

ABSTRACT AND REFERENCES

ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.346696

DETERMINING FORMATION FEATURES OF A WEAR-RESISTANT LAYER SURFACED WITH POWDER TAPE (p. 6–15)

Valeriy Kassov

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3034-7470>

Olena Berezshna

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6205-1987>

Svitlana Yermakova

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2582-557X>

Svetlana Malyhina

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2622-5473>

Dmytro Turchanin

Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1792-1574>

This study investigates the technological process of surfacing parts with a powder tape. The task addressed is to optimize the technological process of multilayer arc surfacing with powder tapes based on mathematical modeling of the formation of a seam of a given chemical composition with a minimum allowance for subsequent mechanical processing.

The technological parameters for the coating formation process have been calculated depending on the thickness of the surfacing layer of surfaces after machining, the maximum number of surfacing layers, and the required chemical composition of the weld metal. That has made it possible to devise technological recommendations for surfacing complex alloys on parts of a wide range of applications that operate under conditions of intensive wear.

The results are relevant in additive technologies, part of which is arc surfacing with powder electrodes of various designs, when it is necessary to fabricate an article by sequentially applying layers along a trajectory that repeats the geometry of the parts. The proposed mathematical models make it possible to obtain a reliable and operational assessment of the influence of technological process parameters on the formation of the chemical composition and geometry of the deposited layer during multilayer surfacing, taking into account the minimum waste of deposited metal after finishing grooving.

With values of the ratio of the height of the reinforcement roller to its width (≤ 0.3) and the relative surfacing step within 0.75–0.90, the maximum efficiency of the formation of a multilayer coating is ensured (by the minimum height of the deposited layer). It also enables the minimization of costs for subsequent machining, taking into account the imitation of errors (by the maximum height of irregularities). If the weld reinforcement coefficient is more than 2, then the required chemical composition is achieved already in the second coating layer.

The resulting numerical accuracy makes it possible to predict effective ways to save welding materials and reduce the labor intensity of the process when surfacing complex-alloyed wear-resistant alloys.

Keywords: powder tape, multilayer deposition, deposited metal, mathematical model, complex alloys.

References

1. Prisyazhnyuk, P., Ivanov, O., Matvienkiv, O., Marynenko, S., Korol, O., Koval, I. (2022). Impact and abrasion wear resistance of the hard-facings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system. *Procedia Structural Integrity*, 36, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>
2. Voronchuk, O. P., Zhudra, O. P., Kaida, T. V., Petrov, O. V., Kapitan-chuk, L. M., Bogaichuk, I. L. (2022). Influence of the composition of charge components of flux-cored strips of C-Fe-Cr-Nb alloying system on chemical composition and structure of the deposited metal. *Automatic Welding*, 8, 29–34. <https://doi.org/10.37434/as2022.08.04>
3. Yang, X. (2015). Analysis of Chinese Welding Industries Today and in the Future (Focus on Cost, Productivity, and Quality). *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 3 (6), 127. <https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20150306.15>
4. Quintino, L. (2014). Overview of coating technologies. *Surface Modification by Solid State Processing*, 1–24. <https://doi.org/10.1533/9780857094698.1>
5. Gribkov, E. P., Perig, A. V. (2016). Research of energy-power parameters during powder wire flattening. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85 (9-12), 2887–2900. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8714-1>
6. Trembach, B., Grin, A., Makarenko, N., Zharikov, S., Trembach, I., Markov, O. (2020). Influence of the core filler composition on the recovery of alloying elements during the self-shielded flux-cored arc welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5), 10520–10528. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.052>
7. Kassov, V., Berezshna, O., Yermakova, S., Turchanin, D., Malyhina, S. (2025). Features of heating and melting of powder tape for surfacing of composite and complex-alloyed alloys. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (134)), 60–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.327904>
8. Gupta, D., Bansal, A., Jindal, S. (2024). Effect of fluxes in submerged arc welding for steel: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.053>
9. Suryakumar, S., Somashekara, M. A. (2013). Manufacturing of functionally gradient materials by using weld-deposition. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*, 505–508. <https://doi.org/10.1533/978-1-78242-164-1.505>
10. Kavishwar, S., Bhaiswar, V., Kochhar, S., Fande, A. (2024). Comprehensive studies on conventional and novel weld cladding techniques and their variants for enhanced structural integrity: an overview. *Welding International*, 38 (9), 618–638. <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2402285>
11. Murugan, N., Parmar, R. S. (1994). Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 41 (4), 381–398. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90003-5)
12. Balasubramanian, K., Vikram, R., Sambath, S., Sowrirajan, M., Arunachalashiva, M., Abhijith, P. V., Deepak, D. (2023). Optimization of flux cored arc welding parameters to minimize the dilution percentage of AISI 316L stainless steel cladding on mild steel. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19 (1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01487-2>

13. Buki, A. A. (1992). Calculating the chemical composition of deposited metal when welding with coated electrodes. *Welding International*, 6 (10), 818–820. <https://doi.org/10.1080/09507119209548294>
14. Palani, P. K., Murugan, N. (2006). Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30 (7-8), 669–676. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0101-2>
15. Ryabtsev, I. O., Babinets, A. A., Lentyuhov, I. P. (2025). Control of the formation of metal structure surface with flux-cored wires. *Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00885-z>
16. Voronchuk, A. P. (2014). Flux-cored strips for wear-resistant surfacing. *The Paton Welding Journal*, 6-7, 72–75. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.14>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343939

REVEALING THE INFLUENCE OF 3D PRINTING DENSITY ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER ARTICLES (p. 16–22)

Borys Zlotenko

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0870-8535>

Oleksii Volianyk

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>

Mykola Rubanka

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2367-0333>

Dmytro Statsenko

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3064-3109>

Andrii Polishchuk

Khmelnyskyi National University, Khmelnyskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>

Oleksandr Duka

Khmelnyskyi National University, Khmelnyskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8231-856X>

This study investigates the process of 3D printing of polymer articles in light industry. The task addressed is to determine the stressed-strained state of 3D-printed articles made of PETG polymer, taking into account the nonlinear (inelastic) physical and mechanical properties of the material and the influence of printing density on its mechanical behavior.

The study's result established that the tensile curve of 3D-printed samples from PETG follows the form of power function that reflects the properties of an inelastic polymer material. Applying the resulting power function relationship between deformations and stress, unlike the linear one, has made it possible to determine the normal stresses that appear in the internal layers of 3D-printed articles in the form of a beam of rectangular cross-section at bending.

Numerical values were derived for parameters of the power function that reflects the dependence of stresses on strain when stretching 3D-printed samples from PETG, manufactured at a print density of 70%, 80%, 90%, and 100%. It was found that with an increase in the density of PETG 3D printing from 60% to 100%, the tensile stresses in the samples increase from 12.3 to 19.6 MPa, while the relative deformation at their rupture decreases from 0.076 to 0.062. The resulting dependences make it possible to determine the required density of

3D printing to ensure the predefined limit load parameters for articles during their application.

Taking into account the nonlinear nature of deformation and the influence of the density of the structure on tensile stresses and relative deformation at the rupture of the polymer material creates opportunities for designing and manufacturing 3D-printed articles in light industry with predictable properties to enable their operability under operational loads.

Keywords: 3D printing density, PETG, Ludwick's power function, nonlinear stress-strain dependence.

References

1. Zhang, J., Lu, S., Yang, Y., Liu, Y., Guo, Y., Wang, H. (2024). Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort – From the perspective of plantar pressure and contact area. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518>
2. Leshchynshyn, M., Zlotenko, B., Synyuk, O., Kuleshova, S., Onofriichuk, V., Mykhailovskyi, Y. (2023). 3D printing of pads on lasts utilized in the production of custom-made comfortable footwear. *Leather and Footwear Journal*, 23 (4), 231–240. Available at: https://www.revistapielarieincaltaminte.ro/revistapielarieincaltaminteresurse/en/fisiere/full/vol23-nr4/article1_vol23_issue4.pdf
3. Li, J., Jung, I., Lee, S. (2025). Analysis of midsole gait in running shoes with various 3D printed biomimetic structure. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92235-x>
4. Li, J., Jung, I., Lee, S. (2024). Analysis of plantar pressure of midsole prepared by 3D printed biomimetic structures with different densities. *Fashion and Textiles*, 11 (1). <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00402-x>
5. Philippart, W., Bus, S., van Dieën, J. H. (2022). The Effects of 3D-Printed Silicone Midsole Design on Gait Biomechanics. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4156115>
6. Fadeel, A., Abdulhadi, H., Newaz, G., Srinivasan, R., Mian, A. (2022). Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9 (1), 263–277. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac001>
7. Baranowski, P., Kapusta, A., Piatek, P., Sarzyński, M. (2024). Influence of 3D-printed cellular shoe soles on plantar pressure during running – Experimental and numerical studies. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 44 (4), 858–873. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2024.11.004>
8. Skyba, M., Synyuk, O., Zlotenko, B., Kulik, T., Natroshvili, S. (2021). A new modern theoretical view of the structural model of the structure of natural leather. *Vlakna a Textil*, 28 (2), 82–90. Available at: http://vat.ft.tul.cz/2021/2/VaT_2021_2_10.pdf
9. Skyba, M. Ye., Synyuk, O. M., Zlotenko, B. M. (2019). Model of changing the stressed-deformed state of a polymer sheet during stretching. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 83–89. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/4>
10. Shin, D. S., Kim, Y. S., Jeon, E. S. (2019). Approximation of Non-Linear Stress–Strain Curve for GFRP Tensile Specimens by Inverse Method. *Applied Sciences*, 9 (17), 3474. <https://doi.org/10.3390/app9173474>
11. Li, X., Zhang, X., Chen, J., Huang, L., Lv, Y. (2021). Uniaxial Tensile Creep Behavior of Epoxy-Based Polymer Using Molecular Simulation. *Polymers*, 13 (2), 261. <https://doi.org/10.3390/polym13020261>
12. Kurkin, E., Spirina, M., Espinosa Barcenas, O. U., Kurkina, E. (2022). Calibration of the PA6 Short-Fiber Reinforced Material Model for 10% to 30% Carbon Mass Fraction Mechanical Characteristic Prediction. *Polymers*, 14 (9), 1781. <https://doi.org/10.3390/polym14091781>

13. Erkkilä, A.-L., Leppänen, T., Hämäläinen, J. (2013). Empirical plasticity models applied for paper sheets having different anisotropy and dry solids content levels. *International Journal of Solids and Structures*, 50 (14-15), 2151–2179. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.004>
14. Palaparti, D. P. R., Choudhary, B. K., Isaac Samuel, E., Srinivasan, V. S., Mathew, M. D. (2012). Influence of strain rate and temperature on tensile stress-strain and work hardening behaviour of 9Cr-1Mo ferritic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 538, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.109>
15. Pysarenko, H. S., Kvitka, O. L., Umanskyi, E. S.; Pysarenko, H. S. (Ed.) (2004). *Opir materialiv*. Kyiv: Vyshcha shk., 655. Available at: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/%D0%9F%D0%B8%D1%81%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%93.%D0%A1.%20%D0%9E%D0%BF%D1%96%D1%80%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%B%D1%96%D0%B2.pdf>
16. Zlotenko, B., Volianyk, O., Rubanka, M., Statsenko, D., Melnyk, H. (2025). Use of innovative computer tools and scientific research methods in the footwear industry. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 351 (3.1), 382–388. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-46>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347457

FORMING THE PROPERTIES OF PARTS OBTAINED BY FDM BY MODIFYING THE SURFACE LAYER USING MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL TREATMENT (p. 23–40)

Walid Alnusirat

Al-Balqa Applied University, As-Salt, Jordan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9604-3165>

Swook Hann

Korea Photonics Technology Institute, Gwangju, Korea
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4064-6063>

Oleksandr Salenko

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>

Vadym Orel

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-3253>

Tatyana Kozlovskaya

Kharkiv National University of Internal Affairs
of the Kremenchuk Flight College, Kremenchuk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524>

Anton Kostenko

Limited Liability Company "Frontline Robotics", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3350-5323>

Daniil Tsurkan

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4240-6231>

Petro Melnychuk

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-756X>

Yana Kovalenko

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0086-2036>

This study focuses on the processes and phenomena related to post-processing of FDM articles in the form of mechanical, thermal (laser), or chemical action, as well as their influence on the set of FDM-printed parts' properties. At present, the lack of a methodological basis for the choice of post-processing methods creates obstacles in the attempt to improve the operational properties of articles and is an important problem in additive engineering.

The paper investigates the post-processing of articles obtained by the method of layer-by-layer arrangement of plastic filament from the point of view of changing their mechanical and physical-technical characteristics due to the formed modified surface layer.

It was noted that post-processing can be performed by mechanical action (blade cutting or abrasive processing), physical-technical, thermal (for example, laser), and chemical (etching, application of adhesive layers). As a result of such actions, a modified layer of a certain thickness is formed on the surface of the article, the structure, and properties of which will differ from the base, and its features can significantly change the operational properties of the article as a whole.

The analysis of various post-processing options was performed on the basis of the functional transformation of the input parameters of the workpiece into the output ones, which made it possible to link the regularities in the formation of stresses, thermal fields, and fields of motion of matter from the parameters of the state of the surfaces, which change in the process of post-processing from the initial to the final one, and which are reflected by combinatorial sets. This approach allows one to avoid duplication of operations or individual transitions, determine the expediency of using certain techniques, increase the reproducibility of the additive process, and ensure the reliability of the finished article as a whole.

The dependence of FDM articles' properties on the state of the surfaces has been established; the corresponding functional dependences have been proposed for determining the thickness of the modified layer formed by certain mechanical or physical-technical influences. It is shown that the use of sharply sharpened tools makes it possible to obtain for PLA $R_a = 3.0 \dots 3.6 \mu\text{m}$, $R_z = 20 \dots 40 \mu\text{m}$ during turning, milling, and drilling; for ABS, respectively, $R_a = 1.2 \dots 1.6 \mu\text{m}$, $R_z = 5 \dots 8 \mu\text{m}$, with a modified layer thickness of 0.15–0.65 mm and 0.1–0.25 mm, respectively. Laser exposure modifies the layer at a depth of 0.2...0.5 mm; chemical treatment with ketone vapors forms a layer with a thickness of 0.3...1.1 mm and is determined by the temperature of the saturated vapor, as well as diffusion rate.

Keywords: additive manufacturing, mechanical properties, post-processing, mathematical modeling, temperature and stress fields.

References

1. Chen, M. Y., Skewes, J., Woodruff, M. A., Dasgupta, P., Rukin, N. J. (2020). Multi-colour extrusion fused deposition modelling: a low-cost 3D printing method for anatomical prostate cancer models. *Scientific Reports*, 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67082-7>
2. Doshi, M., Mahale, A., Kumar Singh, S., Deshmukh, S. (2022). Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2269–2275. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003>
3. Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11 (1), 639–649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>

4. Patel, R., Desai, C., Kushwah, S., Mangrola, M. H. (2022). A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 60, 2162–2166. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.385>
5. Ambade, V., Rajurkar, S., Awari, G., Yelamasetti, B., Shelare, S. (2023). Influence of FDM process parameters on tensile strength of parts printed by PLA material. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19 (1), 573–584. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01490-7>
6. Prashar, G., Vasudev, H., Bhuddhi, D. (2022). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17 (5), 2221–2235. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>
7. Pandžić, A., Hodžić, D., Kadrić, E. (2021). Experimental Investigation on Influence of Infill Density on Tensile Mechanical Properties of Different FDM 3D Printed Materials. *TEM Journal*, 10 (3), 1195–1201. <https://doi.org/10.18421/tem103-25>
8. Ai, J.-R., Vogt, B. D. (2022). Size and print path effects on mechanical properties of material extrusion 3D printed plastics. *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (5), 1009–1021. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00275-w>
9. Erokhin, K., Naumov, S., Ananikov, V. (2023). Defects in 3D Printing and Strategies to Enhance Quality of FFF Additive Manufacturing. A Review. *ChemRxiv*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-lw1ns>
10. Salenko, O., Strutinsky, V., Avramov, K., Orel, V., Dzhulii, D., Havrushkevych, A., Kostenko, A. (2025). Providing technical and algorithmical support to the predictable properties of honeycomb filler obtained by additive processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (135)), 58–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329745>
11. Orel, V., Kozlovskaya, T., Salenko, O., Melnychuk, P. (2025). Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling. *Technical Engineering*, 1 (95), 76–93. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93)
12. Chojnacki, B., Chojak, A., Binek, W., Pawlik, J., Idczak, J. (2025). Accuracy of 3D printing of the samples in the prototyping of cavity-based metamaterials. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98391-4>
13. Huang, X., Yang, W., Song, F., Zou, J. (2022). Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters. *Construction and Building Materials*, 335, 127496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127496>
14. Tamburrino, F., Barone, S., Paoli, A., Rationale, A. V. (2021). Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 16 (2), 221–254. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.1917039>
15. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
16. Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., Ul Haq, M. I. (2022). 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
17. Orel, V., Salenko, O., Melnychuk, P. (2024). Innovative additive technologies in the creation of structural elements of aircraft and spacecraft. *Technical Engineering*, 1 (93), 64–69. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-64-69](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-64-69)
18. Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A., Talamona, D. (2021). Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts – A Critical Review. *Polymers*, 13 (10), 1587. <https://doi.org/10.3390/polym13101587>
19. Salenko, O. F., Shepelenko, I. V., Budar Mokhamed, R. F. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti obrobky kompozytsiynykh materialiv zastosuvanniam hibrydnogo instrumentu. *Materialy konferentsiyi: pidvyshchennia nadiynosti mashyn i obladnannia*. Kropyvnytskyi. Available at: <https://share.google/aUR1tDkFOFwiZck2w>
20. Dizon, J. R. C., Gache, C. C. L., Cascolan, H. M. S., Cancino, L. T., Advincula, R. C. (2021). Post-Processing of 3D-Printed Polymers. *Technologies*, 9 (3), 61. <https://doi.org/10.3390/technologies9030061>
21. Jabłońska, M., Łastowska, O. (2024). Enhancing of Surface Quality of FDM Moulded Materials through Hybrid Techniques. *Materials*, 17 (17), 4250. <https://doi.org/10.3390/ma17174250>
22. Khosravani, M. R., Schüürmann, J., Berto, F., Reinicke, T. (2021). On the Post-Processing of 3D-Printed ABS Parts. *Polymers*, 13 (10), 1559. <https://doi.org/10.3390/polym13101559>
23. Mathew, A., Kishore, S. R., Tomy, A. T., Sugavaneswaran, M., Scholz, S. G., Elkaseer, A. et al. (2023). Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Progress in Additive Manufacturing*, 8 (6), 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>
24. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F., Ungureanu, L., Munteanu, I. (2024). Post-Production Finishing Processes Utilized in 3D Printing Technologies. *Processes*, 12 (3), 595. <https://doi.org/10.3390/pr12030595>
25. Francis, V., Garg, S., Saxena, K. K., Jain, P. K., Lade, J., Kumar, D. (2022). Effect of chemical and heat treatment on 3D printed parts: nanoparticles embedment approach. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8 (sup4), 2277–2288. <https://doi.org/10.1080/2374068x.2022.2037876>
26. Valerga, A. P., Haq, M. I. U., Fernandez-Vidal, S. R. (2023). Chemical post-processing for fused deposition modelling. *Post-Processing Techniques for Additive Manufacturing*, 129–153. <https://doi.org/10.1201/9781003288619-6>
27. Şükrü Adin, M., Kam, M. (2024). An Overview of Post-Processing of Fused Deposition Modelling 3D Printed Products. *Post-Processing of Parts and Components Fabricated by Fused Deposition Modeling*, 1–10. <https://doi.org/10.1201/9781032665351-1>
28. Gulevskis, A., Volkov, K. (2025). Computer Simulation and Speed-up of Solving Heat Transfer Problems of Heating and Melting Metal Particles with Laser Radiation. *Computers*, 14 (2), 47. <https://doi.org/10.3390/computers14020047>
29. Wahab Hashmi, A., Ahmad, S., Gulam Mustafa, M., Tian, Y., Iqbal, F., Singh Mali, H. et al. (2024). Abrasive flow finishing of 3D-Printed Aerofoils: Design, numerical Simulation, and experimental analysis. *Optics & Laser Technology*, 174, 110578. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110578>
30. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A. (2021). The Surface Quality Improvement Methods for FDM Printed Parts: A Review. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, 167–194. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_9
31. Cao, L., Xiao, J., Kim, J. K., Zhang, X. (2023). Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.008>
32. Mushtaq, R. T., Wang, Y., Khan, A. M., Rehman, M., Li, X., Sharma, S. (2023). A post-processing laser polishing method to improve process

performance of 3D printed new Industrial Nylon-6 polymer. *Journal of Manufacturing Processes*, 101, 546–560. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.019>

33. Khosravani, M. R., Ayatollahi, M. R., Reinicke, T. (2023). Effects of post-processing techniques on the mechanical characterization of additively manufactured parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 107, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.018>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343388

DETERMINING THE EFFECT OF ROTATION SPEED ON THE ENERGY EFFICIENCY OF THE IMPACT, COMPRESSION, AND ABRASION GRINDING PROCESSES IN A TUMBLING MILL (p. 41–53)

Yuriy Naumenko

National University of Water and
Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3658-3087>

Kateryna Deineka

Separate Structural Unit "Rivne Technical Vocational College
of the National University of Political Science
and Technology", Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7376-6734>

This study investigates a grinding process in a tumbling mill loaded by impact, crushing, and abrasion. The impact, compression, and shear interactions of particles are taken into account, the intensity of which is determined by the zones of flight, shear layer, and solid flow of the fill in the cross-section of the rotating drum chamber.

The task addressed is to determine the influence of rotation speed on the energy intensity of the grinding process for individual loading mechanisms.

An experimental method for numerical modeling of productivity analogs for grinding mechanisms by the energies of the corresponding interactions was applied.

The energy intensity of the process was estimated by the ratios of productivity analogs and the relative power of rotation drive. Energy efficiency was determined taking into account experimental data on physical productivity and drive power of the mill model.

The effect of rotation speed on grinding was experimentally estimated at a chamber filling degree of 0.45.

The phenomenon of an intensive decrease in the energy intensity of the grinding process with a decrease in rotation speed was established.

The results made it possible to identify energy-efficient values of the relative rotation speed for the grinding processes: coarse – by impact at $\psi_{\omega} = 0.75\text{--}0.9$, medium – by crushing at $\psi_{\omega} = 0.55\text{--}0.65$, and fine – by abrasion at $\psi_{\omega} = 0.3\text{--}0.4$. The established effect is explained by the revealed activation of interactions: impact – at high-speed, compressive – at medium-speed, and shear – at low-speed rotation.

The established patterns enable prediction of rational technological parameters for energy-saving processes of multi-stage grinding in tumbling mills.

Keywords: tumbling mill; intra-chamber filling; grinding by impact, crushing, and abrasion; energy efficiency.

References

1. Deniz, V. (2013). Comparisons of Dry Grinding Kinetics of Lignite, Bituminous Coal, and Petroleum Coke. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35 (10), 913–920. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.514591>
2. Góralczyk, M., Krot, P., Zimroz, R., Ogonowski, S. (2020). Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamics – An Overview. *Energies*, 13 (24), 6735. <https://doi.org/10.3390/en13246735>
3. Tavares, L. M. (2017). A Review of Advanced Ball Mill Modeling. *KONA Powder and Particle Journal*, 34, 106–124. <https://doi.org/10.14356/kona.2017015>
4. Kelly, E. G., Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to Mineral Processing*. Wiley.
5. Gupta, A., Yan, D. S. (Eds.) (2016). *Mineral processing design and operations: An introduction*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-01236-1>
6. King, R. P. (2001). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26303-3>
7. Wills, B. A., Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/c2010-0-65478-2>
8. Kwon, J., Jeong, J., Cho, H. (2016). Simulation and optimization of a two-stage ball mill grinding circuit of molybdenum ore. *Advanced Powder Technology*, 27 (4), 1073–1085. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.03.016>
9. Dhiman, S., Joshi, R. S., Singh, S., Gill, S. S., Singh, H., Kumar, R., Kumar, V. (2022). Recycling of Ti6Al4V machining swarf into additive manufacturing feedstock powder to realise sustainable recycling goals. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131342>
10. Mulenga, F. K., Moys, M. H. (2014). Effects of slurry filling and mill speed on the net power draw of a tumbling ball mill. *Minerals Engineering*, 56, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.028>
11. Soleymani, M. M., Fooladi, M., Rezaeizadeh, M. (2016). Experimental investigation of the power draw of tumbling mills in wet grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230 (15), 2709–2719. <https://doi.org/10.1177/0954406215598801>
12. Soleymani, M. M., Fooladi, M., Rezaeizadeh, M. (2016). Effect of slurry pool formation on the load orientation, power draw, and impact force in tumbling mills. *Powder Technology*, 287, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.009>
13. Yin, Z., Peng, Y., Zhu, Z., Ma, C., Yu, Z., Wu, G. (2019). Effect of mill speed and slurry filling on the charge dynamics by an instrumented ball. *Advanced Powder Technology*, 30 (8), 1611–1616. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.05.009>
14. Bian, X., Wang, G., Wang, H., Wang, S., Lv, W. (2017). Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation. *Minerals Engineering*, 105, 22–35. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.014>
15. Anticoi, H., Guasch, E., Pérez-Álvarez, R., de Luis-Ruiz, J. M., Oliva, J., Hoffman Sampaio, C. (2022). Rod Mill Product Control and Its Relation to Energy Consumption: A Case Study. *Minerals*, 12 (2), 183. <https://doi.org/10.3390/min12020183>
16. Deniz, V. (2004). The effect of mill speed on kinetic breakage parameters of clinker and limestone. *Cement and Concrete Research*, 34 (8), 1365–1371. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.025>
17. Deniz, V. (2013). Effects of Mill Speed on Kinetic Breakage Parameters of Four Different Particulate Pumices. *Particulate Science and Technology*, 31 (2), 101–108. <https://doi.org/10.1080/02726351.2012.658903>

18. Mulenga, F. K., Chimwani, N. (2013). Introduction to the use of the attainable region method in determining the optimal residence time of a ball mill. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.09.007>
19. Yin, Z., Peng, Y., Zhu, Z., Yu, Z., Li, T. (2017). Impact Load Behavior between Different Charge and Lifter in a Laboratory-Scale Mill. *Materials*, 10 (8), 882. <https://doi.org/10.3390/ma10080882>
20. Soleymani, M. M. (2021). RETRACTED: Experimental Study of Operational Parameters on Product Size Distribution of Tumbling Mill. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/09544089211062763>
21. Li, T., Yin, Z., Wu, G. (2021). Study on heat transfer behavior and thermal breakage characteristic of the charge in ball mills. *Advances in Mechanical Engineering*, 13 (3). <https://doi.org/10.1177/1687814021994964>
22. Cayirli, S. (2018). Influences of operating parameters on dry ball mill performance. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54 (3). <https://doi.org/10.5277/ppmp1876>
23. Hanumanthappa, H., Vardhan, H., Mandela, G. R., Kaza, M., Sah, R., Shanmugam, B. K. (2020). A comparative study on a newly designed ball mill and the conventional ball mill performance with respect to the particle size distribution and recirculating load at the discharge end. *Minerals Engineering*, 145, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106091>
24. Gupta, V. K., Sharma, S. (2014). Analysis of ball mill grinding operation using mill power specific kinetic parameters. *Advanced Powder Technology*, 25 (2), 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2013.10.003>
25. Gupta, V. K. (2020). Energy absorption and specific breakage rate of particles under different operating conditions in dry ball milling. *Powder Technology*, 361, 827–835. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.033>
26. Chimwani, N., Mulenga, F. K., Hildebrandt, D., Glasser, D., Bwalya, M. M. (2014). Scale-up of batch grinding data for simulation of industrial milling of platinum group minerals ore. *Minerals Engineering*, 63, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.023>
27. Chimwani, N., Mulenga, F. K., Hildebrandt, D., Glasser, D., Bwalya, M. M. (2015). Use of the attainable region method to simulate a full-scale ball mill with a realistic transport model. *Minerals Engineering*, 73, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.012>
28. Chimwani, N., Hildebrandt, D. (2018). Modeling of an open mill with scalped feed for the maximum production of a desired particle size range. *Particulate Science and Technology*, 37 (3), 314–324. <https://doi.org/10.1080/02726351.2017.1370048>
29. Chimwani, N. (2021). A Review of the Milestones Reached by the Attainable Region Optimisation Technique in Particle Size Reduction. *Minerals*, 11 (11), 1280. <https://doi.org/10.3390/min11111280>
30. Makgoale, D. M. (2019). Effects Of Mill Rotational Speed On The Batch Grinding Kinetics Of A UG2 Platinum Ore. UNISA. Available at: <https://uir.unisa.ac.za/items/2894bd6d-32c1-418e-a4c5-e011f4b757d0>
31. Metzger, M. J., Glasser, B. J. (2013). Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill. *Powder Technology*, 237, 286–302. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.006>
32. Metzger, M. J., Desai, S. P., Glasser, D., Hildebrandt, D., Glasser, B. J. (2011). Using the attainable region analysis to determine the effect of process parameters on breakage in a ball mill. *AIChE Journal*, 58 (9), 2665–2673. <https://doi.org/10.1002/aic.12792>
33. Metzger, M. J., Glasser, D., Hausberger, B., Hildebrandt, D., Glasser, B. J. (2009). Use of the attainable region analysis to optimize particle breakage in a ball mill. *Chemical Engineering Science*, 64 (17), 3766–3777. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.05.012>
34. Naumenko, Y. (2017). Modeling of fracture surface of the quasi solid-body zone of motion of the granular fill in a rotating chamber. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (86)), 50–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96447>
35. Naumenko, Y., Sivko, V. (2017). The rotating chamber granular fill shear layer flow simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (88)), 57–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107242>
36. Naumenko, Y. (2017). Modeling a flow pattern of the granular fill in the cross section of a rotating chamber. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 59–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110444>
37. Deineka, K., Naumenko, Y. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillations of the intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461>
38. Deineka, K., Naumenko, Y. (2019). Establishing the effect of a decrease in power intensity of self-oscillating grinding in a tumbling mill with a reduction in an intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (102)), 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291>
39. Deineka, K., Naumenko, Y. (2020). Establishing the effect of decreased power intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill when the crushed material content in the intra-chamber fill is reduced. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (106)), 39–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209050>
40. Deineka, K., Naumenko, Y. (2021). Establishing the effect of a simultaneous reduction in the filling load inside a chamber and in the content of the crushed material on the energy intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (109)), 77–87. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224948>
41. Deineka, K., Naumenko, Y. (2022). Revealing the mechanism of stability loss of a two-fraction granular flow in a rotating drum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (118)), 34–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263097>
42. Deineka, K. Yu., Naumenko, Yu. V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 60–68. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10>
43. Naumenko, Y., Deineka, K. (2023). Building a model of the impact grinding mechanism in a tumbling mill based on data visualization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (123)), 65–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283073>
44. Naumenko, Y., Deineka, K. (2023). Building a model of the compression grinding mechanism in a tumbling mill based on data visualization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (125)), 64–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287565>
45. Naumenko, Y., Deineka, K., Zabchuk, S. (2024). Building a model of the abrasion grinding mechanism in a tumbling mill based on data visualization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (128)), 21–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301653>
46. Coal preparation plant – Principles and conventions for flowsheets (ISO/IEC Standard No. 924:1989). International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/5340.html>
47. DIN EN 1009-3. Maschinen für die mechanische Aufbereitung von Mineralien und ähnlichen festen Stoffen – Sicherheit – Teil 3: Spezifische Anforderungen für Brecher und Mühlen; Deutsche Fassung

EN 1009-3:2020. Deutsches Institut für Normung. Available at: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nam/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:316006092>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343387

ANALYTICAL POINT-FORM DESCRIPTION OF THE TECHNIQUE FOR GRAPHICAL DIFFERENTIATION OF A PLANE CURVE (p. 54–63)

Viktor Vereschaga

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0038-8300>

Kseniia Lysenko

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3047-6352>

Yevhen Adoniev

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1279-4138>

Ernest Murtaziiev

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2154-5523>

Ivan Vereshchaha

GlobalLogic EMEA, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3760-7567>

Tetiana Volina

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-2208>

This study considers graphic differentiation, in particular, a chord method, as one of the options for graphic differentiation in terms of replacing graphic operations with analytical ones in point form.

Determining the reference point and the center of projection for constructing a strip of differential projection correlates its positions with respect to the values of the derivative of the function, which is graphically represented by a discrete series of points. The reference point, the right differential projection of the first and left differential projection of the second points have the same values in the field of derivatives. However, they do not coincide with the values of the derivatives of the original functions. To establish such a correspondence, the difference between the left and right differential projections of the first point is divided in half and subtracted from the first derivative of the original function – the point polynomial.

Relative to the reference point, parallel to the first link of the accompanying broken line of the discretely represented curve, a straight line is drawn that intersects the abscissa axis at the center of the projection. Finding the reference point and the projection center is carried out analytically in point form without any graphic operations. Rays are drawn from the projection center parallel to one of the links of the accompanying polyline, thus forming a strip of differential projections, within which the values of the angles of inclination of the tangents to the curve at the base points are selected. Discrete derivative values are connected by straight line segments or remain separate points. The resulting derivative values coincide with the analytical values with a deviation of no more than 0.5–1.5 units.

The developed algorithms could be integrated into automated design and engineering analysis systems for effective calculation of derivatives of discretely given curves. In addition, they could serve as the basis for designing computationally productive modules in artificial intelligence and digital data processing systems that work with geometric and discrete information arrays.

Keywords: point polynomial, strip of diffprojections, approximation, analytical chord method, drawings analytization.

References

1. Fischer, M., Krause, C. M. (2025). Pivotal examples in graphical differentiation – an analysis of semiotic and theoretic control. *Proceedings of the 48th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education: Research Reports*, 1, 259–266. Available at: https://www.researchgate.net/publication/392626925_PIVOTAL_EXAMPLES_IN_GRAPHICAL_DIFFERENTIATION_AN_ANALYSIS_OF_SEMIOTIC_AND_THEORETIC_CONTROL
2. Zakharova, I., Shchetynin, S., Shchetynina, V., Zusin, A., Volenko, I. (2025). Use of robotic and automated systems in welding and restoration of parts. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 117–129. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.117>
3. Aghayeva, K., Krauklit, G. (2025). Automated methane emission monitoring systems based on satellite data: Radiation transfer model analysis. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 146–156. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.146>
4. Turchyn, O. (2024). Introduction of neural network technologies to optimise the control of the operating modes of a sucker-rod pump installation. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 32–42. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.32>
5. Andrievskiy, I., Spivak, S., Gogota, O., Yermolenko, R. (2024). Application of the regression neural network for the analysis of the results of ultrasonic testing. *Machinery & Energetics*, 15 (1), 43–55. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.43>
6. Mukherjee, S., Claassen, M., Bürkner, P.-C. (2025). DGP-LVM: Derivative Gaussian process latent variable models. *Statistics and Computing*, 35 (5). <https://doi.org/10.1007/s11222-025-10644-4>
7. Shahan, J. T., Walker, S. W. (2025). Exact shape derivatives with unfitted finite element methods. *Journal of Numerical Mathematics*. <https://doi.org/10.1515/jnma-2024-0113>
8. Guo, P., Lan, Y., Qiao, J. (2025). Exact solutions of differential equations: renormalization group based polynomial scheme. *Communications in Theoretical Physics*, 77 (10), 105005. <https://doi.org/10.1088/1572-9494/add24e>
9. Konopatskiy, E. V., Bezditnyi, A. A. (2019). Geometric modeling and optimization of multidimensional data in Radishev integrated drawing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1260 (7), 072006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/7/072006>
10. Konopatskiy, E. V., Mashtaler, S. N., Bezditnyi, A. A. (2019). Study of high-strength steel fiber concrete strength characteristics under elevated temperatures using mathematical modelling methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 687 (2), 022040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/687/2/022040>
11. Konopatskiy, E. V., Bezditnyi, A. A. (2020). Geometric modeling of multifactor processes and phenomena by the multidimensional parabolic interpolation method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1441 (1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1441/1/012063>
12. Lako, A., Barko, O. (2024). Design and optimisation of automated hydraulic gate control systems for flood control. *Machinery & Energetics*, 15 (4), 58–68. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.58>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343193

A TECHNIQUE FOR APPROXIMATING A TUBULAR HELICAL SURFACE WITH STRIPS OF TORUSES (p. 64–70)

Andrii NesvidominNational University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9227-4652>**Serhii Pylypaka**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1496-4615>**Victor Nesvidomin**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1495-1718>**Vitaliy Babka**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4971-4285>**Olga Shoman**National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3660-0441>**Oleksandr Savoiskyi**Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6459-4931>**Taras Pylypaka**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5582-1859>**Mykola Likhonia**Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0778-252X>**Svetlana Semirnenko**Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9304-3637>**Yana Borodai**Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0048-815X>

This study's object is the approximation of a non-swept helical tubular surface by strips of sweeping surfaces (toruses) and the construction of sweeps of these strips.

Approximating non-swept tubular surfaces by sections of sweep ones is a common practice in the design of various types of pipelines. A clear example of such an approximation is a sports ball whose outer shell consists of a certain number of separate elements. These elements must fit most tightly to the non-swept surface along its certain lines. Such lines are the lines of curvature. The task is to find these lines on the surface in order to subsequently analytically describe the torus strip, which is tangent to the non-swept surface along this line.

As is known, there are two families of mutually perpendicular lines of curvature on surfaces. This paper considers a family of curvature lines that has advantages over another one in terms of approximation. This explains the results reported here. Their special feature is that in order to find the desired family of curvature lines, it is necessary to solve a differential equation.

The solution to this equation was borrowed from a scientific article and used for further calculations. The results were visualized in the form of an approximated tubular surface with four and six strips.

The sweeps of these strips were constructed for a tubular surface, in which the center line is a helical line $r = 1$. All dimensions are given in linear units. Instead of a circle generatrix, it is given by the radius of the cylinder $a = 2$, which hosts it, and the helical parameter $b = 1.5$ (step $H = 9.4$). The radius of the circle generatrix of the tubular surface of the original tubular surface in the approximated surface in the given examples is a polygon (square or equilateral hexagon).

Keywords: line of curvature, tangent strip, geodesic curvature, sweeping surface, numerical integration.

References

1. Hruban, V., Drobitko, A., Khramov, M., Tovpyha, M. (2025). Strength analysis and optimisation of trailer agricultural machinery structures using finite element methods. *Machinery & Energetics*, 16 (2), 117–130. <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2025.117>
2. Nazarenko, V., Ostroushko, B. (2025). Comparative research of 3D printer main control parameters and characteristics utilising Klipper firmware. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 81–90. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.81>
3. Duhanets, V., Semenishena, R., Fedirko, P., Pukas, V., Volynkin, M. (2025). Application of automated welding processes in the restoration of pipelines of power facilities. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 91–103. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.91>
4. Zakharova, I., Shchetynin, S., Shchetynina, V., Zusin, A., Volenko, I. (2025). Use of robotic and automated systems in welding and restoration of parts. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 117–129. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.117>
5. Selvaraju, P. (2024). Developability Approximation for Neural Implicits Through Rank Minimization. 2024 International Conference on 3D Vision (3DV). IEEE, 780–789. <https://doi.org/10.1109/3dv62453.2024.00041>
6. Pan, Y., Xu, Z., Wang, B., Deng, B. (2025). Piecewise Ruled Approximation for Freeform Mesh Surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 44 (4), 1–18. <https://doi.org/10.1145/3730866>
7. Baharami, H., Piovarci, M., Tarini, M., Bickel, B., Pietroni, N. (2025). Fabricable Discretized Ruled Surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 44 (3), 1–15. <https://doi.org/10.1145/3734519>
8. Binninger, A., Verhoeven, F., Herholz, P., Sorkine-Hornung, O. (2021). Developable Approximation via Gauss Image Thinning. *Computer Graphics Forum*, 40 (5), 289–300. <https://doi.org/10.1111/cgf.14374>
9. Zeng, Z., Jia, X., Shen, L., Bo, P. (2022). Developable mesh segmentation by detecting curve-like features on Gauss images. *Computers & Graphics*, 109, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2022.10.003>
10. Ion, A., Rabinovich, M., Herholz, P., Sorkine-Hornung, O. (2020). Shape approximation by developable wrapping. *ACM Transactions on Graphics*, 39 (6), 1–12. <https://doi.org/10.1145/3414685.3417835>
11. Nesvidomin, A., Ahmed, A. K., Pylypaka, S., Volina, T., Nesvidomin, V., Vereshchaga, V. et al. (2023). Construction of a mathematical model for approximating the sphere by strips of unfolding surfaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (126)), 78–84. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291554>
12. Mukvych, M. M. (2009). Konstrukciuvannia trubchastykh poverkhon iz prostoroivoi vissiu, opysanykh simiamy koordynatnykh liniy kryvyny. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, 81, 195–200. Available at: https://scholar.google.ru/citations?view_op=view_cita

tion&hl=ru&user=CiktFzQAAAAJ&citation_for_view=CiktFzQAAAAJ:IjCSPb-OGc4C

13. Kresan, T., Ahmed, A. K., Pylypaka, S., Volina, T., Voloshko, T. (2024). Construction of the working surfaces of the tillage screw body from the compartments of the developable helicoid. *Machinery & Energetics*, 15 (3), 9–21. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2024.09>
14. Nesvidomin, A., Pylypaka, S., Volina, T., Shtyka, Y., Rybenko, I. (2025). Optimisation of a developable surface model passing through a helical curve with variable pitch. *Machinery & Energetics*, 16 (2), 49–57. <https://doi.org/10.31548/machinery/2.2025.49>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347454

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS IN THE MAIN FAIRING OF A LAUNCH VEHICLE AT THE PRE-LAUNCH PREPARATION STAGE (p. 71–79)

Mykola Biliaiev

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

Viktoriia Biliaieva

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

Tetiana Rusakova

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5526-3578>

Vitalii Kozachyna

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

Pavlo Semenenko

Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0447-5591>

Oleksandr Berlov

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7442-0548>

Pavlo Kirichenko

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

Nataliia Hrudkina

Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0914-8875>

Yuliia Voitenko

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0819-3794>

Olena Dolzhenkova

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7970-8110>

This study investigates the sequential and continuous formation of thermal fields in the main fairing of a launch vehicle when using protective screens. While thermostating, it is necessary to predict the risk in overheating the payload body and, if necessary, take measures to reduce the temperature near the payload.

An engineering solution to this problem can be found through the use of protective screens of various configurations inside the main

fairing. These screens reduce the heat flow from the heated outer wall of the fairing to the payload surface. However, there are no standard methods for solving this problem.

To evaluate the effectiveness of this protection, a numerical model based on the fundamental equations of continuum mechanics has been constructed. The modeling equations include the energy equation and the equation of motion of a non-viscous gas. Using the numerical model built, a computational experiment was conducted, which confirmed the effectiveness of using protective screens to shield the payload body from excessive heating. The computer time required to perform the computational experiment is 3 seconds. This makes it possible to perform a significant number of calculations in a working day.

The proposed simple technical means for protecting the payload from excessive heating could be used in the design of new models for rocket technology. Applying these screens slightly reduces the need for large volumes of clean air. The numerical model built could be used at specialized organizations at the "for-sketch" design stage. Numerical experiments have shown that the use of protective screens inside the main fairing makes it possible to achieve a temperature 2–4°C lower than the maximum permissible temperature near the payload.

Keywords: thermal pollution, main fairing, protective screen, numerical model, computational experiment.

References

1. Groves, C. E. (2014). Dissertation defense computational fluid dynamics uncertainty analysis for payload fairing spacecraft environmental control systems. Florida, 160. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140008549/downloads/20140008549.pdf>
2. Alcayde, V., Vercher-Martínez, A., Fuenmayor, F. J. (2021). Thermal control of a spacecraft: Backward-implicit scheme programming and coating materials analysis. *Advances in Space Research*, 68 (4), 1975–1988. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.041>
3. New Glenn Payload User's Guide. Revision C. NGPM – MA0001 (2018). Blue Origin. Available at: https://yellowdragonblog.com/wp-content/uploads/2019/01/new_glenn_payload_users_guide_rev_c.pdf
4. Potapov, A. M., Kovalenko, V. A., Kondratiev, A. V. (2015). Payload fairings comparison of existing and prospective launch vehicles and their foreign counterparts. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, 1 (118), 35–43. Available at: https://www.researchgate.net/publication/295920078_Sravnenie_golovnyh_obtekatelej_sushestvuusih_i_perspektivnyh_otecestvennyh_raket-nositelej_i_ih_zarubezhnyh_analogov
5. Kashanov, A. E., Degtyarev, A. V., Gladkiy, E. G., Baranov, E. Yu. (2012). Ocenka tehnikeskikh riskov pri puske rakety-nositelya "Dnepr". *Aviacionno-kosmicheskayatehnika i tehnologiya*, 5 (92), 113–117.
6. Timoshenko, V. I., Agarkov, A. V., Moshnenko, Yu. I., Sirenko, V. N., Knyshenko, Yu. V., Lyashenko, Yu. G. (1999). Problemy termostatirovaniya i obespecheniya sohrannosti kosmicheskogo apparata v period predstartovoy podgotovki i pri vyvedenii na orbitu. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 5 (5/6), 56–64. Available at: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/1999-05/knit-1999-05-5-6-09-timoshenko.pdf>
7. Falcon User's Guide. Version 8 (2025). SpaceX. Available at: <https://www.spacex.com/assets/media/falcon-users-guide-2025-05-09.pdf>
8. LM-3A Series Launch Vehicle User's Manual (2011). Available at: <http://www.georing.biz/usefull/LM-3A%20Series%20Launch%20Vehicles%20User's%20Manual%20Issue%202011.pdf>

9. Ariane 6 User's Manual. Issue 2 Revision 0. Arianespace. Available at: https://ariane.group/app/uploads/sites/4/2024/10/Mua-6_Issue-2_Revision-0_March-2021.pdf
10. Pamuk, M. T. (2019). Numerical simulation of forced convection in an enclosure. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (1), 133–144. <https://doi.org/10.17654/hm018010133>
11. Dutra, M., Monteiro, M., Marti, A. C. (2024). Cooling of an object by forced convection. *European Journal of Physics*, 45 (4), 045101. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad5393>
12. Riaz, A., Ibrahim, A., Bashir, M. S., Abdullah, M., Shah, A., Quddus, A. (2022). Convection Heat Transfer from Heated Thin Cylinders Inside a Ventilated Enclosure. *Semiconductor Science and Information Devices*, 4 (2), 10–16. <https://doi.org/10.30564/ssid.v4i2.4719>
13. Lou, Y.-Y., Cai, B.-Y., Li, Y.-Z., Li, J.-X., Li, E.-H. (2020). Numerical Simulation of the Air Cooling System for Scientific Payload Rack on a Space Station. *Energies*, 13 (22), 6145. <https://doi.org/10.3390/en13226145>
14. Junxin, Z., Wenan, Z., Zhongye, W., Laping, X., Gang, L., Chuang, Z. et al. (2021). Strategy for Enhancing Fairing Air Conditioning Security Capacity in the On-Time Launch of Chinese Mars-1 Exploration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006 (1), 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2006/1/012060>
15. Biliaiev, M., Rusakova, T., Biliaieva, V., Kozachyna, V., Berlov, O., Semenenko, P. (2022). Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *26th International Scientific Conference Transport Means 2022*, 122–127. Available at: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2023/02/Transport-Means-2022-Part-I.pdf>

АНОТАЦІЇ

ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.346696

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ШАРУ, НАПЛАВЛЕНОГО ПОРОШКОВОЮ СТРИЧКОЮ (с. 6–15)**В. Д. Кассов, О. В. Бережна, С. О. Єрмакова, С. В. Малигіна, Д. М. Турчанін**

Об'єктом дослідження є технологічний процес наплавлення деталей порошковою стрічкою. Вирішувалась проблема оптимізації технологічного процесу багат шарового дугового наплавлення порошковими стрічками на основі математичного моделювання формування шва заданого хімічного складу з мінімальним припуском на наступну механічну обробку. Проведено розрахунок технологічних параметрів процесу формування покриття залежно від товщини наплавленого шару поверхонь після механічної обробки, максимальної кількості наплавлених шарів, необхідного хімічного складу металу шва. Це дозволило розробити технологічні рекомендації для наплавлення складнолегованих сплавів на деталі широкого спектру застосування, які працюють в умовах інтенсивного зношування. Отримані результати актуальні й в адитивних технологіях, частиною яких є дугове наплавлення порошковими електродами різної конструкції, коли необхідно створювати виріб за рахунок послідовного нанесення шарів за траєкторією, що повторює геометрію деталей. Запропоновані математичні моделі дозволяють отримати достовірну та оперативну оцінку впливу технологічних параметрів процесу на формування хімічного складу та геометрії наплавленого шару при багат шаровому напавленні з урахуванням мінімальних відходів наплавленого металу після чистової проточки. При значеннях величини відношення висоти посилення валику до його ширини ($\leq 0,3$) і відносному кроку наплавлення в межах 0,75–0,90 забезпечується максимальна ефективність формування багат шарового покриття (за мінімальною висотою нанесеного шару). Також забезпечується мінімізація витрат на наступну механічну обробку з врахуванням наслідкування погіршностей (за максимальною висотою нерівностей). Якщо коефіцієнт посилення шва більше 2, то необхідний хімічний склад досягається вже у другому шарі покриття. Отримана числова точність дозволяє спрогнозувати ефективні шляхи економії зварювальних матеріалів та зниження трудомісткості процесу при напавленні складнолегованих зносостійких сплавів.

Ключові слова: порошкова стрічка, багат шарове наплавлення, наплавлений метал, математична модель, складнолеговані сплави.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343939

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ ЩІЛЬНОСТІ 3D-ДРУКУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ (с. 16–22)**Б. М. Злотенко, О. Ю. Воляник, М. М. Рубанка, Д. В. Стаценко, А. О. Поліщук, О. В. Дука**

Об'єктом цього дослідження є процес 3D-друку полімерних виробів легкої промисловості. Вирішувалась проблема визначення напружено-деформованого стану 3D-друкованих виробів із полімеру PETG, з урахуванням нелінійних (непружних) фізико-механічних властивостей матеріалу та впливу щільності друку на його механічну поведінку.

В результаті дослідження виявлено, що залежність напружень від деформації 3D-друкованих зразків з PETG має вигляд степеневі функції, яка відображає непружні властивості полімерного матеріалу. Використання отриманої степеневі залежності між деформаціями і напруженнями, на відміну від лінійної, дозволило визначити нормальні напруження, які виникають у внутрішніх шарах 3D-друкованих виробів у формі балки прямокутного поперечного перетину при згинанні.

Отримані числові значення параметрів степеневі функції, яка відображає залежність напружень від деформації при розтяганні 3D-друкованих зразків з PETG, виготовлених при щільності друку 70%, 80%, 90% і 100%. Встановлено, що із збільшенням щільності 3D-друку PETG з 60% до 100% розривні напруження у зразках збільшуються з 12,3 до 19,6 МПа, а відносна деформація при їх розриві зменшується з 0,076 до 0,062. Отримані залежності дозволяють визначити необхідну щільність 3D-друку для забезпечення заданих граничних параметрів навантаження виробів у процесі їх експлуатації.

Врахування нелінійного характеру деформування і впливу щільності структури на розривні напруження та відносну деформацію при розриві полімерного матеріалу створює можливості для проєктування і виготовлення 3D-друкованих виробів у легкій промисловості з прогнозованими властивостями для забезпечення їх працездатності, з урахуванням експлуатаційних навантажень.

Ключові слова: щільність 3D-друку, PETG, степеневі функція Людвіка, нелінійна залежність напруження-деформація.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347457

ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ FDM, МОДИФІКАЦІЄЮ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕХАНІЧНОЮ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОЮ ОБРОБКОЮ (с. 23–40)**Walid Alnusirat, Swook Hann, О. Ф. Саленко, В. М. Орел, Т. Ф. Козловська, А. О. Костенко, Д. О. Цуркан, П. П. Мельничук, Я. П. Коваленко**

Об'єктом дослідження є процеси і явища постоброблення FDM виробів у вигляді механічної, теплової (лазерної) або хімічної дії та їх вплив на комплекс властивостей деталей FDM-друку. Відсутність на сьогодні методологічного підґрунтя щодо вибору методів постоброблення створює перепони в намаганні поліпшити експлуатаційні властивості виробів, і є важливою проблемою адитивного машинобудування. В роботі досліджуються варіанти постоброблення виробів, отриманих методом шарового викладання пластикового філаменту з точки зору зміни їх механічних та фізико-технічних характеристик за рахунок утвореного модифікованого поверхневого шару.

Зазначено, що постоброблення може виконуватися шляхом механічного впливу (лезового різання або абразивного оброблення), фізико-технічного, теплового (наприклад, лазерного) та хімічного (протравлення, нанесення клейових шарів). В результаті таких дій на поверхні виробу утворюється модифікований шар певної товщини, структура і властивості якого відрізнятимуться від основи, а його особливості можуть істотно змінювати експлуатаційні властивості виробу в цілому.

Аналіз різних варіантів постоброблення виконано на основі функціонального перетворення вхідних параметрів заготовки у вихідні, що дозволило пов'язати закономірності формування напружень, теплових полів та полів руху речовини з параметрів стану поверхонь, які змінюються в процесі постоброблення від початкового до кінцевого, і які відображено комбінаторними множинами. Такий підхід дозволяє уникати дублювання операцій або окремих переходів, визначати доцільність застосування тих чи інших прийомів, підвищувати відтворюваність адитивного процесу та забезпечувати надійність готового виробу в цілому.

Встановлено умовленість властивостей FDM виробів станом поверхонь та запропоновано відповідні функціональні залежності для визначення товщини модифікованого шару, утворюваного певними механічними або фізико-технічними впливами. Показано, що використання гостро заточених інструментів дозволяє отримати для PLA $R_a = 3,0 \dots 3,6$ мкм, $R_z = 20 \dots 40$ мкм при точінні, фрезеруванні та свердлінні; ABS – відповідно $R_a = 1,2 \dots 1,6$ мкм, $R_z = 5 \dots 8$ мкм, з товщиною модифікованого шару 0,15–0,65 мм та 0,1–0,25 мм відповідно. Лазерний вплив модифікує шар на глибині 0,2...0,5 мм; хімічна обробка парами кетонів формує шар товщиною 0,3...1,1 мм і визначається температурою насиченої пари, швидкістю дифузії.

Ключові слова: адитивне виробництво, механічні властивості, постоброблення, математичне моделювання, поля температур та напружень.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343388

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ УДАРОМ, РОЗДАВЛЮВАННЯМ ТА СТИРАННЯМ В БАРАБАННОМУ МЛІНІ (с. 41–53)

Ю. В. Науменко, К. Ю. Дейнека

Об'єктом дослідження є процес подрібнення в барабанному млині при реалізації навантаження ударом, роздавлюванням та стиранням. Враховано ударну, стискаючу та зсувну взаємодії частинок, інтенсивність яких визначається зонами польоту, зсувного шару та твердотільного руху завантаження у поперечному перерізі камери обертowego барабана.

Вирішувалась проблема визначення впливу швидкості обертання на енергоємність процесу помелу для окремих механізмів навантаження.

Застосовано експериментальний метод чисельного моделювання аналогів продуктивності для механізмів подрібнення за енергіями відповідних взаємодій.

Енергоємність процесу оцінювалась за співвідношеннями аналогів продуктивності та відносної потужності приводу обертання. Енергетична ефективність визначалась із урахуванням експериментальних даних фізичної продуктивності та потужності приводу моделі млина.

Експериментально оцінено вплив швидкості обертання на помел при ступені заповнення камери 0.45.

Встановлено явище інтенсивного зниження енергоємності процесу помелу зі зменшенням швидкості обертання.

Отримані результати дозволили виявити енергетично ефективні значення відносної швидкості обертання для процесів подрібнення: грубого – ударом при $\psi_{\omega} = 0.75 \dots 0.9$, середнього – роздавлюванням при $\psi_{\omega} = 0.55 \dots 0.65$ та тонкого – стиранням при $\psi_{\omega} = 0.3 \dots 0.4$. Встановлений ефект пояснюється виявленою активізацією взаємодій: ударної – при швидкохідному, стискаючій – при середньоходовому та зсувній – при тихохідному обертанні.

Встановлені закономірності дозволяють прогнозувати раціональні технологічні параметри енергоощадних процесів багатостадійного подрібнення в барабанних млинах.

Ключові слова: барабанний млин, внутрішньокамерне завантаження, подрібнення ударом, роздавлюванням та стиранням, енергетична ефективність.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343387

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС У ТОЧКОВІЙ ФОРМІ СПОСОБУ ГРАФІЧНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ПЛОСКОЇ КРИВОЇ ЛІНІЇ (с. 54–63)

В. М. Верещага, К. Ю. Лисенко, Є. О. Адоньєв, Е. Г. Муртазієв, І. В. Верещага, Т. М. Воліна

Об'єктом дослідження є графічне диференціювання, зокрема – метод хорд, як один із варіантів графічного диференціювання щодо заміни графічних операцій на аналітичні у точковій формі.

Визначення точки відліку і центру проектування для побудови смуги дифпроекції корелюють її положення щодо значень похідної функції, яка графічно подається дискретним рядом точок. Точка відліку, права дифпроекція першої та ліва дифпроекція другої точок мають однакові значення у полі похідних. Однак вони не збігаються зі значеннями похідних вихідних функцій. Для встановлення такої відповідності різниці між лівою і правою дифпроекціями першої точки ділять навпіл та віднімають від першої похідної вихідної функції – точкового поліному.

Відносно точки відліку, паралельно першій ланці супровідної ламаної лінії дискретно поданої кривої проводиться пряма, що перетинає вісь абсцис в центрі проектування. Знаходження точки відліку та центру проектування здійснюється аналітично у точковій формі без будь-яких графічних операцій. Із центру проектування проводяться промені, паралельні одній із ланок супровідної ламаної лінії, утворюючи таким чином смугу дифпроекцій, всередині якої обираються значення кутів нахилів дотичних до кривої в базисних точках. Дискретні значення похідних з'єднуються відтинками прямих або залишаються окремими точками. Отримані значення похідних збігаються з аналітичними значеннями з відхиленням не більше 0,5–1,5 одиниць. Розроблені алгоритми можуть бути інтегровані в системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу для ефективного обчислення похідних дискретно заданих кривих. Крім того, вони можуть слугувати основою для створення обчислювально-продуктивних модулів у системах штучного інтелекту та цифрової обробки даних, що працюють з геометричними та дискретними масивами інформації.

Ключові слова: точковий поліном, смуга дифпроекцій, апроксимація, аналітизація методу хорд, аналітизація креслеників.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.343193

СПОСІБ АПРОКСИМАЦІЇ ТРУБЧАСТОЇ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ СМУГАМИ ТОРСІВ (с. 64–70)

А. В. Несвідомін, С. Ф. Пилипака, В. М. Несвідомін, В. М. Бабка, О. В. Шоман, О. Ю. Савойський, Т. С. Пилипака, М. М. Лохоня, С. Л. Семірненко, Я. О. Бородай

Об'єктом дослідження є апроксимація нерозгортної гвинтової трубчастої поверхні смугами розгортних поверхонь (торсів) та побудова розгортки цих смуг. Апроксимація нерозгортних трубчастих поверхонь відсіками розгортних є поширеною практикою в конструюванні різного роду трубопроводів. Наочним прикладом такої апроксимації є спортивний м'яч, зовнішня оболонка якого складається із певної кількості окремих елементів. Ці елементи повинні найщільніше прилягати до нерозгортної поверхні вздовж певних її ліній. Такими лініями є лінії кривини. Проблема полягає в тому, щоб знайти ці лінії на поверхні з наступним аналітичним описом смуги торса, яка є дотичною до нерозгортної поверхні вздовж цієї лінії.

Як відомо, на поверхнях є дві сім'ї взаємно перпендикулярних ліній кривини. В статті вибрано таку сім'ю ліній кривини, яка має переваги перед другою в сенсі апроксимації. Цим пояснюються отримані результати. Особливості отриманих результатів полягають в тому, що для знаходження потрібної сім'ї ліній кривини необхідно розв'язувати диференціальне рівняння. Розв'язок цього рівняння було запозичено авторами у науковій статті і використано для подальших розрахунків. Здійснено візуалізацію отриманих результатів у вигляді апроксимованої трубчастої поверхні чотирьома і шістьома смугами. Побудовано розгортки цих смуг для трубчастої поверхні, у якій лінією центрів є гвинтова лінія $r = 1$. Всі розміри задані в лінійних одиницях. Замість твірного кола вона задана радіусом циліндра $a = 2$, на якому вона розташована, і гвинтовим параметром $b = 1,5$ (кроком $H = 9,4$). Радіус твірного кола трубчастої поверхні вихідної трубчастої поверхні в апроксимованій поверхні у наведених прикладах є багатокутник (квадрат або рівносторонній шестикутник).

Ключові слова: лінія кривини, дотична смуга, геодезична кривина, розгортна поверхня, чисельне інтегрування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.347454

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСО-ПЕРЕНОСУ У ГОЛОВНОМУ ОБТІЧНИКУ РАКЕТИ-НОСІЯ НА ЕТАПІ ПЕРЕДСТАРТОВОЇ ПІДГОТОВКИ (с. 71–79)

М. М. Біляєв, В. В. Біляєва, Т. І. Русакова, В. А. Козачина, П. В. Семененко, О. В. Берлов, П. С. Кіріченко, Н. С. Грудкіна, Ю. В. Войтенко, О. В. Долженкова

Об'єктом дослідження є послідовне та неперервне формування теплових полів в головному обтічнику ракети-носія при використанні захисних екранів. При термостатуванні необхідно спрогнозувати ризик перегріву корпусу корисного навантаження та при необхідності здійснити заходи по зниженню температури біля корисного навантаження. Інженерним рішенням такої задачі може бути знайдено у використанні захисних екранів різної конфігурації в середині головного обтічника. Ці екрани зменшують тепловий потік від нагрітої зовнішньої стінки обтічника до поверхні корисного навантаження. Але відсутні нормативні методи розв'язку цієї задачі. Для оцінювання ефективності даного захисту побудована чисельна модель на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Моделюючи рівняння включають в себе рівняння енергії та рівняння руху нев'язкого газу. За допомогою розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент, що підтвердив ефективність використання захисних екранів для захисту корпусу корисного навантаження від надлишкового нагріву. Витрати комп'ютерного часу на проведення обчислювального експерименту дорівнюють 3 секунди. Це дає можливість проводити значну кількість розрахунків протягом робочого дня. Запропонований простий технічний засіб захисту корисного навантаження від надлишкового нагріву може використовуватися при створенні нових зразків ракетної техніки. Використання цих екранів дещо зменшує потребу використання великих об'ємів чистого повітря. Розроблена чисельна модель може бути використана в спеціалізованих організаціях на етапі проектування «фор-ескіз». Чисельні експерименти показали, що використання захисних екранів в середині головного обтічника дає можливість отримати температуру на $2-4^{\circ}\text{C}$ нижче, ніж максимально допустима температура біля корисного навантаження.

Ключові слова: теплове забруднення, захисний екран, чисельна модель, обчислювальний експеримент, головний обтічник.