778-024-01284-8>
- Roitman, A. B., Shishkanova, S. F. (1973). The solution of the annular punch problem with the aid of recursion relations. *Soviet Applied Mechanics*, 9 (7), 725–729. <https://doi.org/10.1007/bf00882996>
- Shishkanova, S. F. (1990). Stress state of an elastic half-space weakened by a plane crack which is close to being annular. *Soviet Applied Mechanics*, 26 (5), 430–435. <https://doi.org/10.1007/bf00887257>
- Shyshkanova, G. A., Zaytseva, T. A., Frydman, A. D. (2015). The analysis of manufacturing errors effect on contact stresses distribution under the ring parts deformed asymmetrically. *Metallurgical and Mining Industry*, 7, 352–357. Available at: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_7/055Shyshkano-va-352-357.pdf
- Shyshkanova, G., Zaytseva, T., Zhushman, V., Levchenko, N., Korotunova, O. (2023). Solving three-dimensional contact problems for four-

- dation design in green building. *Journal of Physics: Conference Series*, 2609 (1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2609/1/012001>
19. Obodan, N. I., Zaitseva, T. A., Fridman, O. D. (2019). Contact Problem for a Rigid Punch and an Elastic Half Space as an Inverse Problem. *Journal of Mathematical Sciences*, 240 (2), 184–193. <https://doi.org/10.1007/s10958-019-04346-2>
 20. Šulka, P., Sapietová, A., Dekýš, V., Sapieta, M. (2018). Static structural analysis of rolling ball bearing. *MATEC Web of Conferences*, 244, 01023. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401023>
 21. Bhandari, S., Jotautienė, E., Juostas, A., Ganta, A. (2021). Finite Element Analysis of Deep Groove Ball Bearing to obtain stress and contact pressure. *Žmogaus ir gamtos sauga 2021*. Available at: <https://www.vdu.lt/cris/bitstreams/b992eb0a-68ca-45e4-b2a7-b2524e4df313/download>
 22. Verma, A., Sahoo, V. (2025). Analytical and numerical analysis of load distribution in a thin walled flexible race ball bearing. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 60(7), 526–539. <https://doi.org/10.1177/03093247251320838>
 23. Wang, B., Bai, J., Lu, S., Zuo, W. (2025). An open source MATLAB solver for contact finite element analysis. *Advances in Engineering Software*, 199, 103798. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2024.103798>
 24. Mersha, T. K., Du, C. (2021). Co-Simulation and Modeling of PMSM Based on Ansys Software and Simulink for EVs. *World Electric Vehicle Journal*, 13 (1), 4. <https://doi.org/10.3390/wevj13010004>
 25. Schemmel, R., Krieger, V., Hemsel, T., Sextro, W. (2021). Co-simulation of MATLAB and ANSYS for ultrasonic wire bonding process optimization. *Microelectronics Reliability*, 119, 114077. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114077>
 26. Ansys for Students. Available at: <https://www.ansys.com/academic/students>
 27. MATLAB for Students. Available at: <https://uk.mathworks.com/products/matlab/student.html>
 28. Korotunova, O., Mastynovsky, Y., Shyshkanova, G., Mizerna, O., Nechyporenko, N., Zaytseva, T. et al. (2022). Multilayer Structures under Non-Stationary Loading: Prediction of Damages and Further Operation Possibility. *Journal of Physics: Conference Series*, 2346 (1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2346/1/012006>
 29. Shyshkanova, G. (2018). About Stability of First Kind Equation Solving. 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 1–5. <https://doi.org/10.1109/saic.2018.8516805>
 30. Kress, R. (1989). Tikhonov Regularization. *Linear Integral Equations*, 243–258. https://doi.org/10.1007/978-3-642-97146-4_16
 31. Sun, P., Wang, J., Bai, J., Zuo, W. (2024). An Open Source Matlab Solver for Finite Element Analysis of Continuous Fiber Reinforced Composites Using Membrane-Embedded Model. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5005014>
 32. Mose, B. R., Shin, D.-K., Nam, J.-H. (2024). Numerical analysis of stresses on angular contact ball bearing under the static loading with respect to race thickness and housing stiffness. *Scientific Reports*, 14 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66479-y>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345897

NUMERICAL IMPLEMENTATION OF RICHARDSON EXTRAPOLATION FOR DYNAMIC PROBLEMS OF MULTILAYER CYLINDRICAL SHELLS (p. 16–29)

Yuliia Meish

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-700X>

Maryna Belova

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0546-8094>

Nataliia Arnauta

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8434-932X>

Nataliia Maiborodina

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1754-6790>

Viacheslav Gerasymenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4017-1141>

This study considers forced vibrations of a heterogeneous elastic structure in the form of a multilayer cylindrical shell consisting of rigidly connected layers and reinforced with discrete ring elements.

A mathematical model of vibrations of an elastic heterogeneous structure under the action of a non-stationary load has been constructed. The stressed-strained state of a multilayer cylindrical shell with discrete ring ribs was investigated using the geometrically nonlinear theory of Timoshenko-type shells and rods. The presence of a complex right-hand side and discontinuous coefficients in the spatial coordinates in the hyperbolic equations of vibrations of a heterogeneous elastic cylindrical shell (at the locations of the reinforcing ribs) necessitated the use of numerical methods for solving them. A numerical algorithm using Richardson extrapolations has been proposed for studying the constructed model.

For example, a three-layer reinforced cylindrical shell is considered, taking into account the discreteness of the ribs' placement under dynamic loading with rigidly clamped ribs. The proposed numerical algorithm has made it possible to investigate the stressed-strained state of a three-layer reinforced elastic structure of a cylindrical type at any given moment in time. A comparative analysis of the numerical results of the calculations revealed that, according to the standard approach, the discrepancy in the deflection values for $n = 40$ and $n = 160$ reached 31%, for $n = 80$ and $n = 160$ it was about 5%, according to Richardson's approach for $n = 40 \div 80$ and the standard approach for $n = 160$, this difference was about 1%.

A distinctive feature of this study is the use of Richardson extrapolation to identify the stressed-strained state of a three-layer reinforced cylindrical shell, which made it possible to increase the accuracy of the solution to the dynamic problem without reducing the calculation step.

The study's results reported in this work could be used for investigating unsteady vibrations of shell structures at research and engineering organizations.

Keywords: multilayer shells, forced vibrations, unsteady loading, numerical methods, Richardson extrapolation.

References

1. Ismoil, S., Muhsin, T., Isroil, K., Nurali, E. (2025). Non-axisymmetric stationary waves in a viscoelastic three-layered cylindrical shell. *Journal of Engineering Mathematics*, 151 (1). <https://doi.org/10.1007/s10665-025-10440-z>
2. Ellouz, H., Jrad, H., Bouhamed, A., Wali, M., Dammak, F. (2024). Non-linear Behavior of Smart Magneto-Electro-Elastic Hyperboloid Shell. *Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing III*, 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57324-8_1
3. Zhao, T., Bayat, M. J., Kalhori, A., Asemi, K. (2024). Free vibration analysis of functionally graded multilayer hybrid composite cylindrical shell panel reinforced by GPLs and CNTs surrounded by Winkler elastic foundation. *Engineering Structures*, 308, 117975. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117975>

4. Heidari, Y., Irani Rahaghi, M., Arefi, M. (2022). Buckling analysis of FG cylindrical nano shell integrated with CNTRC patches. *Waves in Random and Complex Media*, 35 (4), 7287–7308. <https://doi.org/10.1080/17455030.2022.2086320>
5. Meish, V. F., Meish, Yu. A., Arnauta, N. V. (2019). Numerical Analysis of Nonstationary Vibrations of Discretely Reinforced Multilayer Shells of Different Geometry. *International Applied Mechanics*, 55 (4), 426–433. <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00962-2>
6. Meish, V. F., Meish, Yu. A., Belova, M. A. (2020). Nonstationary Dynamics of Elliptic Isotropic Conical Shells Under Distributed Loads*. *International Applied Mechanics*, 56 (4), 424–431. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-01026-6>
7. Meish, Y., Belova, M., Maiborodina, N., Gerasymenko, V. (2024). Determining the effect of longitudinal stiffeners on the deformation of multilayer ellipsoidal shells under non-stationary loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (130)), 78–88. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310241>
8. Semenyuk, N. P., Zhukova, N. B. (2020). Stability of a Sandwich Cylindrical Shell with Core Subject to External Pressure and Pressure in the Inner Cylinder*. *International Applied Mechanics*, 56 (1), 40–53. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00995-y>
9. Avramov, K., Uspensky, B. (2022). Nonlinear vibrations of doubly curved composite sandwich shells with FDM additively manufactured flexible honeycomb core. *Acta Mechanica*, 234 (3), 1183–1210. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03426-w>
10. Attia, A., Berrabah, A. T., Bourada, F., Bousahla, A. A., Tounsi, A., Ghazwani, M. H., Alnujaie, A. (2024). Bending Analysis of Laminated Composite and Sandwich Cylindrical Shells Using Analytical Method and Ansys Calculations. *Mechanics of Composite Materials*, 60 (1), 33–48. <https://doi.org/10.1007/s11029-024-10173-7>
11. Zhang, H., Gao, Y., He, D., Yang, W. (2022). Free vibration and buckling analysis of composite laminated shells using the refined zigzag theory. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 435–448. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/150847>
12. Gao, Y., Zhang, H., Yang, W., He, D. (2022). A new bending model for composite laminated shells based on the refined zigzag theory. *Archive of Applied Mechanics*, 92 (10), 2899–2915. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02210-5>
13. Salenko, O., Drahobetskyi, V., Symonova, A., Onishchenko, E., Kostenko, A., Tsurkan, D., Vasiukov, D. (2024). Damage Behavior of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method. *Journal of Engineering Sciences*, 11 (1), D27–D35. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d4](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d4)
14. Smetankina, N. V., Merkulova, A. I., Postnyi, O. V., Merkulov, D. O., Misura, S. Yu. (2021). Optimal Design of Layered Cylindrical Shells with Minimum Weight Under Impulse Loading. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 506–509. <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9569982>
15. Litot, O., Man'ko, T. (2021). Methods of graphic construction of the process of manufacturing the power shell of composite fuel tanks. *Journal of Rocket and Space Technology*, 28 (4), 75–81. <https://doi.org/10.15421/452010>
16. Senkoua, Y., Ngak, F. P. E., Meuyou, H. H., Ntamack, G. E. (2024). Numerical Investigation of the Vibroacoustic Behavior of Carbon Nanotube Reinforced Doubly-Curved Multilayer Composite Shells. *Mechanics of Solids*, 59 (8), 4003–4026. <https://doi.org/10.1134/s0025654424605093>
17. Ma, J., Gao, H. (2024). Free vibration analysis of hybrid laminated thin-walled cylindrical shells containing multilayer FG-CNTRC plies. *Acta Mechanica*, 235 (12), 7711–7731. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04082-y>
18. Kjelgaard Mikkelsen, C. C., López-Villellas, L. (2025). The Need for Accuracy and Smoothness in Numerical Simulations. *Parallel Processing and Applied Mathematics*, 3–16. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85697-6_1
19. Prince, P. A., Govindarao, L., Elango, S. (2025). Richardson Extrapolation for Singularly Perturbed Fredholm Integro Differential Equations. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 10 (6), 2023–2039. <https://doi.org/10.33889/ijmems.2025.10.6.094>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342868

IDENTIFICATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF FINGER-JOINTED LAMINATED MERBAU TIMBER BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) (p. 30–44)

Lilis Nurhayati

Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

Universitas Katolik Darma Cendika, Surabaya, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2108-2693>

Sri Murni Dewi

Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7624-6283>

Wisnumurti

Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2939-2170>

Devi Nuralinah

Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4236-2492>

In this research, the mechanical properties and the reinforcement mechanism of finger-jointed laminated Merbau beams processed from wood-industry wastes are investigated and unreinforced specimens and externally U-shaped carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strengthened beams are compared. The problem to be solved is the brittle failure and reduced flexural capacity of finger-jointed glulam; hence, it determines the combined impact of joint orientation (face-finger and face-butt), the number of lamination (three and five layers), and CFRP reinforcement on block-assembled beams with randomly distributed finger joints through four-point bending tests. The outcome of the study reveals that the use of CFRP has a huge impact on the flexural performance of the material, with the ultimate load being increased by 27.4–48.8% and the maximum bending moment being raised by 45.3% when compared to non-reinforced beams. The mid-point deflection at the maximum load has also increased by 6.5–51.4%, which shows a higher capacity for deformation and better ductility of the material.

The noted enhancements are credited to the successful shifting of the stress from the timber tension zone to the CFRP, lessening of stress concentration at the fingerjoint discontinuities, and the crack initiation and propagation taking longer time in random locations which together change the structural response from sudden brittle fracture to more stable damage progression leading up to failure. Among the tested configurations, face-butt beams have obtained the highest modulus of elasticity of 20.46 GPa (an 8.8% increase), while the five-lamina face-butt configuration strengthened by CFRP has reached the greatest modulus of rupture of 55.85 MPa (a 33.4% increase). The three-lamina face-finger beams showed the highest increase of MOR after reinforcement, being at 48.30 MPa (a 46.4% increase). Changing lamination from three to five layers raised flexural strength by 18.9%, suggesting a homogenization effect that improves stress distribution in laminated beams composed of blocks. All in all, the collaboration of finger-joint configuration, number of lamination, random block assembly, and CFRP strengthening has opened a door

to convert Merbau wood waste into higher-performance engineered timber elements for low-carbon structural applications.

Keywords: merbau, glulam, beams, CFRP, reinforcement, bending, mechanical performance, MOE, MOR.

References

- Kumar, V., Lo Ricco, M., Bergman, R. D., Nepal, P., Poudyal, N. C. (2024). Environmental impact assessment of mass timber, structural steel, and reinforced concrete buildings based on the 2021 international building code provisions. *Building and Environment*, 251, 111195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111195>
- Dzhurko, D., Haacke, B., Haberbosch, A., Köhne, L., König, N., Lode, F. et al. (2024). Future buildings as carbon sinks: Comparative analysis of timber-based building typologies regarding their carbon emissions and storage. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1330105>
- Sun, X., He, M., Li, Z. (2020). Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 249, 118751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>
- Lara-Bocanegra, A. J., Majano-Majano, A., Crespo, J., Guaita, M. (2017). Finger-jointed Eucalyptus globulus with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. *Construction and Building Materials*, 135, 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004>
- González-Prieto, O., Casas Mirás, J. M., Torres, L. O. (2021). Finger-jointing of green Eucalyptus globulus L. wood with one-component polyurethane adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80 (2), 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01770-7>
- Hou, J., Taoum, A., Kotlarewski, N., Nolan, G. (2023). Study on the Effect of Finger-Joints on the Strengths of Laminations from Fiber-Managed Eucalyptus nitens. *Forests*, 14 (6), 1192. <https://doi.org/10.3390/f14061192>
- Le, S. T., Nguyen, T. N., Bui, D.-K., Ha, Q. P., Ngo, T. D. (2023). Modeling and Multi-Objective Optimisation of Finger Joints: Improving Flexural Performance and Minimising Wood Waste. *Buildings*, 13 (5), 1186. <https://doi.org/10.3390/buildings13051186>
- Karagöz İşleyen, Ü., Peker, İ. (2020). Effects of layer number and finger direction on bending behavior of glulam beams. *BioResources*, 15 (2), 4217–4233. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4217-4233>
- Khelifa, M., Lahouar, M. A., Celzard, A. (2015). Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29 (19), 2104–2116. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1057395>
- Rescalvo, F. J., Valverde-Palacios, I., Suarez, E., Gallego, A. (2018). Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*, 186, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.078>
- Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Akkaya, S. T., Türer, A., Anıl, Ö., İşleyen, Ü. K. (2024). Flexural behavior of finger joint connected glulam wooden beams strengthened with CFRP strips. *Structures*, 66, 106853. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106853>
- Park, H.-M., Gong, D.-M., Shin, M.-G., Byeon, H.-S. (2020). Bending Creep Properties of Cross-Laminated Wood Panels Made with Tropical Hardwood and Domestic Temperate Wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48 (5), 608–617. <https://doi.org/10.5658/wood.2020.48.5.608>
- Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., Arif M, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>
- Ahmad, Z., Lum, W. C., Lee, S. H., Razlan, M. A., Wan Mohamad, W. H. (2017). Mechanical properties of finger jointed beams fabricated from eight Malaysian hardwood species. *Construction and Building Materials*, 145, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016>
- Josué, D. F., Edgar, N. G., Joseph, N. A., Bosco, S. J., Bienvenu, K., Gael, A. T. U. (2022). Experimental Study of the Mechanical Behavior of Local Wood Terminalia Superba (Fraké) by Glued Wood Assembly According to the Beveled Configuration. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/4059282>
- Morin-Bernard, A., Blanchet, P., Dagenais, C., Achim, A. (2021). Glued-laminated timber from northern hardwoods: Effect of finger-joint profile on lamellae tensile strength. *Construction and Building Materials*, 271, 121591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121591>
- Nurhayati, L., Dewi, S. M., Murti, W., Nuralinah, D. (2025). Identification of flexural performance of finger-jointed laminated timber beams reinforced with carbon fiber reinforced polymer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (137)), 17–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338430>
- Galih, N. M., Yang, S. M., Yu, S. M., Kang, S. G. (2020). Study on the Mechanical Properties of Tropical Hybrid Cross Laminated Timber Using Bamboo Laminated Board as Core Layer. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48 (2), 245–252. <https://doi.org/10.5658/wood.2020.48.2.245>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344818

SCIENTIFIC RATIONALE FOR THE USE OF PERFORATION BEAMS IN THE BEARING STRUCTURE OF A MODERNIZED RAILROAD FLAT WAGON FOR CONTAINER TRANSPORTATION (p. 45–52)

Sergii Panchenko

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

Alyona Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Iryna Zhuravel

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4405-6386>

Yevheniia Naumenko

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6963-3995>

Oksana Zharova

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0106-1716>

This study investigates processes related to the occurrence, acceptance, and redistribution of loads in the supporting structure of a railroad flat wagon. The task addressed is to improve the technical and economic indicators of the modernized flat wagon for container transportation by reducing its tare.

To this end, the stress distribution fields in the modernized railroad flat wagon structure were determined. It was established that the main longitudinal beams of the frame have a strength reserve, which is due to the underutilization of railroad flat wagon bearing capacity. This leads to an excess sprung mass of its supporting structure. Therefore, it is proposed to introduce perforation in the walls of the main longitudinal beams of a railroad flat wagon. To substantiate this solution, the strength of the bearing structure of a railroad flat wagon was calculated. It was established that the maximum stresses in the bearing structure are 13.6% lower than the permissible ones.

The design service life of a railroad flat wagon is at least 32 years. The biaxiality calculation of the bearing structure showed that its greatest values are reached in the middle parts of girdle beams.

A special feature of the proposed solution is that it makes it possible to improve the technical and economic indicators of the modernized railroad flat wagon with minor capital investments.

The scope of practical application of the results is railroad transport.

A condition for practical use of the results is symmetrical loading of the bearing structure of a railroad flat wagon with cargo.

The results of the research could contribute to improving the efficiency of container cargo transportation along international routes. In addition, the results might prove useful for designing and fabricating new structures of railroad flat wagons, as well as for modernizing existing ones.

Keywords: railroad transport, railroad flat wagon, modernization of the structure, stressed state of the structure, container transportation.

References

- Nedeliakova, E., Hudakova, M., Masar, M., Lizbetinova, L., Stasiak-Betlejewska, R., Šulko, P. (2020). Sustainability of Railway Undertaking Services with Lean Philosophy in Risk Management – Case Study. *Sustainability*, 12 (13), 5298. <https://doi.org/10.3390/su12135298>
- Dizo, J., Blatnický, M. (2019). Evaluation of Vibrational Properties of a Three-wheeled Vehicle in Terms of Comfort. *Manufacturing Technology*, 19 (2), 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
- Jipa, A.-N., Lequeux-Dincă, A.-I., Teodorescu, C., Gheorghilaș, A., Roangheș-Mureanu, A.-M. (2025). Railway Accessibility as an Opportunity for Rural Tourism Sustainability in Romania. *Economies*, 13 (9), 270. <https://doi.org/10.3390/economies13090270>
- Vatulia, G. L., Lovska, A. O., Krasnokutskyi, Y. S. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254 (1), 012140. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140>
- Ishchenko, V. M., Fedosov-Nikonov, D. V. (2017). Long Wheelbase Flat Wagons: Structural Strength. *Metallurgical and Mining Industry*, 8, 26–31. Available at: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_8/4Ishchenko-V.-M..pdf
- Gerlici, J., Lovska, A., Kozáková, K. (2025). Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. *Designs*, 9 (1), 12. <https://doi.org/10.3390/designs9010012>
- Fedosov-Nikonov, D. V., Sulym, A. O., Ilchysyn, V. V., Safronov, O. M., Kelrikh, M. B. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012029>
- Štastniak, P., Kurčík, P., Pavlík, A. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235, 00030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
- Reidemeister, O. H., Kalashnyk, V. O., Shykunov, O. A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science and Transport Progress*, 2 (62), 148–156. <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
- Tretiak, E. V., Sulym, A. O., Khozia, P. O. (2020). Osnovni typy konstruktivnykh dovhobaznykh vagoniv-platform ta doslidzhennia yikh mitsnosnykh kharakterystyk. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad»*, 20, 27–33. Available at: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/08/Reikovyj-ruhomyj-sklad-2020.pdf#page=28>
- Sulym, A., Orlov, O. (2022). Experimental studies of the strength of a long base flat wagons by carrying out endurance cyclic fatigue tests. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series “Transport Systems and Technologies”*, 1 (40), 139–148. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-12>
- Das, A., Agarwal, G. (2020). Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. *Advances in Fluid Mechanics and Solid Mechanics*, 271–280. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0772-4_24
- Domin, Yu. V., Cherniak, H. Yu. (2003). *Osnovy dynamiky vagoniv*. Kyiv: KUETT, 269.
- Kowalski, S., Cieślowski, B., Barta, D., Dižo, J., Dittrich, A. (2023). Analysis of the Operational Wear of the Combustion Engine Piston Pin. *Lubricants*, 11 (3), 100. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030100>
- Dižo, J., Blatnický, M. (2016). Use of multibody system dynamics as a tool for rail vehicle behaviour diagnostics. *Diagnostyka*, 17 (2), 9–16. Available at: <http://www.diagnostics.net.pl/pdf-62458-17818?filename=Use%20of%20multibody%20system.pdf>
- Dižo, J., Blatnický, M., Drożdźel, P., Melnik, R., Caban, J., Kafrik, A. (2023). Investigation of Driving Stability of a Vehicle-Trailer Combination Depending on the Load's Position Within the Trailer. *Acta Mechanica et Automatica*, 17 (1), 60–67. <https://doi.org/10.2478/ama-2023-0007>
- Gerlici, J., Lovska, A., Pavliuchenkov, M. (2024). Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*, 14 (8), 3211. <https://doi.org/10.3390/app14083211>
- Rahimov, R. V., Khadjimukhametova, M. A., Rakhmatov, Z. X. (2016). Development of improved technical means for transportation fruits and vegetables. *European Science Review*, 1-2, 175–177. <https://doi.org/10.20534/esr-16-1.2-175-177>
- Poklemba, R., Zajac, J., Goldyniak, D., Olexa, I., Dilýová, M. (2020). Construction proposal of shipping bulk container. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 776 (1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/776/1/012046>
- Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Ravlyuk, V., Harusinec, J. (2023). Studying the load of composite brake pads under high-temperature impact from the rolling surface of wheels. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 155–167. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002994>
- Kondratiev, A. V., Kovalenko, V. O. (2019). Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*, 25 (4), 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>
- Lovska, A., Gerlici, J., Dižo, J., Ishchuk, V. (2023). The Strength of Rail Vehicles Transported by a Ferry Considering the Influence of Sea Waves on Its Hull. *Sensors*, 24 (1), 183. <https://doi.org/10.3390/s24010183>
- Koshel, O., Sapronova, S., Kara, S. (2023). Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (124)), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347020

EFFECT OF WIND TURBINE BLADE TRAILING EDGE MODIFICATION ON AERODYNAMIC NOISE (p. 53–62)

Andrii Dreus

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0598-9287>

Serhii Aleksieienko

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0320-989X>

Lilia Nakashydz

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>

Vitalii DerbabaDnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3918-2177>**Serhii Zolotareenko**Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5291-4206>

This study investigates acoustic processes that occur during the flow of air around the blade segment of a wind turbine. The issue of aerodynamic noise generated by wind turbines is one of the factors that hinders the widespread implementation of wind turbines. Noise reduction is possible by changing the design of the turbine blade to influence the aerodynamic processes during the flow of air around it.

This paper reports an experimental study on the possibility of reducing the aerodynamic noise of wind turbines by modifying the trailing edge of the blade. An original methodology of acoustic experiments in an anechoic chamber is described; the results of experimental studies are given.

Two different modifications of serrated trailing edges of the blade with the NACA0012 aerodynamic profile have been considered: a flat serrated edge and a three-dimensional serrated edge. The results from aerodynamic noise measurements of the prototypes of the blade segments were compared with the noise from the basic original sample. Acoustic measurements were carried out in the range of flow speeds: 7.5–20 m/s and angles of attack 0–15°.

The results demonstrated that both configurations of the serrated trailing edge make it possible to reduce the level of aerodynamic noise compared to the base segment. It was found that the noise reduction occurs at relatively small angles of attack (0–5°) and moderate flow speeds (up to 15 m/s). In the specified range of parameters, the reduction of aerodynamic noise occurred due to a decrease in the sound pressure level in a certain frequency range by up to 4 dB. The segment with flat serrations turned out to be somewhat more effective in terms of noise reduction in the low-frequency range.

Results of this work could be used when designing new generation wind energy systems with reduced noise levels, as well as other aerodynamic devices.

Keywords: aerodynamic noise, wind turbine blades, acoustic experiment, Fourier analysis, passive methods.

References

- Duranay, Z. B., Güldemir, H., Coşkun, B. (2024). The Role of Wind Turbine Siting in Achieving Sustainable Energy Goals. *Processes*, 12 (12), 2900. <https://doi.org/10.3390/pr12122900>
- Shahini, E., Fedorchuk, M., Hruban, V., Fedorchuk, V., Sadovoy, O. (2024). Renewable energy opportunities in Ukraine in the context of blackouts. *International Journal of Environmental Studies*, 81 (1), 125–133. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320021>
- McKenna, R., Lilliestam, J., Heinrichs, H. U., Weinand, J., Schmidt, J., Staffell, I. et al. (2025). System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities. *Joule*, 9 (1), 101799. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.016>
- Katsaprakakis, D. A., Papadakis, N., Ntintakis, I. (2021). A Comprehensive Analysis of Wind Turbine Blade Damage. *Energies*, 14 (18), 5974. <https://doi.org/10.3390/en14185974>
- Liu, W. Y. (2017). A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renewable Energy*, 108, 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.034>
- Ahmed, M. M., Robin, H. M., Shahadat, M. Md. Z., Masud, M. H. (2025). Innovative approaches for reducing wind turbine noise: A review from mechanical and aerodynamic perspective. *Energy Reports*, 13, 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.049>
- Alkhalifa, A. S., Uddin, M. N., Atkinson, M. (2022). Aerodynamic Performance Analysis of Trailing Edge Serrations on a Wells Turbine. *Energies*, 15 (23), 9075. <https://doi.org/10.3390/en15239075>
- Lyu, B., Azarpeyvand, M. (2017). On the noise prediction for serrated leading edges. *Journal of Fluid Mechanics*, 826, 205–234. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.429>
- Goman, O., Dreus, A., Rozhkevych, A., Heti, K., Karplyuk, V. (2022). Improving the efficiency of Darier rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*, 8, 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.162>
- Yu, F.-Y., Wan, Z.-H., Hu, Y.-S., Sun, D.-J., Lu, X.-Y. (2025). Effects of leading-edge serration shape on noise reduction in rod-airfoil interactions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 157 (1), 215–233. <https://doi.org/10.1121/10.0034845>
- Totu, A.-G., Cican, G., Crunțeanu, D.-E. (2024). Serrations as a Passive Solution for Turbomachinery Noise Reduction. *Aerospace*, 11 (4), 292. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040292>
- Santamaria, J., Bierrenbach-Lima, A., Sanjosé, M., Moreau, S. (2025). Shape considerations for the design of propellers with trailing edge serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 595, 118771. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118771>
- Singh, S. K., Narayanan, S. (2023). Control of airfoil broadband noise through non-uniform sinusoidal trailing-edge serrations. *Physics of Fluids*, 35 (2). <https://doi.org/10.1063/5.0133556>
- Kholodov, P., Moreau, S. (2021). Optimization of trailing-edge serrations with and without slits for broadband noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 490, 115736. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115736>
- Llorente, E., Ragni, D. (2020). Trailing-edge serrations effect on the performance of a wind turbine. *Renewable Energy*, 147, 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.128>
- Lima Pereira, L. T., Avallone, F., Ragni, D., Scarano, F. (2023). A parametric study of serration design for trailing-edge broadband noise reduction. *Applied Acoustics*, 211, 109470. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109470>
- Aleksieienko, S. V., Dreus, A. Y., Nakashydzė, L. V., Derbaba, V. A., Zolotareenko, S. A. (2025). Methodology of the acoustic experiment for studying the aerodynamic noise of wind turbine blade segments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 71–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/071>
- ANSI/ASA S1.43-1997 (R2020): Specifications for integrating-averaging sound level meters. American National Standards Institute. Acoustical Society of America.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347028

DEVISING AN APPROACH TO CALCULATING AND
OPTIMIZING A SUPERSONIC NOZZLE FOR COLD GAS-
DYNAMIC SPRAYING (p. 63–70)

Oleksandr ShorinovNational Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5057-6679>**Nina Savchenko**National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-9368>**Olga Shypul**National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1356-5831>

Ihor Zorik

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3053-2369>

Serhii Nyzhnyk

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5684-593X>

This work investigates the process of powder particle acceleration in a supersonic nozzle for cold gas-dynamic spraying (CGS). The task addressed in the study is predetermined by the lack of established patterns in the comprehensive influence of gas parameters and nozzle geometry on the speed of powder particles at the nozzle outlet, which complicates predicting and controlling the spraying process.

A new approach to the design of nozzles for CGS has been proposed and implemented, which allows for targeted optimization of their geometric parameters taking into account the gas parameters at the nozzle inlet. The approach is based on a combination of analytical modeling (isentropic model, particle acceleration model), methods of statistical planning and analysis of experiments (central compositional design, construction of regression equations), and multifactor optimization of nozzle geometry.

Regularities have been established between the velocity of aluminum particles with a size of 25 μm at the nozzle outlet and the gas parameters: braking pressure 0.8–2.5 MPa and braking temperature 300–700°C. The calculations also took into account the influence of the nozzle geometry: critical diameter 1.0–3.0 mm, outlet diameter 5.0–10.0 mm, length of the expansion section 80–150 mm. The resulting nozzle and spraying mode ensure that the particles achieve a velocity at the outlet of 596 m/s, which exceeds the required minimum of 550 m/s, at an air flow rate of 1.0 m^3/min .

The proposed approach could be applied to designing new nozzles for mobile and stationary CGS installations operating on compressed air, nitrogen, or helium with a pressure of 0.6 to 4.0 MPa; in particular, for spraying protective and restorative coatings under conditions of limited gas flow. The results lay out the foundation for developing a software tool or an automated system for designing nozzles for CGS in a wide range of initial gas and powder parameters.

Keywords: isentropic model, particle acceleration, multifactor optimization, critical speed, analysis of variance.

References

- Champagne, V., Helfrich, D. (2015). Critical Assessment 11: Structural repairs by cold spray. *Materials Science and Technology*, 31 (6), 627–634. <https://doi.org/10.1179/1743284714y.0000000723>
- Li, W.-Y., Liao, H., Douchy, G., Coddet, C. (2007). Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder. *Materials & Design*, 28 (7), 2129–2137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.05.016>
- Kun, T., Wenjie, H., Yurong, W. (2024). Optimization of Cold Spray Nozzles Based on the Response Surface Methodology. *Journal of Engineering Sciences*, 11 (1), F1–F11. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).f1)
- Singhal, C., Murtaza, Q. (2024). Numerical optimization of cold gas dynamic spray process parameters through response surface methodology. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/2374068x.2024.2439710>
- Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H. (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 51 (15), 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(03\)00274-x](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(03)00274-x)
- Jadhav, P. A., Deivanathan, R. (2023). Numerical and experimental investigation of the droplet size for MQL aerosol under different operating parameters with Flow visualization. *Engineering Research Express*, 5 (3), 035069. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acf548>
- Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyviyany, S. (2023). The effect of process temperature and powder composition on microstructure and mechanical characteristics of low-pressure cold spraying aluminum-based coatings. *Materials Research Express*, 10 (2), 026401. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acb6f0>
- Shorinov, O., Volkov, A., Neveshkin, Y., Danko, K., Kalinichenko, N. (2023). Theoretical Study of Powder Particle Parameters in a Modified Cold Spray Nozzle. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI*, 168–176. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_17
- Sinnwell, Y., Maksakov, A., Palis, S., Antonyuk, S. (2025). Influence of the particle morphology on the spray characteristics in low-pressure cold gas process. *Powder Technology*, 464, 121084. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121084>
- Klinkov, S., Kosarev, V., Shikalov, V., Vidyuk, T. (2023). Development of ejector nozzle for high-pressure cold spray application: a case study on copper coatings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11047-3>
- Goyal, T., Walia, R. S., Sidhu, T. S. (2012). Multi-response optimization of low-pressure cold-sprayed coatings through Taguchi method and utility concept. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (5-8), 903–914. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4049-8>
- Shorinov, O. V., Polyviyany, S. A. (2022). Simulation of Gas Flow with Nanocomposite Carbon-Containing Powders in Supersonic Nozzle. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 44 (5), 601–611. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.05.0601>
- Karkoulis, D. G., Tzoganis, E. D., Panagiotopoulos, A. G., Acheimastos, S.-G. D., Margaritis, D. P. (2022). Computational Fluid Dynamics Study of Wing in Air Flow and Air–Solid Flow Using Three Different Meshing Techniques and Comparison with Experimental Results in Wind Tunnel. *Computation*, 10 (3), 34. <https://doi.org/10.3390/computation10030034>
- Benim, A. C., Diederich, M., Pfeiffelmann, B. (2018). Aerodynamic Optimization of Airfoil Profiles for Small Horizontal Axis Wind Turbines. *Computation*, 6 (2), 34. <https://doi.org/10.3390/computation6020034>
- Dykhuizen, R. C., Smith, M. F. (1998). Gas Dynamic Principles of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 7 (2), 205–212. <https://doi.org/10.1361/105996398770350945>
- Grujicic, M., Zhao, C. L., Tong, C., DeRosset, W. S., Helfrich, D. (2004). Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Science and Engineering: A*, 368 (1-2), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.312>
- Maev, R., Leshchynsky, V. (2008). Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527621903>
- Ghajar, A. (2004). Compressible Flow. *The Engineering Handbook*, Second Edition. <https://doi.org/10.1201/9781420039870.ch36>
- Radulescu, L. F. (2018). A Concise Manual of Engineering Thermodynamics. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/11002>
- Bharti, S., Dutta, V., Ghetiya, N. (2025). Optimization of friction stir processing parameters to produce AA2014/SiC surface composites using response surface methodology. *Engineering Research Express*, 7 (2), 025404. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adc973>
- Gabor, T., Akin, S., Jun, M. B.-G. (2024). Numerical studies on cold spray gas dynamics and powder flow in circular and rectangular nozzles. *Journal of Manufacturing Processes*, 114, 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.005>
- Kamaraj, A., Zhou, W., Song, X. (2021). Computational Fluid Dynamics Simulation of Cold Spray Process for Particle Velocity Investigation. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE 2021)*, 244–248. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5763-4_54
- Wang, X., Yang, K., Zhou, W., Xia, Z. (2025). Numerical simulation study of nozzle flow field during cold spraying. *Journal of Physics: Conference Series*, 2951 (1), 012098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2951/1/012098>

24. Palodhi, L., Ray, P. K. (2024). Critical Velocity for Cold-Sprayed Coatings. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77 (9), 2277–2291. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03360-6>
25. Hu, W. J., Tan, K., Markovych, S., Liu, X. L. (2021). Study of a Cold Spray Nozzle Throat on Acceleration Characteristics via CFD. *Journal of Engineering Sciences*, 8 (1), F19–F24. [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(1).f3)
26. Li, H., Le, Y., Xu, H., Li, Z. (2025). Design of the Dual-Path Cold Spray Nozzle to Improve Deposition Efficiency. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9 (5), 144. <https://doi.org/10.3390/jmmp9050144>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.348371

DEFINING THE TRANSIENT PROCESS OF BELT LATERAL RUNOUT FROM A CONVEYOR DRUM WITH SLIGHT CURVATURE (p. 71–83)

Alexandr Gavryukov

Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6377-4180>

Mykhailo Kolesnikov

Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4892-2153>

Andrii Zapryvoda

Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9171-9325>

Oleg Dedov

Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-772X>

A belt conveyor has been investigated in this work. The effect of the angle of the belt axis relative to the drum axis on the lateral runout of the belt was considered. The influence of the belt speed, the load at the point of contact of the belt with the generator drum, the curvature of the generator drum, and the linear mass of the belt on the lateral runout of the belt were also examined. The friction coefficient of the belt sliding on the rollers in the running section of the belt on the drum, the belt tension at the point of running on the drum were investigated.

It was established that lateral runout always occurs in the absence of perpendicularity of the belt axis relative to the drum axis. The belt speed during lateral runout is maximum at the beginning of the transition process and decreases as the displacement increases. During lateral runout of the belt in the zone of its contact with the generator drum, tangential and normal loads occur.

The stationary state is achieved when the belt axis becomes perpendicular to the drum axis.

Tangential loads in the absence of slippage do not depend on normal loads and are caused by the non-perpendicular location of the belt axis relative to the drum axis. Tangential load is proportional to the lateral displacement of the belt. The transient process of belt slippage on a drum with a slight curvature of the generator is described by an equation corresponding to an aperiodic link of the first order.

This study make it possible to determine optimal parameters when designing a system for automatic belt centering on a drum with a curved generatrix. Thus, in the development of the end station of a belt conveyor (Patent of Ukraine No. 98378), a hydraulic pump NSH-10E was used. The magnitude of the drum curvature is limited by the resulting unevenness of belt tension across the width, as well as the possibility of belt slippage, and significantly depends on the stiffness of the belt.

Keywords: belt conveyor, lateral belt runout, drum, mathematical model, transient process.

References

1. Wallard, A. J. (2000). Bringing precise measurement to the workplace. XVI IMEKO World Congress Measurement - Supports Science - Improves Technology - Protects Environment and Provides Employment - Now and in the Future. Vienna. Available at: <https://www.imeko.info/publications/wc-2000/IMEKO-WC-2000-TC8-P229.pdf>
2. Dąbek, P., Wróblewski, A., Wodecki, J., Bortnowski, P., Ozdoba, M., Król, R., Zimroz, R. (2023). Application of the Methods of Monitoring and Detecting the Belt Mistracking in Laboratory Conditions. *Applied Sciences*, 13 (4), 2111. <https://doi.org/10.3390/app13042111>
3. Shah, K. P. (2018). Construction and Maintenance of Belt Conveyors for Coal and Bulk Material Handling Plants. Available at: <https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Construction-and-Maintenance-of-Belt-Conveyors-for-Coal-and-Bulk-Material-Handling-Plants.pdf>
4. Deo, M. J., Hujare, D. P. (2023). Design and development of self-aligning troughing idler used in belt conveyor system. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1068–1072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.164>
5. 3 basic conveyor belt tracking rules to follow. Accurate. Available at: <https://accurateindustrial.com/resources/articles/3-basic-conveyor-belt-tracking-rules-to-follow/>
6. Siegling transilon conveyor and processing belts. Recommendations for machine design. Available at: http://technik.pl/5_Katalogi/305en.pdf
7. Fabric Conveyor Belts. Engineering Guide. Habasit. Available at: <https://www.pooleyinc.com/wp-content/uploads/FabricEngineering.pdf>
8. Kolisnyk, M. P., Bereziuk, A. M., Shevchenko, A. F., Zaiets, H. V., Chervonoshtan, A. L. (2021). Obgruntuvannya konstruktyvnykh rishen pryvidnykh barabaniv iz bokovymy hvyntovymy nariznymy poverkhniamy strichkovykh konveieriv. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 2 (66), 62–70. Available at: https://ptt-journals.net/files/Pidtt2021_2_66_6.pdf
9. Suglovov, V. V., Raksha, S. V., Hryenko, P. A. (2016). Rationale for centering capacity of redesigned belt conveyor drums. *Science and Transport Progress*, 1 (61), 158–168. <https://doi.org/10.15802/stp2016/61039>
10. Zaslenskiy, V. I., Konovalenko, V. V., Zajcev, G. L., Zaslenskiy, I. I. (2017). O gorizontaltnej zhestkosti vintovyh cilindricheskih pruzhin vibracionnoj mashiny. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsiyi «Mekhanika mashyn – osnovna skladova prykladnoi mekhaniky» prysviachenoi 110-richchiu z dnia narodzhennia Kozhevnikova Serhiia Mykolaiovycha*. Dnipro, 31–34. Available at: <https://www.duet.edu.ua/uploads/DocS/st5.pdf>
11. Mikušová, N., Millo, S. (2017). Modelling of Conveyor Belt Passage by Driving Drum Using Finite Element Methods. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11 (4), 239–246. <https://doi.org/10.12913/22998624/80311>
12. Havriukov, O. V. (2023). Rezultaty doslidzhen system avtomatichnoho keruvannia strichkovoho konveiera pratsuiuchoho zi zminnoiu dovzhynoiu transportuvannia. Kyiv: KNUBA, 220. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r_81/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=VFEIR&P21DBN=VFEIR&Z21ID=&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=DOC%2FREP0001741%2EPDF
13. Havriukov, O. V., Semenchuk, A. K., Kononikhin, H. A., Tretyak, A. V. (2010). Pat. No. 98378 UA. Kintseva stantsiya strichkovoho konveiera. No. a201010979; declared: 13.09.2010; published: 10.05.2012.
14. Gavryukov, A., Kolesnikov, M., Zapryvoda, A., Lutsenko, V., Bondarchuk, O. (2024). Determining the mechanism for calculating the tension of a working conveyor belt during a change in the transportation length. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (128)), 56–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300648>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345896

РОЗРОБКА І ПОСТПРОЦЕСІНГ МАТЕМАТИЧНИХ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТАКТНИХ ЗАДАЧ (с. 6–15)

Т. А. Зайцева, Г. А. Шишканова, Я. А. Гончаров

Об'єктом дослідження є процес контактної взаємодії жорсткого штампа з пружним півпростором під дією центрально прикладеного стискаючого навантаження. Вирішувалась проблема автоматизації обробки результатів для аналізу даних.

У роботі розглянуто задачу для штампа зі складною геометрією. Контактна область має двозв'язну форму, обмежену концентричними еліпсами, що ускладнює аналітичний опис напружено-деформованого стану.

Для аналітичного розв'язання задачі застосовано метод збурень, використовуючи знайдене раніше розвинення потенціала пружного шару за малим параметром. Це дає змогу привести задачу до конфігурації з круговим кільцем, для якої відомі точні розв'язки у вигляді ряду з рекурентними коефіцієнтами. Отримані аналітичні результати слугують еталонною основою для оцінки точності чисельного моделювання, наприклад, при побудові скінченно-елементної моделі. Така математична формалізація дозволяє ефективно оцінювати достовірність отриманих результатів.

В результаті у програмному середовищі Ansys побудовано розрахункові моделі з урахуванням особливостей форми штампа. Розроблено спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє експорт розрахункових даних до програмного пакета MATLAB з подальшим постпроцесінгом для автоматизації обробки даних. Запропонований підхід знизив трудомісткість постпроцесінгу приблизно на 45–55%.

Виявлено, що зі збільшенням ексцентриситету еліпса зростає величина тиску під штампом. У центральній зоні фіксується нижчий тиск, який зростає по краях області контакту. Виявлені чисельні результати добре корелюють з аналітичними.

Отримані результати можуть бути використані при розрахунках на міцність в інженерній практиці за умов контактної взаємодії у конструктивних елементах машинобудування, де зона контакту має форму еліптичного кільця.

Ключові слова: контактна зона, штамп, програмне забезпечення, метод скінченних елементів, аналітичний розв'язок.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.345897

ЧИСЕЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЕКСТРАПОЛЯЦІЇ РІЧАРДСОНА ДЛЯ ДИНАМІЧНИХ ЗАДАЧ БАГАТОШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК (с. 16–29)

Ю. А. Мейш, М. О. Белова, Н. В. Арнаута, Н. В. Майбородіна, В. П. Герасименко

Об'єктом дослідження є вимушені коливання неоднорідної пружної структури у вигляді багатошарової циліндричної оболонки, яка складається з жорстко-з'єднаних шарів і підсилена дискретними кільцевими елементами. Побудовано математичну модуль коливань пружної неоднорідної структури під дією нестационарного навантаження. Напружено-деформований стан багатошарової циліндричної оболонки з дискретними кільцевими ребрами досліджено з використанням геометрично нелінійної теорії оболонок і стрижнів типу Тимошенка. Запропоновано чисельний алгоритм із застосуванням екстраполяції Річардсона для дослідження побудованої моделі.

Для прикладу розглянуто тришарову підкріплену циліндричну оболонку з врахуванням дискретності розміщення ребер при динамічному навантаженні з жорстко защемленими краями. Запропонований чисельний алгоритм дав можливість дослідити напружено-деформований стан тришарової підкріпленої пружної структури циліндричного типу в довільний момент часу. Проведений порівняльний аналіз чисельних результатів розрахунків показав, що згідно стандартного підходу розбіжність по величинам прогинів для $n = 40$ і $n = 160$ досягала 31%, для $n = 80$ і $n = 160$ порядку 5%. Згідно підходу по Річардсону для $n = 40 \div 80$ і стандартного для $n = 160$ ця різниця становила близько 1%.

Особливістю даного дослідження є використання екстраполяції Річардсона для визначення напружено-деформованого стану тришарової підкріпленої циліндричної оболонки, що дозволило підвищити точність розв'язку динамічної задачі без зменшення кроку обчислень.

Результати проведених в роботі досліджень можна використовувати при дослідженні нестационарних коливань оболонкових конструкцій в науково-дослідних та інженерно-конструкторських організаціях.

Ключові слова: багатошарові оболонки, вимушені коливання, нестационарне навантаження, чисельні методи, екстраполяція Річардсона.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342868

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНАНИХ З ЛАМІНОВАНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК МЕРБАУ, АРМОВАНИХ ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ ПОЛІМЕРОМ (с. 30–44)

Lilis Nurhayati, Sri Murni Dewi, Wisnumurti, Devi Nuralinah

У цій роботі досліджуються механічні властивості та механізм армування з'єднаних шипами клеєних балок Мербау, виготовлених з відходів деревообробної промисловості, а також порівнюються неармовані зразки та балки, посилені зовнішньо U-подібним вуглецевим волокном полімером (ВВП). Проблема, яку необхідно вирішити, полягає в крихкому руйнуванні та зниженій згиналь-

ній здатності клеєного бруса зі шипами; отже, вона визначає комбінований вплив орієнтації з'єднань (лицьова сторона-шип та лицьова сторона-стик), кількості шарів (три та п'ять шарів) та армування ВВП на блочно зібрані балки з випадково розподіленими шипами за допомогою чотириточкових випробувань на згинання. Результати дослідження показують, що використання ВВП має величезний вплив на згинальні характеристики матеріалу, при цьому граничне навантаження збільшується на 27,4–48,8%, а максимальний згинальний момент – на 45,3% порівняно з неармованими балками. Середній прогин при максимальному навантаженні також збільшився на 6,5–51,4%, що свідчить про вищу здатність до деформації та кращу пластичність матеріалу. Зазначені покращення пояснюються успішним зміщенням напружень із зони розтягу деревини на вуглепластик, зменшенням концентрації напружень у місцях розривів шипоподібних з'єднань, а також збільшенням часу зародження та поширення тріщин у випадкових місцях, що разом змінює структурну реакцію від раптового крихкого руйнування до більш стабільного прогресування пошкодження, що призводить до руйнування. Серед протестованих конфігурацій балки, що з'єднуються торцевими стінками, отримали найвищий модуль пружності 20,46 ГПа (збільшення на 8,8%), тоді як п'ятишарова конфігурація з'єднань, що з'єднуються торцевими стінками, посиленна вуглепластиком, досягла найбільшого модуля пружності на розрив 55,85 МПа (збільшення на 33,4%). Тришарові балки з'єднуються торцевими стінками та продемонстрували найбільше збільшення міцності на згин після армування, яке склало 48,30 МПа (збільшення на 46,4%). Зміна шарування з трьох до п'яти шарів підвищила міцність на згин на 18,9%, що свідчить про ефект гомогенізації, який покращує розподіл напружень у шаруватих балках, що складаються з блоків. Загалом, поєднання конфігурації шипоподібного з'єднання, кількості шаруватості, випадкового складання блоків та посилення вуглецевим композитом (ВВП) відкрило шлях для перетворення деревних відходів мербау на високопродуктивні інженерні дерев'яні елементи для низьковуглецевих конструкційних застосувань.

Ключові слова: Мербау, клеєний брус, балки, ВВП, армування, згинання, механічні властивості, MOE, MOR.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.344818

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БАЛОК ІЗ ПЕРФОРАЦІЄЮ В НЕСУЧІЙ КОНСТРУКЦІЇ МОДЕРНІЗОВАНОГО ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ КОНТЕЙНЕРІВ (с. 45–52)

С. В. Панченко, А. О. Ловська, І. Л. Журавель, Є. О. Науменко, О. В. Жарова

Об'єктом дослідження є процеси виникнення, сприйняття та перерозподілу навантажень в несучій конструкції вагона-платформи. Проблема, що вирішувалась в даному дослідженні, полягає у покращенні техніко-економічних показників модернізованого вагона-платформи для перевезень контейнерів шляхом зменшення його тари. З цією метою проведено визначення полів розподілені напружень в модернізованій конструкції вагона-платформи. Встановлено, що в основних повздовжніх балках рами має місце резерв міцності, який обумовлений недовикористанням вантажопідйомності вагона-платформи. Це викликає зайву підресорену масу його несучої конструкції. Тому пропонується впровадження перфорації в стінках основних повздовжніх балок вагона-платформи. Для обґрунтування такого рішення проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи. Встановлено, що максимальні напруження в несучій конструкції на 13,6% нижчі за допустимі.

Проектний строк служби вагона-платформи склав не менше 32 років. Розрахунок біаксильності несучої конструкції показав, що її найбільші значення мають місце в середніх частинах хребтових балок.

Особливістю запропонованого рішення є те, що воно дозволяє покращити техніко-економічні показники модернізованого вагона-платформи при незначних капітальних вкладеннях.

Сфера практичного використання отриманих результатів – залізничний транспорт.

Умовою практичного використання результатів є симетричне завантаження несучої конструкції вагона-платформи вантажем.

Результати проведеного дослідження сприятимуть підвищенню ефективності контейнерних перевезень вантажів в міжнародному сполученні. Також отримані результати будуть корисними напрацюваннями при проектуванні та створенні нових конструкцій вагонів-платформ та модернізаціях існуючих.

Ключові слова: залізничний транспорт, вагон-платформа, модернізація конструкції, напружений стан конструкції, контейнерні перевезення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347020

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАЦІЇ ЗАДНЬОЇ КРАЙКИ ЛОПАТІ ТУРБІНИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА НА АЕРОДИНАМІЧНИЙ ШУМ (с. 53–62)

С. В. Алексеєнко, А. Ю. Дреус, Л. В. Накашидзе, В. А. Дербабя, С. А. Золотаренко

Об'єктом дослідження є акустичні процеси, що виникають під час обтікання потоком повітря сегмента лопаті турбіни вітроенергетичної установки. Проблема аеродинамічного шуму, що генерується вітряними турбінами, є одним з факторів, що стримує широке впровадження вітрогенераторів. Зменшення шуму можливо за рахунок зміни дизайну лопаті турбіни для впливу на аеродинамічні процеси під час обтікання потоком повітря. Роботу присвячено експериментальному дослідженню можливості зменшення аеродинамічного шуму вітрових турбін за рахунок модифікацій задньої крайки лопаті. Представлено оригінальну методику акустичного експерименту в безлунній кімнаті та подано результати експериментальних досліджень. Розглянуто дві різні модифікації зазубрених задніх крайок лопаті з аеродинамічним профілем NASA0012: плоску зазубрену крайку, та об'ємну зазубрену крайку. Результати вимірювань аеродинамічного шуму дослідних зразків сегментів лопатей порівнювалися з шумом базового оригінального зразка. Акустичні вимірювання проводилися в діапазоні швидкостей потоку: 7,5–20 м/с та кутів атаки 0–15°. Результати досліджень продемонстрували, що обидві конфігурації зазубреної задньої крайки дозволяють знизити рівень аеродинамічного шуму порівняно з базовим сегментом. З'ясовано, що зниження шуму відбувається за відносно малих кутів атаки (0–5°) та помірних швидкостей потоку (до 15 м/с). У зазначеному діапазоні параметрів зменшення аеродинамічного шуму відбувалося за рахунок зниження рівня

звукового тиску в певному частотному діапазоні на величину до 4 дБ. Сегмент із плоскими зазубринами виявився дещо ефективнішим з точки зору зниження шуму в низькочастотному діапазоні. Результати роботи можуть бути використані під час проектування вітроенергетичних систем нового покоління зі зниженим рівнем шуму та інших аеродинамічних пристроїв.

Ключові слова: аеродинамічний шум, лопаті вітрогенератора, акустичний експеримент, Фур'є аналіз, пасивні методи.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347028

РОЗРОБЛЕННЯ ПІДХОДУ ДО РОЗРАХУНКУ І ОПТИМІЗАЦІЇ НАДЗВУКОВОГО СОПЛА ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ (с. 63–70)

О. В. Шорінов, Н. В. Савченко, О. В. Шипуль, І. В. Зорік, С. М. Нижник

Об'єктом дослідження є процес прискорення частинок порошку в надзвуковому соплі для холодного газодинамічного напилювання (ХГН). Проблемою, на вирішення якої було спрямовано дослідження, є відсутність встановлених закономірностей комплексного впливу параметрів газу та геометрії сопла на швидкість частинок порошку на виході з сопла, що ускладнює прогнозування та керування процесом напилювання.

Запропоновано та реалізовано новий підхід до проектування сопел для ХГН, який дає змогу цілеспрямовано оптимізувати їх геометричні параметри з урахуванням параметрів газу на вході в сопло. Підхід базується на поєднанні аналітичного моделювання (ізоентропічна модель, модель прискорення частинок), методів статистичного планування та аналізу експериментів (центральний композиційний план, побудова рівнянь регресії) і багатофакторної оптимізації геометрії сопла. Встановлено закономірності між швидкістю частинок алюмінію розміром 25 мкм на виході з сопла і параметрами газу: тиск гальмування 0,8–2,5 МПа і температура гальмування 300–700°C. Також в розрахунках враховано вплив геометрії сопла: критичний діаметр 1,0–3,0 мм, вихідний діаметр 5,0–10,0 мм, довжина розширювальної ділянки 80–150 мм. Отримане сопло та режим напилювання забезпечують досягнення частинками швидкості на виході 596 м/с, що перевищує необхідний мінімум 550 м/с, при витраті повітря 1,0 м³/хв. Запропонований підхід може бути застосований для проектування нових сопел для мобільних і стаціонарних установок ХГН, що працюють на стисненому повітрі, азоті або гелії з тиском від 0,6 до 4,0 МПа, зокрема для напилювання захисних і відновлювальних покриттів в умовах обмеженої витрати газу. Отримані результати створюють основу для розроблення програмного інструмента або автоматизованої системи проектування сопел для ХГН в широкому діапазоні початкових параметрів газу та порошку.

Ключові слова: ізоентропічна модель, прискорення частинок, багатофакторна оптимізація, критична швидкість, дисперсійний аналіз.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.348371

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ БОКОВОГО СХОДЖЕННЯ СТІЧКИ З БАРАБАНА КОНВЕЄРА З НЕЗНАЧНОЮ КРИВОЛІНІЙНІСТЮ (с. 71–83)

О. В. Гаврюков, М. Ю. Колесніков, А. В. Запривода, О. П. Дедов

Об'єкт дослідження – стрічковий конвеєр. Досліджено, як впливає на боковий схід стрічки кут установки осі стрічки відносно осі барабана. Також досліджено вплив на боковий схід стрічки швидкості стрічки, навантаження в місті контакту стрічки з твірною барабана, криволінійність твірної барабана, погонна маса стрічки. Досліджено коефіцієнт тертя ковзання стрічки по роликах в набігаючому перерізі стрічки на барабан, натягнення стрічки в точці набігання на барабан.

Встановлено, що боковий схід завжди має місце за відсутності перпендикулярності осі стрічки відносно осі барабана. Швидкість стрічки при боковому сході максимальна на початку перехідного процесу і зменшується по мірі збільшення зміщення. При боковому сході стрічки в зоні її контакту з твірною барабана мають місце дотичні і нормальні навантаження.

Стаціонарний стан досягається, коли вісь стрічки стає перпендикулярною осі барабана.

Дотичні навантаження за відсутності прослизань не залежать від нормальних і викликані не перпендикулярним розташуванням осі стрічки відносно осі барабана. Дотичне навантаження пропорційне боковому зміщенню стрічки. Перехідний процес сходу стрічки на барабані з незначною криволінійністю твірної описується рівнянням, відповідним аперіодичній ланці першого порядку.

Наведені дослідження дозволяють отримати оптимальні параметри при проектуванні системи автоматичного центрування стрічки на барабані з криволінійною твірною. Так, при створенні кінцевою станцією стрічкового конвеєра (патент України №98378) був застосований гідронасос НШ-10Е. Величина криволінійності барабана обмежується виникаючою нерівномірністю натягнення стрічки по ширині, а також можливістю сходу стрічки, і істотно залежить від жорсткості стрічки.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, боковий схід стрічки, барабан, математична модель, перехідний процес.