

## ABSTRACT AND REFERENCES

## APPLIED MECHANICS

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237954**  
**DEVELOPMENT METHODOLOGY OF DETERMINATING RESIDUAL CARRYING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH DAMAGES TENSILE REINFORCEMENT WHICH OCCURRED DURING LOADING (p. 6–17)**

**Pavlo Vegera**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3437-1825>

**Rostyslav Vashkevych**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9962-7580>

**Yaroslav Blikharsky**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3374-9195>

**Roman Khmil**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7578-8750>

This paper reports the improved and verified procedure for calculating reinforced concrete beams affected by damage to stretched reinforcement when loaded. The main results from testing the reinforced concrete beams with damage in the stretched zone in the form of one hole in the reinforcement in the middle of the beam are given. The variable parameter of the study was the level of load resulting in the damage. It acquired values of 0, 30 %, 50 %, 70 % of the bearing capacity of control undamaged samples. Overall, the results of testing 12 samples are given. A new procedure has been proposed for taking into consideration changes in the mechanical characteristics of stretched reinforcement arising from its damage. This makes it possible to more accurately establish the bearing capacity of reinforced concrete bended elements affected by damage to their reinforcement during operation. The analysis of the calculation, compared with experimental quantities, led to a conclusion that the strain model could determine when the bearing capacity of reinforced concrete beams without damage and with damage to working reinforcement is exhausted. Based on the improved algorithm, the principle of using a strain model was proposed to establish when the bearing capacity of damaged samples, taking into consideration the effect of the load level, is exhausted. The theoretical estimation, considering when the bearing capacity is exhausted, showed results that are 3...21 % less than the experimental values, which ensures reliability of calculation of such structures. The proposed calculation provides a new approach to determining the bearing capacity of reinforced concrete beams damaged during operation. That, in turn, makes it possible to more accurately determine the residual bearing capacity of structures and increases the safety of their operation.

**Keywords:** reinforced concrete beam, damaged reinforcement, strain model, calculation of bended elements, when loaded.

#### References

- Bobalo, T., Blikharsky, Y., Kopyika, N., Volynets, M. (2020). Influence of the Percentage of Reinforcement on the Compressive Forces Loss in Pre-stressed RC Beams Strengthened with a Package of Steel Bars. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 53–62. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7)
- Vatulia, G., Berestianskaya, S., Opanasenko, E., Berestianskaya, A. (2017). Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. *MATEC Web of Conferences*, 107, 00044. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700044>
- Blikharsky, Z., Vegera, P., Vashkevych, R., Shnal, T. (2018). Fracture toughness of RC beams on the shear, strengthening by FRCM system. *MATEC Web of Conferences*, 183, 02009. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818302009>
- Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
- Bambura, A. M., Dorogova, O. V., Sazonova, I. R., Bogdan, V. M. (2018). Calculations of the eccentriccompressed slender reinforced concrete members applying an «effective» curvature method. *Nauka ta budivnytstvo*, 3 (17), 10–20.
- Pavlikov, A., Kochkarev, D., Harkava, O. (2019). Calculation of reinforced concrete members strength by new concept. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures*. Kraków, 820–827.
- Khmil, Ye. R., Tytarenko, Yu. R., Blikharsky, Y. Z., Vegera, P. I. (2021). Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012014>
- Blikharsky, Z., Vegera, P., Vashkevych, R., Khmil, R. (2020). Improvement Method of Calculation Reinforced Concrete Beams on the Shear Strengthened FRCM System. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*, 2 (1), 215–222. doi: <https://doi.org/10.2478/czoto-2020-0026>
- Khmil, R., Tytarenko, R., Blikharsky, Y., Vegera, P. (2020). The Probabilistic Calculation Model of RC Beams, Strengthened by RC Jacket. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 182–191. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_23)
- Kovalchuk, B., Blikharsky, Y., Selejdak, J., Blikharsky, Z. (2020). Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened Under Loading with Additional Reinforcement with Different Levels of its Pre-tension. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 227–236. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_28)
- Koteš, P., Vavruš, M., Jošt, J., Prokop, J. (2020). Strengthening of Concrete Column by Using the Wrapper Layer of Fibre Reinforced Concrete. *Materials*, 13 (23), 5432. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13235432>
- Klymenko, Y., Kos, Z., Grynyova, I., Maksiuta, O. (2020). Operation of Damaged H-Shaped Columns. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 192–201. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_24)
- Koteš, P., Strieška, M., Brodňan, M. (2018). Long-time measurements of reinforcement due to air pollution corrosion on reinforced girder bridge. *18th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM2018, Energy and Clean Technologies*, 18 (4.2), 515–522. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/4.2/s19.067>
- Blikharsky, Y., Kopyika, N., Selejdak, J. (2020). Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements' reliability. *Production Engineering Archives*, 26 (2), 67–72. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14>
- Lipiński, T. (2017). Roughness of 1.0721 steel after corrosion tests in 20 % NaCl. *Production Engineering Archives*, 15 (15), 27–30. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2017.15.07>
- Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Aziz, A. R., Rasheeduzzafar (1996). Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Con-*

- struction and Building Materials, 10 (2), 123–129. doi: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00077-1)
17. Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J., Diez, J. M. (1998). Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, 31 (7), 435–441. doi: <https://doi.org/10.1007/bf02480466>
  18. Capozucca, R. (1995). Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 9 (5), 295–303. doi: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00033-c](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00033-c)
  19. Zhang, W., François, R., Yu, L. (2020). Influence of load-induced cracks coupled or not with top-casting-induced defects on the corrosion of the longitudinal tensile reinforcement of naturally corroded beams exposed to chloride environment under sustained loading. *Cement and Concrete Research*, 129, 105972. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105972>
  20. Chen, F., Jin, Z., Wang, E., Wang, L., Jiang, Y., Guo, P. et. al. (2021). Relationship model between surface strain of concrete and expansion force of reinforcement rust. *Scientific Reports*, 11 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83376-w>
  21. Cao, J., Liu, L., Zhao, S. (2020). Relationship between Corrosion of Reinforcement and Surface Cracking Width in Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–14. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/7936861>
  22. Raupach, M. (2020). Results From Laboratory Tests and Evaluation of Literature on the Influence of Temperature on Reinforcement Corrosion. *Corrosion of Reinforcement in Concrete – Monitoring, Prevention and Rehabilitation*, 9–20. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003076957-2>
  23. Luo, G., Zhang, K., Zhu, W., Chen, T., Yang, X., Yang, S., Xu, Y. (2021). Effect of non-uniform corrosion on the cracking propagation of the RC specimens. *Construction and Building Materials*, 270, 121460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121460>
  24. Ahmadi, M., Kheyroddin, A., Kioumars, M. (2021). Prediction models for bond strength of steel reinforcement with consideration of corrosion. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5829–5834. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.263>
  25. Yuksel, I., Sakcali, G. B. (2021). Effects of reinforcement corrosion on reinforced concrete buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00111>
  26. Naveen Kumar, V., Daniel Ronald Joseph, J., Ashok, M., Suresh Kumar, M. (2020). An experimental study on assessing the corrosion performance of steel reinforcement for the durability of concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 989, 012025. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/989/1/012025>
  27. Huang, L., Ye, H., Jin, X., Jin, N., Xu, Z. (2020). Corrosion-induced shear performance degradation of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 248, 118668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118668>
  28. Chen, H.-P., Nepal, J. (2020). Load bearing capacity reduction of concrete structures due to reinforcement corrosion. *Structural Engineering and Mechanics*, 75 (4), 455–464. doi: <https://doi.org/10.12989/sem.2020.75.4.455>
  29. Lobodanov, M., Vegera, P., Khmil, R., Blikharsky, Z. (2020). Influence of Damages in the Compressed Zone on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 260–267. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_32)
  30. Selejda, J., Urbański, M., Winiarski, M. (2018). Assessment of a steel bridge corrosion degree. *E3S Web of Conferences*, 49, 00098. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900098>
  31. Sun, B., Xiao, R., Ruan, W., Wang, P. (2020). Corrosion-induced cracking fragility of RC bridge with improved concrete carbonation and steel reinforcement corrosion models. *Engineering Structures*, 208, 110313. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110313>
  32. Belletti, B., Vecchi, F., Bandini, C., Andrade, C., Montero, J. S. (2020). Numerical evaluation of the corrosion effects in prestressed concrete beams without shear reinforcement. *Structural Concrete*, 21 (5), 1794–1809. doi: <https://doi.org/10.1002/suco.201900283>
  33. Kos, Ž., Klimenko, Y. (2019). The development of prediction model for failure force of damaged reinforced-concrete slender columns. *Tehnički vjesnik*, 26 (6), 1635–1641. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20181219093612>
  34. Kotes, P., Strieska, M., Brodnan, M. (2018). Sensitive analysis of calculation of corrosion rate according to standard approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 385, 012031. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/385/1/012031>
  35. Turchyn, B. R., Blikharsky, Z. Z., Vegera, P. I., Shnal, T. M. (2017). Research methodology of reinforced concrete beams with damage obtained under loading. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika»*. Seriya: Teoriya i praktyka budivnytstva, 877, 212–217.
  36. SNiP 2.03.01-84\*. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii* (1989). Moscow: TSITP Gosstroy SSSR, 80. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854677.pdf>
  37. DBN V.2.6-98:2009. *Konstruksiyi budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksiyi. Osnovni polozhennia* (2011). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 71. Available at: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/110.1.%20%D0%94%D0%91%D0%9D%20%D0%92.2.6-98-2009.%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97%20%D0%B1%D1%83%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D1%96%D0%B2%20%D1%96%20%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4.pdf>
  38. EN 1990:2002. *Eurocode – Basis of structural design* (2002). Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 87.
  39. DSTU B V.2.6-156:2010. *Structures of buildings end erections. Concrete and reinforced concrete sructures with heavy weight structuralconcrete. Design rules* (2011). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 118. Available at: <https://dwg.ru/dnl/9603>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237157

## JUSTIFICATION OF THE USE OF SQUARE PIPES IN THE FRAME OF THE REMOVABLE ROOF OF THE OPEN WAGON (p. 18–25)

Oleksij Fomin

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Alyona Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

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

This paper reports determining the basic strength indicators for the removable roof of a railroad gondola. It has been established that the typical roof design has a significant margin of safety in the components of the supporting structure. In order to reduce the roof material intensity, the reserves of its strength have been determined and optimized based on the criterion for minimal material intensity. Pipes of square cross-section have been proposed for using as the components of the roof frame.

When taking into consideration the proposed measures, it becomes possible to reduce the mass of the frame of the removable roof for a railroad gondola by almost 15 % compared to the typical design. At the same time, to apply the roof on different types of gondolas, its cantilevered parts can move in a longitudinal plane. It is possible to use deflectors on the removable roof. The roof can be attached to the body in a regular way. It is also possible to fix it using shog-connections.

To substantiate the proposed solution, the strength of the improved structure of the removable roof was determined. It was established that the maximum equivalent stresses in the load-bearing structure of the removable roof did not exceed permissible ones. To define the indicators of removable roof dynamics, its dynamic loading was investigated. The calculation was performed in a flat coordinate system. The oscillations in bouncing and galloping were taken into consideration as the most common types of a railroad car oscillations when running on a rail track. The mathematical model of dynamic loading was solved in the Mathcad software package (Boston, USA). The study has shown that the acceleration of the body in the center of masses is 0.4 g and is within the permissible limits. At the same time, the ride of a railroad car is excellent.

The study reported here would contribute to the improvement of the efficiency of railroad transportation.

**Keywords:** transport mechanics, railroad gondola, removable roof, roof strength, stressed state, dynamic load.

### References

- Vagony s raskryvayuscheysha kryshey. Available at: <http://scale-trainsclub.com/board/viewtopic.php?t=1916>
- Reidemeister, A., Muradian, L., Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Kyryl'chuk, O., Kalashnyk, V. (2020). Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 985, 012034. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012034>
- Antipin, D. Y., Racin, D. Y., Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. Procedia Engineering, 150, 150–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>
- Štastniak, P., Moravčík, M., Smetanka, L. (2019). Investigation of strength conditions of the new wagon prototype type Zans. MATEC Web of Conferences, 254, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925402037>
- Slavchev, S., Stoilov, V., Purgic, S. (2015). Static strength analysis of the body of a wagon, series Zans. Journal of the Balkan Tribological Association, 21 (1), 49–57. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATIC-STRENGTH-ANALYSIS-OF-THE-BODY-OF-A-WAGON%2C-Stoilov-Purgi%2C%27633c5cf68afd73c979ef9a2c4f505deb600988c>
- Plączek, M., Wróbel, A., Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 161, 012107. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012107>
- Harak, S. S., Sharma, S. C., Harsha, S. P. (2014). Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. Procedia Materials Science, 6, 1891–1898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221>
- Kiril'chuk, O. A., Shatunova, D. A. (2016). Issledovanie prochnosti konstruktsii semnoy kryshi dlya poluvagonov. Vagonnyy park, 5-6 (110-111), 50–53. Available at: <http://eadnurt.dit.edu.ua/jspui/handle/123456789/9413>
- Fomin, O., Lovska, A. (2020). Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. Engineering Science and Technology, an International Journal, 23 (6), 1455–1465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>
- Fomin, O. V., Lovska, A. O., Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P. (2017). The influence of implementation of circular pipes in load-bearing structures of bodies of freight cars on their physico-mechanical properties. Scientific Bulletin of National Mining University, 6, 89–96. Available at: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP\\_meta&C21COM=S&2\\_S21P03=FILA=&2\\_S21STR=Nvngu\\_2017\\_6\\_15](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Nvngu_2017_6_15)
- DSTU 7598:2014. Freight Wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) (2015). Kyiv.
- GOST 33211-2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities (2016). Moscow.
- Fomin, O., Lovska, A., Masliyev, V., Tsybaliuk, A., Burlutski, O. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (7 (97)), 33–40. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154282>
- Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. Metallurgical and Mining Industry, 1, 49–54. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Peculiarities-of-computer-modeling-of-strength-of-Lovska/b86e05254031bcd026118d57f8504a58686d9905>
- Bychkov, A. S., Kondratiev, A. V. (2019). Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings. Journal of Superhard Materials, 41 (1), 53–59. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063457619010088>
- Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., Tsaritsynskyi, A. (2020). New Possibilities of Creating the Efficient Dimensionally Stable Composite Honeycomb Structures for Space Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, 45–59. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5)
- Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
- Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. MATEC Web of Conferences, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>
- Semenov, V. S., Karimova, R. H. (2008). Raschet i konstruirovaniye soedineniy stal'nykh stroitel'nykh konstruksiy. Bishkek: KRSU, 80.
- Domin, Yu. V., Cherniak, H. Yu. (2003). Osnovy dynamiki vahoniv. Kyiv: KUETT, 269.
- Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Sapronova, S., Lack, T., Kravchenko, K. (2019). Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 21 (2), 24–31. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.24-31>
- Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., Gorobchenko, O. (2020). Mathematical modeling of an induction motor for vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (2 (104)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>
- Kliuiev, S. (2018). Experimental study of the method of locomotive wheelrail angle of attack control using acoustic emission. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (9 (92)), 69–75. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122131>
- Klimenko, I., Kalivoda, J., Neduzha, L. (2020). Influence of Parameters of Electric Locomotive on its Critical Speed. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure, 531–540. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_56)
- Fomin, O., Lovska, A., Pištěk, V., Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. Vibroengineering PROCEDIA, 29, 124–129. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>
- Vatulia, G., Lobiak, A., Chernogil, V., Novikova, M. (2019). Simulation of Performance of CFST Elements Containing Differentiated

Profile Tubes Filled with Reinforced Concrete. Materials Science Forum, 968, 281–287. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.281>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238440**  
**PROCEDURE FOR DETERMINING THE THERMOELASTIC STATE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE BEAM STRENGTHENED WITH METHYL METHACRYLATE (p. 26–33)**

**Vitalii Kovalchuk**

Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

**Yuliya Sobolevska**

Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8087-2014>

**Artur Onyshchenko**

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

**Olexandr Fedorenko**

Kyivavtodor Municipal Corporation, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3464-597X>

**Oleksandr Tokin**

National Transport University, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7353-4228>

**Andrii Pavliv**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6149-2972>

**Ivan Kravets**

Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2239-849X>

**Julia Lesiv**

Lviv Branch of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2732-100X>

This paper reports the analysis of methods for determining temperature stresses and deformations in bridge structures under the influence of climatic temperature changes in the environment.

A one-dimensional model has been applied to determine the temperature field and thermoelastic state in order to practically estimate the temperature fields and stresses of strengthened beams taking into consideration temperature changes in the environment.

The temperature field distribution has been determined in the vertical direction of a reinforced concrete beam depending on the thickness of the structural reinforcement with methyl methacrylate. It was established that there is a change in the temperature gradient in a contact between the reinforced concrete beam and reinforcement.

The distribution of temperature stresses in the vertical direction of a strengthened reinforced concrete beam has been defined, taking into consideration the thickness of the reinforcement with methyl methacrylate and the value of its elasticity module. It was established that the thickness of the reinforcement does not have a significant impact on increasing stresses while increasing the elasticity module of the structural reinforcement leads to an increase in temperature stresses. The difference in the derived stress values for a beam with methyl methacrylate reinforcement with a thickness of 10 mm and 20 mm, at elasticity module  $E=15,000$  MPa, is up to 3 % at positive and negative temperatures.

It has been found that there is a change in the nature of the distribution of temperature stresses across the height of the beam at the contact surface of the reinforced concrete beam and methyl methacrylate reinforcement. The value of temperature stresses in the beam with methyl methacrylate reinforcement and exposed to the positive and negative ambient temperatures increases by three times.

It was established that the value of temperature stresses is affected by a difference in the temperature of the reinforced concrete beam and reinforcement, as well as the physical and mechanical parameters of the investigated structural materials of the beam and the structural reinforcement with methyl methacrylate.

**Keywords:** bridge reinforcement, reinforced concrete beam, methyl methacrylate reinforcement, temperature field.

## References

- Mist cherez r. Zakhidnyi Buh na dorozh N-17: shcho vzhe зроблено dlia vidnovlennia rukhu. Available at: [https://ukravtodor.gov.ua/press/news/mist\\_cherez\\_r\\_zakhidnyi\\_buh\\_na\\_dorozh\\_n-17\\_\\_shcho\\_vzhe\\_zrobleno\\_dlia\\_vidnovlennia\\_rukhu.html](https://ukravtodor.gov.ua/press/news/mist_cherez_r_zakhidnyi_buh_na_dorozh_n-17__shcho_vzhe_zrobleno_dlia_vidnovlennia_rukhu.html)
- Usilenie stroitel'nykh konstruksiy nizkovyazkimi polimerami na osnove metilmetakrilata. Available at: <https://injectir.ru/usilenie-konstrukciy>
- Gera, B., Kovalchuk, V. (2019). A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (99)), 26–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260>
- De Backer, H., Outtier, A., Van Bogaert, P. (2009). Numerical and experimental assessment of thermal stresses in steel box girders. Nordic Steel Construction Conference, 11th, Proceedings, 65–72.
- Burdet, O. L. (2010) Thermal Effects in the Long-Term Monitoring of Bridges. Large structures and Infrastructures for environmentally constrained and Urbanised areas. 34th International symposium on bridge and structural engineering, Venice. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/163104>
- Xia, Y., Chen, B., Zhou, X., Xu, Y. (2012). Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior. Structural Control and Health Monitoring, 20 (4), 560–575. doi: <https://doi.org/10.1002/stc.515>
- Yan, Y., Wu, D., Li, Q. (2018). A three-dimensional method for the simulation of temperature fields induced by solar radiation. Advances in Structural Engineering, 22 (3), 567–580. doi: <https://doi.org/10.1177/1369433218795254>
- Mussa, F. I., Abid, S. R., Taysi, N. (2021). Design Temperatures for Composite Concrete-Steel Girders: A-Verification of the Finite Element Model. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1090 (1), 012108. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1090/1/012108>
- Peng, G., Nakamura, S., Zhu, X., Wu, Q., Wang, H. (2017). An experimental and numerical study on temperature gradient and thermal stress of CFST truss girders under solar radiation. Computers and Concrete, 20 (5), 605–616. doi: <https://doi.org/10.12989/cac.2017.20.5.605>
- Sanio, D., Mark, P., Ahrens, M. A. (2017). Temperaturfeldberechnung für Brücken. Beton- Und Stahlbetonbau, 112 (2), 85–95. doi: <https://doi.org/10.1002/best.201600068>
- Wang, G., Zhou, X., Ding, Y., Liu, X. (2021). Long-Term Monitoring of Temperature Differences in a Steel Truss Bridge with Two-Layer Decks Compared with Bridge Codes: Case Study. Journal of Bridge Engineering, 26 (3), 05020013. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001681](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001681)
- Berg, M., Trouillet, P. (1988). Ouvrages d'art-actions et sollicitations thermiques. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 155.
- Solodkyi, S. Y., Vaskiv, N. O. (2009). Temperaturno-volohisni umovy ekspluatatsiyi yak chynnyk vplyvu na trishchynostiykist betonu.

Mekhanika i fizyka ruinuвання будівельних матеріалів та конструкцій, 8, 278–288.

14. Dilger, W. H., Ghali, A., Chan, M., Cheung, M. S., Maes, M. A. (1983). Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 109 (6), 1460–1478. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1983\)109:6\(1460\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1983)109:6(1460))
15. Prakash Rao, D. S. (1986). Temperature Distributions and Stresses in Concrete Bridges. *Journal Proceedings*, 83 (4), 588–596.
16. Lange, D. A., Roesler, J. R., D'Ambrosia, M., Grasley, Z. C., Lee, C. J., Cowen, D. R. (2003). High Performance Concrete For Transportation Structures. *Civil Engineering Studies*. Available at: <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/46278>
17. Balmes, E., Corus, M., Siegert, D. (2006). Modeling thermal effects on bridge dynamic responses. In *Proceedings of the 24th international modal analysis conference (IMAC-XXIV)*.
18. Kovalchuk, V., Onyshchenko, A., Fedorenko, O., Habrel, M., Parmeta, B., Voznyak, O. et. al. (2021). A comprehensive procedure for estimating the stressed-strained state of a reinforced concrete bridge under the action of variable environmental temperatures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (110)), 23–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228960>
19. Kovalchuk, V., Hnativ, Y., Luchko, J., Sysyn, M. (2020). Study of the temperature field and the thermo-elastic state of the multilayer soil-steel structure. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 19 (1), 65–78. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.004>
20. Luchko, J., Hnativ, Yu., Kovalchuk, V. (2013). Temperature field and stressed state of composite bridge sp an investigation. *Visnyk ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2, 29–38.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239066

#### REVEALING DEFORMATION OF SEGMENTS AND THEIR SUPPORTS IN A HYDROSTATIC SEGMENTAL BEARING (p. 33–40)

Vladimir Nazin

National Aerospace University  
«Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1078-1969>

At present, there are theoretical and experimental studies of such bearings without taking into account the elastic deformation of the bearing segments. The rotor bearings of powerful turbines at nuclear power plants are subjected to loads as high as tens of tons. One of the important issues in designing segmental bearings operating under these conditions consists in taking into account elastic deformations of the segments. A schematic diagram of a segmental hydrostatic bearing was presented and the principle of its operation was described. When determining the deformation of spherical support, a formula of change in volume of a solid steel ball subjected to uniform pressure was applied.

To determine the segment deformation in the axial direction, differential equation of bending of the strip beam as the initial one. The basic equation of deformation of rods with a curved axis acting in the plane of curvature was taken as a starting point of determining the segment deformation in the circumferential direction.

It was found in the studies that the maximum deformation of the segment is 4.5 % of radial clearance at a feed pressure of 5 MPa and can affect the bearing characteristics. A substantially nonlinear character of deformations along the segment axis was revealed. It was found that the pressure of the working fluid significantly affects the segment thickness. With an increase in feeding pressure from 1 MPa to 10 MPa, the thickness of the steel segment increased more than 2 times and the thickness of the bronze segment increased more than 3 times. It was established that the pressure of the working

fluid exceeding 10 MPa substantially affects the deformation of the spherical support and the bearing clearance.

The study results will make it possible to determine more accurately the main characteristics of the segmental bearing and design it more efficiently.

**Keywords:** segmental bearing, segment deformation, bearing characteristics, differential equation, calculation results.

#### References

1. Hu, Z., Wang, Z., Huang, W., Wang, X. (2019). Supporting and friction properties of magnetic fluids bearings. *Tribology International*, 130, 334–338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.006>
2. Xu, H., Yang, J., Gao, L., An, Q. (2020). The influences of bump foil structure parameters on the static and dynamic characteristics of bump-type gas foil bearings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234 (10), 1642–1657. doi: <https://doi.org/10.1177/1350650120912609>
3. Koosha, R., San Andrés, L. (2020). A Computational Model for the Analysis of the Static Forced Performance of Self-Equalizing Tilting Pad Thrust Bearings. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142 (10). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4048458>
4. Xiang, G., Han, Y., He, T., Wang, J., Xiao, K., Li, J. (2020). Wear and fluid-solid-thermal transient coupled model for journal bearings. *Applied Mathematical Modelling*, 85, 19–45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.03.037>
5. Santos, I. (2018). Controllable Sliding Bearings and Controllable Lubrication Principles – An Overview. *Lubricants*, 6 (1), 16. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants6010016>
6. EL-Said, A. K., EL-Souhily, B. M., Crosby, W. A., EL-Gamal, H. A. (2017). The performance and stability of three-lobe journal bearing textured with micro protrusions. *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4), 423–432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.003>
7. Summer, F., Bergmann, P., Grün, F. (2017). Damage Equivalent Test Methodologies as Design Elements for Journal Bearing Systems. *Lubricants*, 5 (4), 47. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants5040047>
8. Zernin, M. V., Mishin, A. V., Rybkin, N. N., Shil'ko, S. V., Ryabchenko, T. V. (2017). Consideration of the multizone hydrodynamic friction, the misalignment of axes, and the contact compliance of a shaft and a bush of sliding bearings. *Journal of Friction and Wear*, 38 (3), 242–251. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366617030163>
9. Zhang, J., Tan, A., Spikes, H. (2016). Effect of Base Oil Structure on Elastohydrodynamic Friction. *Tribology Letters*, 65 (1). doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0791-7>
10. Villaverde, R. (2016). Base isolation with sliding hydromagnetic bearings: concept and feasibility study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13 (6), 709–721. doi: <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1187634>
11. Polyakov, R., Savin, L., Fetisov, A. (2018). Analysis of the conditions for the occurrence of the effect of a minimum of friction in hybrid bearings based on the load separation principle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 233 (2), 271–280. doi: <https://doi.org/10.1177/1350650118777143>
12. Schüller, E., Berner, O. (2021). Improvement of Tilting-Pad Journal Bearing Operating Characteristics by Application of Eddy Grooves. *Lubricants*, 9 (2), 18. doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants9020018>
13. Kukla, S., Buchhorn, N., Bender, B. (2016). Design of an axially concave pad profile for a large turbine tilting-pad bearing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231 (4), 479–488. doi: <https://doi.org/10.1177/1350650115592919>
14. Artemenko, N. P., Nazin, V. I. (1982). Raschet karakteristik mnogosegmentnykh gidrostaticheskikh podshipnikov s tochechnymi

kamerami. Issledovanie gidrostaticheskikh opor i uplotneniy dvigateley letatel'nyh apparatov, 1, 12–22.

15. Timoshenko, S. P. (1972). Kurs teorii uprugosti. Kyiv: Naukova dumka, 832.
16. Korn, G., Korn, T. (1974). Spravochnik po matematike. Moscow: Nauka, 832.
17. Timoshenko, S. P., Lessel's, Dzh. (1931). Prikladnaya teoriya uprugosti. Leningrad: Gostekhizdat, 394.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239292

**DETERMIANTION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF MATERIAL DESTRUCTION IN THE CRUSHING CHAMBER OF THE VIBRATION CRUSHER (p. 41–49)**

**Ivan Nazarenko**

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>

**Yevhen Mishchuk**

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>

**Dmitry Mishchuk**

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>

**Mykola Ruchynskiy**

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9362-292X>

**Ivan Rogovskii**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6957-1616>

**Liudmyla Mikhailova**

State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilsky, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3419-5446>

**Liudmyla Titova**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7313-1253>

**Mykola Berezovyi**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-9787>

**Ruslan Shatrov**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3596-0146>

The crushing equipment is characterized by a significant energy-consuming system during the crushing workflow. The current trend in the development of such processes puts forward requirements for the development of new or improvement of existing energy-saving equipment. The essence of the solution to the problem in this work is determined by using resonant modes, which are inherently the most effective. The practical implementation of the resonance mode has been achieved taking into account the conditions for the interaction of the resonant vibration crusher with the material at the stages of its destruction. The degree of the

stress-strain state of the material is taken into account, which was a prerequisite for identifying the potential for the development of a vibration load. Composed equations of motion based on a substantiated discrete-continuous model of a vibration crusher and processing material. An approach is applied to determine the stepwise destruction of the material with the determination of the required degree of energy. This methodological approach made it possible to reveal the nature of the process of material destruction, where energy costs at the stages of crack formation, their development and final destruction are taken into account. It was revealed that the greatest energy consumption during the operation of crushers goes into the kinetic energy of the crushing plates and the potential energy of deformation of the springs. The proposed model is common for any design of a vibration machine and its operating modes. The stable resonance mode has made it possible to significantly reduce the energy consumption for the course of the technological process of material grinding. The results obtained are used to improve the calculation methods for vibratory jaw and cone crushers that implement the corresponding energy-saving stable zones of the working process.

**Keywords:** vibration crusher, crushing chamber, resonant mode, process of destruction, energy, stress, deformation.

**References**

1. Nguyen, T. N., Kolenko, G. S. (2020). Analysis of the fracture mechanics and workability of a gas turbine blade in the presence of a crack. *Materials Science. Power Engineering*, 26 (3), 56–69. doi: <https://doi.org/10.18721/JEST.26304>
2. Terentiev, O., Streltsova, I. (2015). Energy intensity and specific surface energy of rock breaking by magnetic hydrocavitation stressing. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnyctvo»*, 28, 29–35.
3. Vasiliev, L. M., Vasiliev, D. L., Malich, M. G. (2021). Modeling the process of disintegration of solid materials by asymmetric loading in crushing machines in order to find ways to reduce energy costs. *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions*, 457–473. doi: <https://doi.org/10.31713/m1028>
4. Hong, S. J., Yang, H. J. (2019). A Study on the Impact Load Quantification of the Jaw Crusher. *Journal of Drive and Control*, 16 (2), 1–7. doi: <https://doi.org/10.7839/KSFC.2019.16.2.001>
5. Pothina, R., Keckojevic, V., Klima, M. S., Komljenovic, D. (2007). Gyrotory crusher model and impact parameters related to energy consumption. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 24 (3), 170–180. doi: <https://doi.org/10.1007/bf03403212>
6. Sokur, M., Biletskyi, V., Sokur, L., Bozhyk, D., Sokur, I. (2016). Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (81)), 34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71983>
7. Fladvad, M., Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>
8. Lapin, R., Kuzkin, V. (2019). Calculation of the normal and shear compliances of a three-dimensional crack taking into account the contact between the crack surfaces. *Letters on Materials*, 9 (2), 234–238. doi: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-2-234-238>
9. Zou, J., Han, J., Yang, W. (2020). Investigating the Influences of Indentation Hardness and Brittleness of Rock-Like Material on Its Mechanical Crushing Behaviors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–16. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/4713532>
10. Beloglazov, I. I., Yusupov, G. A., Stepanyan, A. S., Feoktistov, A. Y. (2018). Disintegration process modeling for a jaw crusher with complex jaws swing. *Obogashchenie Rud*, 2, 3–8. doi: <https://doi.org/10.17580/or.2018.02.01>
11. Gorobets, L. J., Fedoskina, E. V., Verhorobina, I. V. (2017). Effects of dynamic quality of ladening of geterogen material at crushing.

- Heotekhnichna mekhanika, 137, 93–106. Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/158641>
12. Nesterenko, M., Nazarenko, I., Molchanov, P. (2018). Cassette Installation with Active Working Body in the Separating Partition. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.2), 265. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14417>
  13. Berynk, I., Luhovskiy, O., Nazarenko, I. (2018). Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materiali in Tehnologije*, 52 (4), 465–468. doi: <https://doi.org/10.17222/mit.2017.021>
  14. Nazarenko, I., Dedov, O., Berynk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. et. al. (2020). Determining the regions of stability in the motion regimes and parameters of vibratory machines for different technological purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 71–79. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>
  15. Perelman, G. (2002). The entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications. arXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/pdf/math/0211159.pdf>
  16. Morgan, J. W., Tian, G. (2007). Ricci flow and the Poincare conjecture. arXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/pdf/math/0607607.pdf>
  17. Cieżkowski, P., Maciejewski, J., Bąk, S. (2017). Analysis of Energy Consumption of Crushing Processes – Comparison of One-Stage and Two-Stage Processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39 (2), 17–24. doi: <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0012>
  18. Nazarenko, I., Mishchuk, E. (2014). Research process of destruction of the material in the grinding chamber of the vibrating jaw crusher. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, 84, 55–63.
  19. Mozharovskiy, M. S. (2002). *Teoriya pruzhnosti, plastychnosti i povzuchosti*. Kyiv: Vyshcha shkola, 308.
  20. Khalilpour, S., BaniAsad, E., Dehestani, M. (2019). A review on concrete fracture energy and effective parameters. *Cement and Concrete Research*, 120, 294–321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.013>
  21. Levin, V. A., Morozov, E. M., Matvienko, Yu. G. (2004). *Izbrannye nelineynye zadachi mekhaniki razrusheniya*. Moscow: FIZMATLIT, 408.
  22. Munoz, H., Taheri, A., Chanda, E. K. (2016). Fracture Energy-Based Brittleness Index Development and Brittleness Quantification by Pre-peak Strength Parameters in Rock Uniaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (12), 4587–4606. doi: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1071-4>
  23. Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., Hulthén, E. (2017). A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Minerals Engineering*, 105, 69–78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>
  24. Liu, R., Shi, B., Li, G., Yu, H. (2018). Influence of Operating Conditions and Crushing Chamber on Energy Consumption of Cone Crusher. *Energies*, 11 (5), 1102. doi: <https://doi.org/10.3390/en11051102>
  25. Mischuk, Y., Nazarenko, I. (2019). Research of the dynamics of a vibratory jaw crusher of bilateral action. *Girnychi, Budivelni, Dorozhni Ta Meliorativni Mashini*, 94, 5–15. doi: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0101>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239159

## IMPROVEMENT OF TRAWLER HULL STRUCTURE UNDER CONDITION OF ENSURING FATIGUE STRENGTH (p. 50–59)

**Leontii Korostylov**

Admiral Makarov National University  
of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4370-3270>

**Dmytro Lytvynenko**

Admiral Makarov National University  
of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2948-8698>

**Hryhorii Sharun**

Admiral Makarov National University  
of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4646-1406>

**Ihor Davydov**

National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7745-4228>

The structure of the hull of the project 1288 trawler in a region of fore hold was improved to ensure fatigue strength of joints of the intersection of main frames with the double bottom. To this end, a study of the fatigue strength of these joints was carried out for the original side structure and two versions of its modernization.

Values of internal forces at the points of initiation of fatigue cracks in the compartment have been determined for three design versions of the side. It was found that the greatest forces act in the middle of the fore half of the compartment.

Calculations of parameters of the long-term distribution of magnitudes of ranges of total equivalent operating stresses according to the Weibull law in the points of occurrence of fatigue cracks for different design versions of the side grillage have been performed. These parameters were determined for the middle of the fore hold of the vessel and for the areas with maximum values of bending moment ranges. The calculations were performed with and without accounting of effect of corrosion.

Values of total fatigue damage and durability of the studied joints were determined. Calculations were carried out by nominal stress method, hot spot stress method, and experimental and theoretical method.

It was shown that in order to ensure fatigue strength of the joint under consideration, it is necessary to extend the intermediate frames of the original version of the side structure to the level of the tank top fixing them to the last one. It is also necessary to attach a cargo platform to the side thus reducing the frame span. As a result, the level of fatigue damage over 25 years of operation will decrease by about 3.5 times.

As it was found, approximate consideration of the slamming effect does not significantly increase the amount of fatigue damage of the joint.

The results of the development of recommendations for modernization of the side structure can be implemented both on ships of the 1288 project and on other ships with a transverse side framing system.

**Keywords:** trawler, side structure, structural joint, stress-strain state, stress concentration, fatigue strength.

## References

1. Yang, G. S., Xie, Y. H. (2012). The Fatigue Strength Assessment for Hull Structure of Steel Fishing Vessel. *Applied Mechanics and Materials*, 189, 334–339. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.189.334>
2. Blagojević, B., Domazet, Ž. (2002). Simplified procedures for fatigue assessment of ship structures. 10th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2002. Rethymnon, Crete.
3. Fatigue assessment of ship structures (1999). IACS Recommendation No. 56.
4. Glen, I. F., Dinovitzer, A., Paterson, R. B., Luznik, L., Bayley, C. (1999). *Fatigue-Resistant Detail Design Guide for Ship Structures: report SSC-405*. Washington: Ship Structure Committee.
5. Ozguc, O. (2017). Simplified fatigue analysis of structural details of an ageing LPG carrier. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 17 (1), 33–42. doi: <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1282075>
6. Wang, Y. (2010). Spectral fatigue analysis of a ship structural detail – A practical case study. *International Journal of Fatigue*, 32 (2), 310–317. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.06.020>
7. Li, Z., Ringsberg, J. W., Storhaug, G. (2013). Time-domain fatigue assessment of ship side-shell structures. *International Jour-*

- nal of Fatigue, 55, 276–290. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.07.007>
8. Jurišić, P., Parunov, J., Senjanović, I. (2007). Assessment of Aframax Tanker Hull-Girder Fatigue Strength According to New Common Structural Rules. *Brodogradnja*, 58 (3), 262–267.
  9. Hull girder fatigue strength of corroding oil tanker (2010). *Advanced Ship Design for Pollution Prevention*, 161–166. doi: <https://doi.org/10.1201/b10565-20>
  10. Garbatov, Y. (2016). Fatigue strength assessment of ship structures accounting for a coating life and corrosion degradation. *International Journal of Structural Integrity*, 7 (2). doi: <https://doi.org/10.1108/ijsi-04-2014-0017>
  11. Petinov, S. V., Afanasyeva, I. M. (2010). Fatigue Assessment of Structures in High-cycle Segment: Technique and Problems. *Advanced Problems in Mechanics-2010: Proceedings of the International Summer School-Conference APM 2010*. Saint-Petersburg, 519–525.
  12. Guchinsky, R. V., Petinov, S. V. (2013). Fatigue design of expansion joint in ship superstructure. *Proceedings of XLI International Summer School-Conference APM 2013*. Saint-Petersburg, 420–431.
  13. Lytvynenko, D. Yu. (2017). *Metodyky rozviazku zadach vtomnoi mitsnosti sudnokorpusnykh vuzliv pry nerekuljarnomu navantazhenni na bazi eksperymentalno-teoretychnoho metodu*. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, 4 (53), 110–125.
  14. *Sbornik normativno-metodicheskikh materialov. Kniga odinnadtsataya: ND No 2-139902-016 (2002)*. Sankt-Peterburg: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 151.
  15. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. 2. Korpus: ND No. 2-020101-124 (2020)*. Sankt-Peterburg: Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva, 297.
  16. *Fatigue assessment of ship structures (2015)*. Class Guideline DNVGL-CG-0129. DNV GL.
  17. Hobbacher, A. F. (2016). *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. IIW Collection. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>
  18. Niemi, E., Fricke, W., Maddox, S. J. (2018). *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components*. IIW Collection. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5568-3>
  19. Korostylev, L. I., Klimenkov, S. Yu. (2010). Otsenka ustalostnoy prochnosti svarnykh uzlov tonkostennykh konstruktiv v mnogotsiklovoy oblasti. *Metody rozviazuvannya prykladnykh zadach mekhaniky deformivnoho tverdogo tila: zb. nauk. prats Dniprovskoho natsionalnoho universytetu imeni O. Honchara*, 11 (352), 152–159.
  20. Korostylev, L. I., Litvinenko, D. Yu. (2017). Otsenka ustalostnoy prochnosti sudokorpusnykh uzlov eksperimental'no-teoreticheskim metodom s uchetchom neregulyarnosti nagruzheniya. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, 1 (50), 71–91.
  21. Korostylev, L. I. (2001). Prochnost' uzlov tonkostennykh konstruktiv sudovogo korpusa. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoho derzhavnoho morskoho tekhnichnoho universytetu*, 4 (376), 57–64.
  22. Fricke, W., Paetzold, H. (2014). Effect of whipping stresses on the fatigue damage of ship structures. *Welding in the World*, 58 (2), 261–268. doi: <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0111-5>
  23. Vagushchenko, L. L., Vagushchenko, A. L., Zaichko, S. I. (2005). *Bortovye avtomatizirovannye sistemy kontrolya morekhodnosti*. Odessa: FENIKS, 272.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238289

## THEORETICAL STUDY INTO THE AERODYNAMIC IMBALANCE OF A PROPELLER BLADE AND THE CORRECTING MASSES TO BALANCE IT (p. 60–66)

Gennadiy Filimonikhin

Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2819-0569>

Irina Filimonikhina

Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1384-6027>

Yuliia Bilyk

Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>

Larisa Krivoblotsky

Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3255-2884>

Yurii Machok

Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5328-7859>

This paper reports the theoretically investigated aerodynamic imbalance of the propeller blade, as well as correcting masses for balancing it.

It has been established that the aerodynamic forces acting on the propeller blade can be balanced by the adjustment of masses. This is also true for the case of compressed air (gas) provided that the blades are streamlined by laminar flow. That makes it possible to use rotor balancing methods to study the aerodynamic forces acting on the propeller blade.

The rotating blade mainly generates torque aerodynamic imbalance due to a lift force. A much smaller static component of the aerodynamic imbalance is formed by the drag force acting on the blade. The correcting mass located in the propeller plane balances both static and torque components of the aerodynamic imbalance in its correction plane. A second correcting mass (for example, on the electric motor shank) balances the torque component of aerodynamic imbalance in its correction plane.

The calculations are simplified under the assumption that the equilibrium of aerodynamic forces is perpendicular to the chord of the blade. For approximate calculations, one can use information about the approximate location of the pressure center.

The aerodynamic forces acting on the blade can be determined on the basis of the correcting masses that balance them. The accuracy in determining the aerodynamic forces could be improved by measuring a lift force.

The computational experiment has confirmed the theoretical results formulated above. The experiment further proves the possibility of applying the devised theory for propellers whose rotation speed changes with a change in the angles of blade installation.

The findings reported here could be used both for devising methods of propeller balancing and for constructing methods to study the aerodynamic forces acting on the blade.

**Keywords:** propeller, blade, aerodynamic imbalance, mass imbalance, aerodynamic balancing, mass adjustment balancing.

### References

1. Best, S. (1945). *Propeller Balancing Problems*. SAE Transactions, 53, 648–659. Available at: <http://www.jstor.org/stable/44467824>
2. Kuantama, E., Moldovan, O. G., Țarcă, I., Vesselényi, T., Țarcă, R. (2019). Analysis of quadcopter propeller vibration based on laser vibrometer. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40 (1), 239–251. doi: <https://doi.org/10.1177/1461348419866292>
3. Korneev, N. V. (2008). Aerodinamicheskiy disbalans turbopogregatov i algoritmy ego prognozirovaniya. *Mashinostroitel'*, 10, 24–27.
4. Korneev, N. V., Polyakova, E. V. (2014). Raschet aerodinamicheskogo disbalansa rotora turbokompressora DVS. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 8, 13–16.



5. Yatsun, V. V. (2009). Matematychna model zrivnovazhennia kulovymy avtobalansyramy krylchatky osovoho ventilyatora. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 9, 11–18.
6. Idel'son, A. M. (2003). Modelirovanie aerodinamicheskogo disbalansa na lopatkah ventilyatora. Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ser. «Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva» Samarskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskii universitet imeni akademika S. P. Koroleva. Samara, 180–185.
7. Idelson, A. M., Kuptsov, A. I. (2006). Elastic deformation of fan blades as a factor, influencing the gas-dynamic unbalance. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2-1 (10), 234–238.
8. Almazo, D., Rodríguez, C., Toledo, M. (2013). Selection and Design of an Axial Flow Fan. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 7 (5), 923–926.
9. Liu, Z., Han, B., Yeming, L., Yeming, L. (2017). Application of the objective optimization algorithm in parametric design of impeller blade. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 50 (1), 19–27. doi: <http://doi.org/10.11784/tdxbz201508001>
10. Yang, X., Wu, C., Wen, H., Zhang, L. (2017). Numerical simulation and experimental research on the aerodynamic performance of large marine axial flow fan with a perforated blade. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37 (3), 410–421. doi: <https://doi.org/10.1177/0263092317714697>
11. Suvorov, L. M. (2009). Pat. No. 2419773 RU. Sposob nizkooborotnoy balansirovki massy i aerodinamiki vysokooborotnogo lopatochnogo rotora. MPK G01M 1/00 (2006.01). No. 2009109011/28; declared: 11.03.2009; published: 27.05.2011, Bul. No. 15.
12. DeSmidt, H. A. (2010). Automatic Balancing of Bladed-Disk/Shaft System via Passive Autobalancer Devices. *AIAA Journal*, 48 (2), 372–386. doi: <https://doi.org/10.2514/1.43832>
13. Filimonikhin, G., Olijnichenk, L. (2015). Investigation of the possibility of balancing aerodynamic imbalance of the impeller of the axial fan by correction of masses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (77)), 30–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195>
14. Filimonikhina, I., Nevdakha, Y., Olijnichenko, L., Pukalov, V., Chornohlazova, H. (2019). Experimental study of the accuracy of balancing an axial fan by adjusting the masses and by passive auto-balancers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (102)), 60–69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184546>
15. Olijnichenko, L., Filimonikhin, G., Nevdakha, A., Pirogov, V. (2018). Patterns in change and balancing of aerodynamic imbalance of the low-pressure axial fan impeller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (93)), 71–81. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133105>
16. Zahordan, A. M. (1955). The elementary theory of the helicopter: tutorial for flight and maintenance composition BBC. Moscow: Publishing Military Ministry of Defense of the USSR, 215.

DOI: [10.15587/1729-4061.2021.237772](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237772)

## DEVELOPMENT OF A PLANAR CABLE PARALLEL ROBOT FOR PRACTICAL APPLICATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS (p. 67–75)

**Assylbek Jomartov**

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7262-5267>

**Aziz Kamal**

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4454-8233>

**Azizbek Abduraimov**

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0815-3349>

Cable-driven parallel robot (CDPR) has the great potential for various applications in industry and in everyday life. They consist of an end effector and a base, which connected by several cables. CDPRs have a large workspace compared to the workspace of classic parallel robots. CDPR have a simpler structure have good dynamic properties, high carrying capacity, mobility and low cost. The only drawback is that the CDPR cables can only work for retraction and cannot push. This article presents the design of a prototype of a planar CDPR with four cables for practical use in the educational process. This prototype of a planar CDPR is necessary for a better understanding of the design features, structure, kinematics, statics and dynamics of the CDPR by students. The planar CDPR performs two translational motions, due to the controlled 4 cables, and one rotational motion of the end effector. The research of the kinematics and statics of the planar cable-driven parallel robot is carried out. Simulation of the motion of a planar cable-driven parallel robot in the Python programming language has been carried out. A design was developed and a prototype of the planar cable-driven parallel robot was manufactured. Experimental researches of a prototype of the planar cable-driven parallel robot have been carried out. The results of experimental researches have shown that the CDPR works well enough. During the tests of the prototype of the planar cable-driven parallel robot, it was found that the distortions of the trajectory of the end effector depend on the tension of the cables. It is necessary to monitor the tension level using strain gauges. Based on the analysis of the results obtained, the effectiveness of the use of the prototype of a planar CDPR in the educational process of the robotics course has been confirmed.

**Keywords:** cable-driven parallel robot, planar, design, kinematics, statics, tension, end effector, prototype, control, encoder.

### References

1. Bostelman, R., Albus, J., Dagalakis, N., Jacoff, A., Gross, J. (1994). Applications of the NIST robocrane. *Proceedings of International Symposium on Robotics and Manufacturing Maui Hi*, 14–18. Available at: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=820484](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=820484)
2. Albus, J., Bostelman, R., Dagalakis, N. (1993). The NIST robocrane. *Journal of Robotic Systems*, 10 (5), 709–724. doi: <http://doi.org/10.1002/rob.4620100509>
3. Jomartov, A. A., Kamal, A. N., Abduraimov, A. (2021). Overview of cable parallel robots. *Vestnik KazNRTU*, 143 (3), 202–210. doi: <http://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i3.27>
4. Varela, M. J., Ceccarelli, M., Flores, P. (2015). A kinematic characterization of human walking by using CaTraSys. *Mechanism and Machine Theory*, 86, 125–139. doi: <http://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.006>
5. Verhoeven, R. (2004). Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms. *Duisburg: Department of Mechanical Engineering, University of Duisburg-Essen*, 169. Available at: <https://d-nb.info/972304770/34>
6. Zanotto, D., Rosati, G., Minto, S., Rossi, A. (2014). Sophia-3: A Semiaadaptive Cable-Driven Rehabilitation Device With a Tilting Working Plane. *IEEE Transactions on Robotics*, 30 (4), 974–979. doi: <http://doi.org/10.1109/tro.2014.2301532>

7. Liu, H. W. (2012). Conceptual design and dynamic analysis of novel cable-loop-driven parallel mechanisms. Québec, 195. Available at: [https://robot.gmc.ulaval.ca/fileadmin/documents/Theses/hanwei\\_liu.pdf](https://robot.gmc.ulaval.ca/fileadmin/documents/Theses/hanwei_liu.pdf)
8. Gouttefarde, M., Gosselin, C. M. (2006). Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, 22 (3), 434–445. doi: <http://doi.org/10.1109/tro.2006.870638>
9. Azizian, K., Cardou, P. (2012). The Dimensional Synthesis of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms Through Convex Relaxations. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 4 (3). doi: <http://doi.org/10.1115/1.4006952>
10. Berti, A., Merlet, J.-P., Carricato, M. (2015). Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis. *The International Journal of Robotics Research*, 35 (6), 723–739. doi: <http://doi.org/10.1177/0278364915595277>
11. Jin, X., Jun, D., Pott, A., Park S., Park, J., Seong Young Ko, S. (2013). Four-cable-driven parallel robot. 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013). Gwangju, 879–883. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/260393125\\_Four-cable-driven\\_parallel\\_robot](https://www.researchgate.net/publication/260393125_Four-cable-driven_parallel_robot)
12. Williams, R. L., Gallina, P., Vadia, J. (2003). Planar Translational Cable-Direct-Driven Robots. *Journal of Robotic Systems*, 20 (3), 107–120. doi: <http://doi.org/10.1002/rob.10073>
13. Ottaviano, E., Ceccarelli, M., Paone, A., Carbone, G. (2005). A Low-Cost Easy Operation 4-Cable Driven Parallel Manipulator. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4019–4024. doi: <http://doi.org/10.1109/robot.2005.1570734>
14. Ottaviano, E., Chablat, D., Moroz, G. (2011). A comparative study of 4-cable planar manipulators based on cylindrical algebraic decomposition. Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE, 1253–1262. doi: <http://doi.org/10.1115/detc2011-47726>
15. He, Y., Liang, L. (2019). Application of Robotics in Higher Education in Industry 4.0 Era. *Universal Journal of Educational Research*, 7 (7), 1612–1622. doi: <http://doi.org/10.13189/ujer.2019.070715>
16. Zainal, N., Din, R., Nasrudin, M., Abdullah, S., Rahman, A. H. A., Abdullah, S. N. H. S. et. al. (2018). Robotic prototype and module specification for increasing the interest of Malaysian students in STEM education. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.25), 286–290. Available at: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/17583>
17. Crnokic, B., Grubisic, M., Volaric, T. (2017). Different Applications of Mobile Robots in Education. *International Journal on Integrating Technology in Education*, 6 (3), 15–28. doi: <http://doi.org/10.5121/ijite.2017.6302>
18. Python. Available at: <https://www.python.org/downloads/>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237954

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З ПОШКОДЖЕННЯМИ РОЗТЯГНУТОЇ АРМАТУРИ, ЩО БУЛИ ОТРИМАНІ ЗА ДІЇ НАВАНТАЖЕННЯ (с. 6–17)**

П. І. Вегера, Р. В. Вашкевич, Я. З. Бліхарський, Р. Є. Хміль

Вдосконалено та апробовано методику розрахунку залізобетонних балок, в яких виникли пошкодження розтягнутої арматури за дії навантаження. Наведено основні результати випробовування залізобетонних балок з пошкодженням у розтягнутій зоні у вигляді одного отвору в арматурі посередині балки. Змінним параметром дослідження був рівень навантаження при якому виконувалося пошкодження. Він набував значень 0, 30 %, 50 %, 70 % від несучої здатності контрольних непошкоджених зразків. Всього наведено результати випробовування 12 зразків. Представлено пропозиції нової методики щодо врахування зміни механічних характеристик розтягнутої арматури, які виникають при її пошкодженні. Це дає можливість точніше встановити несучу здатність залізобетонних згинаних елементів, що отримали пошкодження арматури в процесі експлуатації. З аналізу розрахунку, в порівнянні з експериментальними величинами, зроблено висновок, що за деформаційною моделлю можна визначити вичерпання несучої здатності залізобетонних балок без пошкодження та з пошкодженням робочої арматури. За вдосконаленим алгоритмом запропоновано принцип застосування деформаційної моделі, для вичерпання несучої здатності пошкоджених зразків з врахуванням дії рівня навантаження. Теоретичний розрахунок, за вичерпанням несучої здатності, показав результати на 3...21 % менші від експериментальних величини, що забезпечує надійність розрахунку таких конструкцій. Запропонований розрахунок надає новий підхід до визначення несучої здатності залізобетонних балок, що отримали пошкодження в процесі експлуатації. Це, в свою чергу, надає можливість точніше визначити залишкову несучу здатність конструкцій та підвищує безпеку їх експлуатації.

**Ключові слова:** залізобетонна балка, пошкоджена арматура, деформаційна модель, розрахунок згинаних елементів, за дії навантаження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237157

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТРУБ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ В КАРКАСІ ЗЙОМНОГО ДАХУ НАПІВВАГОНА (с. 18–25)**

О. В. Фомін, А. О. Ловська

Проведено визначення основних показників міцності зйомного даху напіввагона. Встановлено, що типова конструкція даху має значний запас міцності складових несучої конструкції. З метою зменшення матеріалоемності даху проведено визначення резервів його міцності та оптимізацію за критерієм мінімуму матеріалоемності. Запропоновано використання у якості складових каркасу даху труб квадратного перерізу.

З урахуванням запропонованих заходів стає можливим знизити масу каркасу зйомного даху напіввагона майже на 15 % у порівнянні з типовою конструкцією. При цьому для можливості використання даху на різних типах напіввагонів його консольні частини мають здатність переміщуватися у повздовжній площині. Передбачено можливість використання дефлекторів на зйомному даху. Кріплення даху до кузова може виконуватися типовим способом. Є можливість здійснювати закріплення за допомогою шог-з'єднань.

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено розрахунок на міцність удосконаленої конструкції зйомного даху. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції зйомного даху не перевищують допустимі. Для визначення показників динаміки зйомного даху проведено дослідження його динамічної навантаженості. Розрахунок здійснений у плоскій системі координат. До уваги прийняті коливання підсакування та галопування, як найбільш поширені види коливань вагона при русі рейковою колією. Розв'язок математичної моделі динамічної навантаженості здійснений в програмному комплексі MathCad (Boston, USA). Проведені дослідження показали, що прискорення кузова в центрі мас складають 0,4 g і знаходяться в допустимих межах. При цьому оцінка ходу вагона є відмінною.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту.

**Ключові слова:** транспортна механіка, напіввагон, зйомний дах, міцність даху, напружений стан, динамічна навантаженість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238440

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОПРУЖНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ МОСТА ПІДСИЛЕНОЇ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТОМ (с. 26–33)**

В. В. Ковальчук, Ю. Г. Соболевська, А. М. Онищенко, О. В. Федоренко, О. П. Токін, А. П. Павлів, І. Б. Кравець, Ю. З. Лесів

Проведено аналіз методів визначення температурних напружень та деформацій у мостових конструкціях при дії кліматичних температурних перепадів навколишнього середовища.

Застосовано одновимірну модель визначення температурного поля та термопружного стану для практичної оцінки температурних полів та напружень підсиленіх балок із врахуванням температурних перепадів навколишнього середовища.

Отримано розподіл температурного поля у вертикальному напрямі залізобетонної балки у залежності від товщини конструктивного підсилення метилметакрилатом. Встановлено, що на контакті залізобетонної балки та підсилення спостерігається зміна градієнту температури.

Отримано розподіл температурних напружень у вертикальному напрямі підсиленої залізобетонної балки із врахуванням товщини підсилення метилметакрилатом та величини модуля його пружності. Встановлено, що товщина підсилення не має значного впливу на підвищення напружень, проте збільшення модулю пружності конструктивного підсилення призводить до підвищення

температурних напружень. Різниця отриманих значень напружень для балки із метилметакрилатним підсиленням товщиною 10 мм і 20 мм при модулі пружності  $E=15000$  МПа становить до 3 % при додатних і від'ємних температурах.

Встановлено, що на контактній поверхні залізобетонної балки і метилметакрилатного підсилення відбувається зміна характеру розподілу температурних напружень по висоті балки. Значення температурних напружень у балці із метилметакрилатним підсиленням і дії додатних та від'ємних температур навколишнього середовища збільшується у три рази.

Встановлено, що на величину температурних напружень впливає різниця температур залізобетонної балки і підсилення, а також фізико-механічні параметри досліджуваних конструкційних матеріалів балки та конструктивного підсилення метилметакрилатом.

**Ключові слова:** підсилення моста, залізобетонна балка, метилметакрилатне підсилення, температурне поле.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239066

### ВИЯВЛЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ СЕГМЕНТІВ І ЇХ ОПОР В ГІДРОСТАТИЧНОМУ ПІДШИПНИКУ СЕГМЕНТНОГО ТИПУ (с. 33–40)

**В. І. Назін**

В даний час існують теоретичні та експериментальні дослідження підшипників сегментного типу без урахування пружних деформацій сегментів. На підшипники роторів потужних турбін для атомних станцій діють навантаження, рівні десяткам тонн. Одним з важливих питань при проектуванні сегментних підшипників, що працюють в цих умовах, є урахування пружних деформацій сегментів. Наведено схему гідростатичного підшипника сегментного типу і описаний принцип його роботи. При визначенні деформації сферичної опори застосована формула для зміни об'єму суцільної сталевий кулі, навантаженої рівномірним тиском.

Для визначення деформації сегмента в осьовому напрямку в якості вихідного прийнято диференціальне рівняння вигину балки-штаби. В якості вихідного, для визначення деформації сегмента в окружному напрямку, прийнято основне рівняння деформації стрижнів з криволінійної віссю при дії в площині кривизни.

В результаті проведених досліджень встановлено, що при тиску живлення 5 МПа максимальна деформація сегмента становить 4,5 % від радіального зазору і може впливати на характеристики підшипника. Виявлено суттєво нелінійний характер деформацій уздовж осі сегмента. Встановлено, що величина тиску робочої рідини істотно впливає на товщину сегмента. При збільшенні тиску живлення з 1 МПа до 10 МПа товщина сталевий сегмента збільшувалася більш, ніж в 2 рази, а товщина бронзовий сегмента – більше, ніж в 3 рази. Встановлено, що величина тиску робочої рідини, що перевищує 10 МПа, істотно впливає на деформацію сферичної опори і на зазор в підшипнику.

Отримані результати дозволять точніше визначати основні характеристики сегментного підшипника і раціональніше проектувати його конструкцію.

**Ключові слова:** сегментний підшипник, деформація сегмента, характеристики підшипника, диференціальне рівняння, результати розрахунку.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239292

### ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ В КАМЕРІ ДРОБЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ДРОБАРОК (с. 41–49)

**І. І. Назаренко, Є. О. Міщук, Д. О. Міщук, М. М. Ручинський, І. Л. Роговський, Л. М. Михайлова, Л. Л. Тітова, М. Г. Березовий, Р. В. Шартов**

Дробильне обладнання характеризується значною енергозатратною системою при виконанні робочого процесу подрібнення. Сучасна тенденція розвитку подібних процесів висуває вимоги до розробки нового або вдосконалення існуючого енергоощадного обладнання. Сутність вирішення проблеми в даній роботі визначено шляхом використання резонансних режимів, які за своєю суттю є найбільш ефективними. Практична реалізація резонансного режиму досягнуто врахуванням умов взаємодії резонансної вібраційної дробарки із матеріалом на етапах його руйнування. Враховано ступінь напружено – деформованого стану матеріалу, що явилось передумовою виявлення потенційних можливостей розвитку вібраційного навантаження. Складені рівняння руху на основі обґрунтованої дискретно-континуальної моделі вібраційної дробарки та оброблювального матеріалу. Застосовано підхід визначення ступеневого руйнування матеріалу із визначенням необхідної ступені енергії. Такий методологічний підхід дозволив розкрити характер процесу руйнування матеріалу, де враховано енергетичні витрати на етапах утворення тріщин, їх розвитку та остаточного руйнування. Виявлено, що найбільші енергозатрати при роботі дробарок йдуть на кінетичну енергію дробильних плит та потенціальну енергію деформації пружин. Запропонована модель є загальною для будь якої конструкції вібраційної машини та її режимів роботи. Стійкий резонансний режим дозволив значно знизити витрати енергії на протікання технологічного процесу подрібнення матеріалу. Отримані результати використані при вдосконаленні методів розрахунку вібраційних шоківих та конусних дробарок, що реалізують відповідні енергоощадні стійкі зони робочого процесу.

**Ключові слова:** вібраційна дробарка, камера дроблення, резонансний режим, процес руйнування, енергія, напруження, деформація.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239159

### УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСУ ТРАУЛЕРА З УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ (с. 50–59)

**Л. І. Коростильов, Д. Ю. Литвиненко, Г. В. Шарун, І. П. Давидов**

Удосконалено конструкцію корпусу траулера проекту 1288 в районі носового трюму з метою забезпечення втомної міцності вузлів перетину основних шпангоутів із другим дном. Для цього виконано дослідження втомної міцності названих вузлів для вихідного варіанту конструкції борту та для двох варіантів її модернізації.

Визначено величини внутрішніх зусиль у точках появи втомних тріщин у відсіку для трьох конструктивних варіантів борту. Встановлено, що найбільші зусилля мають місце посередині носової половини відсіку.

Розраховано параметри довготермінового розподілу величин розмахів сумарних еквівалентних експлуатаційних напружень за законом Вейбулла в точках появи втомних тріщин для різних конструктивних варіантів бортового перекриття. Ці параметри були визначені для середини носового трюму судна та для районів, в яких діють максимальні величини розмахів згинальних моментів, з врахуванням корозійного зносу та без нього.

Визначено величини сумарних втомних пошкоджень та довговічність вузлів, що досліджувались. Розрахунки проводились методами номінального напруження, напруження у гарячій точці та експериментально-теоретичним.

Показано, що для забезпечення втомної міцності вузла, що розглядається, необхідно продовжити проміжні шпангоути вихідного варіанта конструкції борту до рівня другого дна, закріпивши їх до настилу. Також потрібно приєднати вантажну платформу до борту, зменшивши таким чином прогин шпангоуту. Рівень втомного пошкодження за 25 років експлуатації в результаті зменшиться приблизно у 3,5 рази.

Наближене врахування ефекту слемінгу, як було виявлено, не збільшує суттєво величину втомного пошкодження вузла.

Результати розробки рекомендацій з модернізації конструкції борту можуть бути впроваджені як на суднах проекту 1288, так і на інших суднах з поперечною системою набору борту.

**Ключові слова:** траулер, конструкція борту, конструктивний вузол, напружено-деформований стан, концентрація напружень, втомна міцність.

---

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238289

### ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ НЕЗРІВНОВАЖЕНОСТІ ЛОПАТІ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА ТА КОРИГУВАЛЬНИХ МАС ДЛЯ ЇЇ БАЛАНСУВАННЯ (с. 60–66)

Г. Б. Філімоніхін, І. І. Філімоніхіна, Ю. О. Білик, Л. М. Кривоблоцька, Ю. В. Мачок

Теоретично досліджена аеродинамічна незрівноваженість лопаті повітряного гвинта та коригувальні маси для її балансування.

Встановлено, що аеродинамічні сили, що діють на лопать повітряного гвинта, можуть бути збалансовані коригуванням мас. Це справедливо і у випадку стислого повітря (газу), за умови, що лопаті обтикаються ламінарним потоком. Це дозволяє застосовувати для вивчення аеродинамічних сил, що діють на лопать повітряного гвинта, методів балансування роторів.

Повернута лопать створює переважно моментну аеродинамічну незрівноваженість через підйомну силу. Значно менша статична складова аеродинамічної незрівноваженості створюється силою лобового опору, що діє на лопать. Коригувальна маса, розташована у площині гвинта, балансує як статичну, так і моментну складові аеродинамічної незрівноваженості у своїй площині корекції. Друга коригувальна маса (наприклад, на хвостовику електродвигуна) балансує моментну складову аеродинамічної незрівноваженості у своїй площині корекції.

Розрахунки спрощує припущення, що рівнодійна аеродинамічних сил перпендикулярна до хорди лопаті. Для наближених розрахунків можна використовувати інформацію про наближене місце розташування центру тиску.

Аеродинамічні сили, що діють на лопать, можуть бути визначені по коригувальним масам для їх балансування. Точність визначення аеродинамічних сил може бути підвищена шляхом заміру підйомної сили.

Обчислювальний експеримент підтверджує сформульовані вище теоретичні результати. Експеримент додатково доводить можливість застосування розробленої теорії для гвинтів, чия швидкість обертання змінюється зі зміною кутів встановлення лопатей.

Одержані результати можуть бути застосовані як для розробки методів балансування повітряних гвинтів, так і для розробки методів дослідження аеродинамічних сил, що діють на лопать.

**Ключові слова:** повітряний гвинт, лопать, аеродинамічна незрівноваженість, незрівноваженість мас, аеродинамічне балансування, балансування коригуванням мас.

---

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237772

### РОЗРОБКА ПЛОСКОГО ТРОСОВОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ (с. 67–75)

Assylbek Jomartov, Aziz Kamal, Azizbek Abduraimov

Паралельний робот з кабельним приводом (ПРКП) має величезний потенціал для різних застосувань в промисловості і в повсякденному житті. Вони складаються з кінцевого ефектора і підстави, з'єднаних кількома кабелями. ПРКП мають велику робочу область у порівнянні з робочою областю класичних паралельних роботів. ПРКП мають більш просту конструкцію, мають гарні динамічні характеристики, характеризуються високою вантажопідйомністю, мобільністю і невисокою вартістю. Єдиний недолік в тому, що кабелі ПРКП можуть працювати тільки на втягування і не можуть стикатися. У даній статті представлена конструкція прототипу планарного ПРКП з чотирма кабелями для практичного використання в навчальному процесі. Цей прототип планарного ПРКП необхідний для кращого розуміння студентами особливостей конструкції, структури, кінематики, статички і динаміки ПРКП. Планарний ПРКП виконує два поступальних руху за рахунок керованих 4 тросів і одне обертальний рух кінцевого ефектора. Проведено дослідження кінематики та статички плоского паралельного робота з тросовим приводом. Проведено моделювання руху плоского паралельного робота з тросовим приводом на мові програмування Python. Розроблено конструкцію і виготовлено прототип плоского паралельного робота з тросовим приводом. Проведено експериментальні дослідження прототипу плоского паралельного робота з тросовим приводом. Результати експериментальних досліджень показали, що ПРКП працює досить добре. В ході випробувань прототипу планарного паралельного робота з тросовим приводом було виявлено, що спотворення траєкторії кінцевого ефектора залежать від натягу тросів. Необхідно контролювати рівень натягу за допомогою тензодатчиків. На підставі аналізу отриманих результатів підтверджена ефективність використання прототипу планарного ПРКП в навчальному процесі курсу робототехніки.

**Ключові слова:** кабельний паралельний робот, планарний, конструкція, кінематика, статика, натяг, кінцевий ефектор, прототип, управління, енкодер.