

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
Національна академія наук України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Овчарова Наталія Юріївна

УДК 539.3

ДИСЕРТАЦІЯ

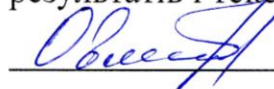
**Скінченно-елементний аналіз швидкісного деформування захисних
елементів машинобудівних конструкцій**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

133 – галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Н.Ю. Овчарова

Науковий керівник: Воробйов Юрій Сергійович, доктор технічних наук,
професор

*Ідентичність за змістом
з іншими працями
дисертації
заевідую.*

Харків – 2017

*Великий секретар
спеціалізованої
ради Двч.050. А.О.*



Сергій О.О.

АНОТАЦІЯ

Овчарова Н.Ю. Скінчено-елементний аналіз швидкісного деформування захисних елементів машинобудівних конструкцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин (133 – галузеве машинобудування). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Елементи сучасних конструкцій часто працюють в умовах ударного навантаження. Це притаманно елементам транспортних засобів, зокрема авіаційної та космічної техніки, а також обладнанню сучасних ефективних технологічних процесів.

Аналіз процесів швидкісного деформування під дією локального та імпульсного навантаження потребує використання динамічних характеристик матеріалу, які залежать від швидкості деформації. Процеси швидкісного деформування проходять як в пружній, так і в пластичній стадії і частково супроводжуються досить великими деформаціями. З математичної точки зору такі задачі є суттєво нелінійними, та потребують аналізу тривимірного динамічного напружено-деформованого стану.

У зв'язку з цим актуальним є питання розробки математичної моделі процесу швидкісного деформування елементів конструкцій в пружно-пластичній стадії з урахуванням динамічних властивостей матеріалу, а також розробка рекомендацій щодо забезпечення динамічної міцності елементів конструкцій при локальному та ударному навантаженнях.

Мета дослідження - визначення динамічного напружено-деформованого стану захисних елементів машинобудівних конструкцій при імпульсному та

ударному навантаженню для забезпечення їх ефективного використання при експлуатації, у тому числі в екстремальних умовах і з пошкодженнями

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Аналіз літературних джерел за темою дисертації та визначення основних напрямків дослідження.
2. Розробка теоретичних підходів до розрахунку швидкісного деформування машинобудівних елементів конструкцій.
3. Розв'язання тестових задач, перевірка достовірності та адекватності запропонованих підходів, обґрунтування вибору фізичних співвідношень.
4. Виявлення особливостей динамічного напруженого стану елементів реальних конструкцій і розробка практичних рекомендацій із забезпечення їхньої динамічної міцності.

Об'єкт дослідження – процес швидкісного деформування під дією локального ударного й імпульсного навантаження.

Предмет дослідження – динамічна міцність елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні.

Методи дослідження. Для розробки математичної моделі були використані методи математичного моделювання напружено-деформованого стану елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні, з урахуванням динамічної деформаційної теорії пластичності. Для аналізу динамічного напруженого стану елементів конструкцій при локальному ударному навантаженні використовуються чисельні методи, засновані на методі скінчених елементів.

У дисертаційній роботі набули подальшого розвитку розрахункові моделі тривимірного швидкісного пружно-пластичного деформування елементів транспортного та енергетичного машинобудування, які відрізняються врахуванням динамічних властивостей матеріалів, що дозволяє отримувати уточнені результати для оцінки міцності при ударних та імпульсних навантаженнях;

- вперше отримані залежності розподілу напружень від швидкості удару за просторовими та часовими координатами в елементах конструкцій в елементах конструкцій, які досліджуються з різних матеріалів, які відрізняються чітким визначенням зон із високими градієнтами напружень і деформацій, що дозволило отримати обґрунтування для побудови покращених розрахункових сіток;

- вперше виявлені нові особливості процесу швидкісного деформування для елементів корпусів газотурбінних двигунів при локальних навантаженнях, що на відміну від існуючих дозволяють визначити утворення кратерів та дослідити процес розвантаження з виникненням залишкових напружень та пошкоджень;

- визначені нові закономірності розподілу напружень та деформацій в тришаровому елементі для окремих шарів в залежності від швидкості ударника, що дозволило сформулювати практичні рекомендації по характеристикам захисних елементів легкоброньованої техніки.

Результати досліджень дозволяють виявити динамічну міцність конструкційних елементів сучасної техніки під дією локального ударного навантаження. Результати знайшли використання та впровадження при визначенні динамічної міцності облицювання транспортних засобів (сучасних локомотивів), при ударних навантаженнях корпусів газотурбінних двигунів, компресорів на ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» та ЗМКБ «Прогрес», що підтверджується документально.

В дисертації проведено огляд робіт в яких закладені основи фізичних моделей і аналізу процесів швидкісного деформування елементів конструкцій. Наведено відомості про різні моделі швидкісного пружно-пластичного деформування та їх розвиток. Дано опис особливостей деформування матеріалу при інтенсивному імпульсному навантаженні таких як: широкий діапазон інтенсивності напружень, висока швидкість зміни навантаження; нестационарний характер напружено-деформованого стану. Проведено аналіз

результатів теоретичних та експериментальних досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів.

В роботі обґрунтовано необхідність використання тривимірних математичних моделей для аналізу динамічного напружено-деформованого стану конструкцій у випадку дії локальних ударних навантажень. Показано особливості побудови скінченно-елементних моделей для задачі швидкісного деформування елементів конструкцій в умовах дії локальних ударних навантажень. В роботі використовується динамічний варіант теорії пластичних деформацій. Наведені рівняння для компонент напружень, які визначаються в залежності від стадії деформування (пружна або пружно-пластична), та відображають фізичну нелінійність задачі (Пежини, Пірса, Джонсона-Кука.). У разі інтенсивних локальних навантажень припущення про малість переміщень і деформацій неприйнятно. Наведено залежності для скінченних деформацій і переміщень, які відображають геометричну нелінійність задачі.

Чисельні розрахунки виконуються за допомогою методу скінченних елементів, який враховує специфіку даного процесу. В дисертації наведені тестові розрахунки для визначення напружено-деформованого стану елементів при ударному навантаженні. Отримані чисельні результати пружно-пластичного деформування циліндричного ударника при взаємодії з абсолютно жорсткою перешкодою.

Задля оцінки достовірності моделі проведено порівняння чисельних результатів впливу ударної хвилі на пластину з розрізом з експериментальними даними, які отримані в Інституті механіки НАН України. Показано особливості деформованого стану пластини поблизу вершини розрізу, уздовж берегів розрізу і на кордонах жорсткого защемлення. Показана добра відповідність чисельних і експериментальних результатів уздовж ліній, які розташовані поблизу вершини розрізу та вище вершини розрізу.

Розглянуто вплив урахування динамічних властивостей на розвиток процесу швидкісного пружно-пластичного деформування елементів конструкцій при інтенсивних ударних навантаженнях. Для порівняння

розглядається вплив ударника на прямокутний елемент сталевій конструкції із заданою швидкістю при різних способах урахування динамічних властивостей матеріалу. Спроба вирішувати задачу в пружній постановці при збільшенні інтенсивності навантаження призводить до завищення максимальних напружень при заниженій оцінці переміщень. Розглянуто практичну задачу визначення напружено-деформованого стану елемента облицювання транспортного засобу при дії циліндричного ударника. Проведено аналіз впливу локального ударного навантаження, що діє під різними кутами, на пологий елемент облицювання транспортного засобу. Виявлено кути удару при яких виникають максимальні напруження. Проведено порівняння напружено-деформованого стану елементів конструкцій, виконаних з різних матеріалів, для оцінки необхідної динамічної міцності елементів при заданій товщині і вазі.

Розглянуто ряд практичних задач аналізу напружено-деформованого стану елементів корпусу газотурбінного двигуна при ударному навантаженні, які відрізняються призначенням, геометричними особливостями та властивостями матеріалів. Показано, що в деяких випадках перевага надається двошаровим конструкціям, тому що вони краще чинять опір ударним навантаженням, ніж одношарові з більшою товщиною з того ж матеріалу. Визначено особливості напружено-деформованого стану двошарового металополімерного колеса силової хвильової передачі. Розглянуто опірність тришарового елемента з двох тонких шарів титанового сплаву Ti6Al4V і середнього керамічного шару. Показано, що тришарова конструкція добре чинить опір ударним навантаженням. Отримані закономірності розвитку максимальних динамічних напружень у верхньому шарі з титану і в керамічному шарі в залежності від швидкості удару.

Ключові слова: швидкісне деформування, ударні навантаження, динамічні властивості матеріалів, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, пружно-пластичні деформації, тривимірні моделі.

Список публікацій здобувача

1. Овчарова Н.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния металлопластикового колеса силовой волновой зубчатой передачи под действием генератора / Ю.С. Воробьев, А.Г. Приймаков, Н.Ю. Овчарова, Т.Ю. Евченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2012. Вип. 128. – С. 268 – 271.

2. Овчарова Н.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием локальных ударных нагрузок / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Методы решения прикладных задач механики деформируемого тела. – Дніпропетровськ: Ліра. – 2012. Вип. 13. – С. 86 – 91.

3. Овчарова Н.Ю. Локальное ударное воздействие на цилиндрические элементы конструкций / Н.Ю. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2012. – № 10 (97). – С. 29 – 32.

4. Овчарова Н.Ю. Динамика и статика металлопластикового колеса силовой волновой зубчатой передачи / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, Т.Ю. Евченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2013. Вип. 139. – С. 337 – 341.

5. Овчарова Н.Ю. Влияние ударных нагрузок на скоростное деформирование элементов корпуса ГТД / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Вестник двигателестроения. – Запорожье: АО «Мотор Сич». – 2013. – № 2. – С. 209 – 213.

6. Овчарова Н.Ю. Динамика элементов конструкций при ударных нагрузках / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця: ВНАУ. – 2014. – № 2 (74). – С. 5 – 11.

7. Овчарова Н.Ю. Влияние динамических свойств материала на скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев,

Н.Ю. Овчарова // Вісник Запорізького національного університету. – Запоріжжя: ЗНУ. – 2015. – № 1. – С. 12 – 22.

8. Овчарова Н.Ю. Воздействие ударной волны на прямоугольную пластину с разрезом / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, / Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця: ВНАУ. – 2015. – № 4 (80). – С. 5 – 9.

9. Овчарова Н.Ю. Скоростное деформирование многослойных элементов при контактном воздействии / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Технічна механіка. – Дніпро: ІТМ НАН України і ДКА України. – 2016. – № 3. – С. 17 – 24.

10. Ovcharova N.Y. FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka , N.Y. Ovcharova // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. – 2014. – Vol. 566. – P. 499 – 504.

11. Ovcharova N. Sensitivity of high strain rate of structural elements in relation to dynamics properties of material / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // European Physical Journal Web of Conferences. – 2015. – Vol. 94. – . 1 – 3.

12. Ovcharova N. The Resistance of Structural Elements to Impact and Shock-wave Load / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova / Key Engineering Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. – 2016. – Vol. 715. – P. 216 – 221.

13. Овчарова Н.Ю. Анализ скоростного деформирования элементов конструкций на основе МКЭ / Ю. Воробьев, М. Чернобрышко, Н. Овчарова // Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania: X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Streszczenia (Kazimir Dolny, 13 – 16 listopada 2007). – 2007. – P.143 – 144.

14. Овчарова Н.Ю. Анализ ударного воздействия на корпус ГТД / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Международная научно-техническая конференция. – Харьков: ИПМаш, 2012. – С. 1 – 7.

15. Овчарова Н.Ю. Использование МКЭ для анализа воздействия локальных ударных нагрузок на цилиндрические элементы конструкций / Импульсные процессы в механике сплошных сред. / Н.Ю. Овчарова, Ю.С. Воробьев // материалы X Международной научной конференции 19 – 22 августа 2013 г., Николаев 2013. – С. 194 – 197.

16. Овчарова Н.Ю. Анализ динамической прочности корпусов ГТД при ударных нагрузках / Н.Ю. Овчарова // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Международная научно-техническая конференция. Харьков: ИПМаш, 2015. – С. 1 – 9.

17. Ovcharova N. Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013 – June 19-22, 2013, Sevastopol, Ukraine, P. 351 – 356.

18. Ovcharova N. Computer analysis of high-rate deformation of plane and cylindrical structural elements under impact / Iu. Vorobiov, T. Niezgod, L. Kruszka, N. Ovcharova // Proceedings of The XIII Science and Technology Conference (TKI 2014), WAT, Poland – 2014, P. 201 – 202.

19. Ovcharova N. Nonlinear deformation of structure elements from different materials under impulse and shock loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2016 - September 27-30, 2016, Kharkov, Ukraine, P. 406 – 413.

20. Ovcharova N. Dynamics strength analysis of protective structures under local impact loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Analysis and Practice of Protective Structures /Proceedings of the 4th International Conference on Protective Structures Beijing, China, 18 – 21 October 2016. – P. 359 – 367.

21. Ovcharova N. Nonlinear Deformation of Structure Elements from New Materials under Impulse and Shock Loads / N. Ovcharova // International symposium on Advanced Materials and Additive Manufacturing IS-AMAM, Harbin, China, November 27 – 30, 2016. – P. 13.

22. Ovcharova N.Y. Dynamic Behaviour of Structure Element Under Impact Loads L. Kruszka, Iu.S. Vorobiov and N.Y. Ovcharova / Book of Abstracts «10th Workshop Dynamic Behaviour of Materials and its Applications in Industrial Processes» 24-26 August 2016. – Poznan University of Technology. – Poland. – P. 53 – 55.

ANNOTATION

Ovcharova N.Yu. Finite element analysis of high-rate deformation of protective elements of machine-building structures. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (engineering sciences), 133 – sectoral mechanical engineering. – Kharkov National University «Kharkov Polytechnic Institute» Kharkiv, 2017.

In the thesis, the actual scientific and technical problem of determining the dynamic stress-strain state of the protective elements of machine-building structures under impulse and shock loads is solved to ensure their effective use during operation, including under extreme conditions and with damages.

Elements of modern constructions often work under the action of shock loads. This is inherent in the elements of vehicles, in particular aviation and space technic, as well as the equipment of modern efficient technological processes. Analysis of the processes of high-rate deformation under the action of local and impulse loads requires the use of dynamic properties of materials, which depend on the rate of deformation.

The processes of high-speed deformation occur both in the elastic and in the plastic stage and are partially accompanied by rather large deformations. From a mathematical point of view, such problems are essentially non-linear and require analysis of a three-dimensional dynamic stress-strain state.

In this connection, the actual issue is the development of a mathematical model for the process of high-rate deformation of structural elements in the elastoplastic stage, taking into account the dynamic properties of materials, as well as recommendations for ensuring the dynamic strength of structural elements under local and shock loads.

The aim of the study is to determine the dynamic stress-strain state of the protective elements of machine-building structures in the case of impulse and shock loads to ensure their effective use, including under extreme conditions and with damages.

To achieve this aim, it is necessary to solve the following tasks:

1. Analysis of the literature on the topic of the thesis and determine the main directions of research.
2. Development of theoretical approaches to the calculation of high-rate deformation of machine-building elements of structures.
3. Solving test tasks, checking the authenticity and adequacy of the proposed approaches, justifying the choice of physical relationships.
4. Detection of features of the dynamic stressed state of elements of real constructions and development of practical recommendations for ensuring their dynamic strength.

The object of investigation is the process of high-rate deformation under the action of local shock and impulse loading.

The subject of the study is the dynamic strength of structural elements under local shock loading.

Methods of research. To develop a mathematical model, methods were used to simulate the stress-strain state of structural elements under local shock loading, taking into account the dynamic deformation theory of plasticity. To analyze the dynamic stress-strain state of structural elements under local shock loading, numerical methods based on the finite element method are used.

In the thesis there are further development of calculation models of three-dimensional high-rate elastic-plastic deformation of elements of transport and power engineering, which differ in view of dynamic properties of materials, have been further developed; this allows obtaining refined results for assessing the strength at impact and pulse loads;

- for the first time the stress distribution obtained for the dependences of impact velocity on spatial and temporal coordinates in the elements of constructions

in the structural elements, which are investigated from different materials, are distinguished by a clear definition of zones with high gradients of stresses and deformations, which allowed to obtain a substantiation for the construction of improved gride;

- for the first time, new features of the process of high-rate deformation for elements of the gas turbine engine corps at local loads were discovered, which, in contrast to the existing ones, allows us to determine the formation of craters and to investigate the process of unloading with the emergence of residual stresses and damages;

- the new patterns of distribution of stresses and deformations in the three-layer element for certain layers were determined depending on the speed of the projectile, which allowed to formulate practical recommendations on the characteristics of the protective elements of light-armored machinery.

The results of the investigations make it possible to reveal the dynamic strength of the structural elements of modern technology, under the action of a local shock load. The results were applied and implemented in the determination of the dynamic strength of lining vehicles (modern locomotives), shock loads of gas turbine engine corps, compressors at Gas Turbine Research & Production Complex Zorya-Mashproekt and Ivchenko-Progress State Enterprise, which is documented.

In the thesis a review of the works in which the foundations of physical models and analysis of the processes of high-rate deformation of structural elements are laid. Data on various models of high-rate elastic-plastic deformation and their development are presented. A description is given of the deformation features of the material under intense pulsed loading such as: a wide range of stress intensity, a high-rate of load variation under intensive loading, the nonstationary nature of the stress-strain state. The results of theoretical and experimental studies of both domestic and foreign authors are analyzed.

The necessity of using three-dimensional mathematical models for the analysis of the dynamic stress-strain state of structures in the case of local shock loads is substantiated in the work. The features of the construction of finite element models

for the problem of high-rate deformation of structural elements under the action of local shock loads are shown. The thesis uses a dynamic version of the theory of plastic deformations. The equations given for stress components are determined depending on the stage of deformation (elastic or elastoplastic), and reflect the physical nonlinearity of the problem (Perzyna, Pierce, Johnson-Cook). In the case of intense local loads, the assumption of small displacements and deformations is unacceptable. Dependencies are presented for finite deformations and displacements, which reflect the geometric nonlinearity of the problem.

Numerical calculations are performed using a variant of the finite element method, which takes into account the specifics of this process. The thesis provides test calculations for determining the stress-strain state of the elements under impact loading. The numerical results of elastic-plastic deformation of a cylindrical impactor when interacting with an absolutely rigid obstacle are obtained.

To evaluate the reliability of the model, the numerical results of the impact of a shock wave on a plate with a cut are compared with experimental data, obtained at the Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The features of the deformed state of the plate near the tip of the cut, along the edges of the cut and at the boundaries of rigid pinching are shown. A good correspondence of the numerical and experimental results along the lines located near the top of the cut and above the top of the cut is shown.

The influence of dynamic properties of materials on the development of the process of high-rate elastic-plastic deformation of structural elements under intense shock loads is considered. For comparison, the effect of impactor on rectangular element of a steel structure with a given speed is considered, in various ways of taking into account the dynamic properties of material. The attempt to solve the problem in an elastic formulation with increasing intensity of the load leads, as expected, to a higher maximum stresses with a low estimate of displacement.

The practical problem of determining the stress-strain state of the vehicle lining element under the action of a cylindrical impactor is considered.

The analysis of the effect of a local shock load acting at different angles on the gently sloping element of the vehicle lining is carried out. The angles of impact at which the maximum stresses appear are revealed.

The stress-strain state of structural elements made of various materials is compared to evaluate the necessary dynamic strength of elements for a given thickness and weight.

A number of practical problems of analyzing the stress-strain state of the elements of the gas turbine engine corps under shock loading are considered which differ in the purpose, geometric characteristics and properties of the materials. In some cases, preference is given to two-layer structures, since they resist shock loads better, than single-layer ones with a larger thickness of the same material.

Specific features of the stress-strain state of a two-layer metal-polymer wheel of a power wave transmission are determined.

The resistance of a three-layer element of two thin layers of a titanium alloy Ti6Al4V and an average ceramic layer is considered. It is shown that the three-layer construction is well resists impact loads. The regularities of the development of the maximum dynamic stresses in the top layer of titanium alloy and in the ceramic layer, depending on the impact speed are obtained.

Key words: high-rate deformation, impact loads, dynamic properties of materials, stress-strain state, finite element method, elastic-plastic deformation three-dimensional model.

List of publisher publications

1. Ovcharova N.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalloplastikovogo koleasa silovoy volnovoy zubchatoy peredachi pod deystviyem generatora / Yu.S. Vorob'yev, A.G. Priymakov, N.Yu. Ovcharova, T.Yu. Yevchenko // *Vísnik Kharkívs'kogo natsíonal'nogo tekhníchnogo uníversitetu síl's'kogo gospodarstva ímení Petra Vasilenka.* – Kharkív: KHNTUSG. – 2012. Vyp. 128. – S. 268 – 271.

2. Ovcharova N.Yu. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov konstruktsiy pod deystviyem lokal'nykh udarnykh nagruzok /

Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // *Metody resheniya prikladnykh zadach mekhaniki deformiruyemogo tela.* – Dnipro: Lira. – 2012. Vyp. 13. – S. 86–91.

3. Ovcharova N.Yu. Lokal'noye udarnoye vozdeystviye na tsilindricheskiye elementy konstruktsiy. / N.Yu. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya.* – Khar'kov: NAKU «KHAI». – 2012. – № 10 (97). – S. 29 – 32.

4. Ovcharova N.Yu. Dinamika i statika metalloplastikovogo koleasa silovoy volnovoy zubchatoy peredachi / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova, T.Yu. Yevchenko // *Vísnik Kharkívs'kogo natsíonal'nogo tekhníchnogo uníversitetu síl's'kogo gospodarstva ímení Petra Vasilenka.* – Kharkív: KHNTUSG. – 2013. Vyp. 139. – S. 337 – 341.

5. Ovcharova N.Yu. Vliyaníye udarnykh nagruzok na skorostnoye deformirovaniye elementov korpusa GTD / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // *Vestnik dvigatelestroyeniya.* – Zaporozh'ye: AO «Motor Sich». – 2013. № 2. – S. 209 – 213.

6. Ovcharova N.YU. Dinamika elementov konstruktsiy pri udarnykh nagruzkakh / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova. // *Víbratsíí v tekhnítsí ta tekhnologíyakh.* – Vínitsya: VNAU. – 2014. – № 2 (74). – S. 5 – 11.

7. Ovcharova N.Yu. Vliyaníye dinamicheskikh svoystv materiala na skorostnoye deformirovaniye elementov konstruktsiy / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // *Vísnik Zaporíz'kogo natsíonal'nogo uníversitetu.* – Zaporízhzhya: ZNU. – 2015. – № 1. – S. 12 – 22.

8. Ovcharova N.Yu. Vozdeystviye udarnoy volny na pryamougol'nyu plastinu s razrezom / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova, / *Víbratsíí v tekhnítsí ta tekhnologíyakh.* – Vínitsya: VNAU.– 2015. – № 4 (80). – S. 5 – 9.

9. Ovcharova N.Yu. Skorostnoye deformirovaniye mnogoslonykh elementov pri kontaktnom vozdeystvii / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // *Tekhníchna mekhaníka.* – Dnipro: ÍTM NAN Ukraíni í DKA Ukraíni. – 2016. – № 3. – S. 17 – 24.

10. Ovcharova N.Y. FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // *Applied*

Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. – 2014. – Vol. 566. – P. 499 – 504.

11. Ovcharova N. Sensitivity of high strain rate of structural elements in relation to dynamics properties of material. / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // European Physical Journal Web of Conferences. – 2015. – Vol. 94. – P. 1 – 3.

12. Ovcharova N. The Resistance of Structural Elements to Impact and Shock-wave Load / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova / Key Engineering Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd.–2016.–Vol. 715.–pp. 216–221.

13. Ovcharova N.Yu. Analiz skorostnogo deformirovaniya elementov konstruktsiy na osnove MKE / Yu. Vorob'yev, M. Chernobryvko, N. Ovcharova // Programy MES we wspomaganiiu analizy, proektowania i wytwarzania: X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Streszczenia (Kazimir Dolny, 13-16 listopada 2007). – 2007. – P. 143 – 144.

14. Ovcharova N.Yu. Analiz udarnogo vozdeystviya na korpus GTD / Yu.S. Vorob'yev, N.Yu. Ovcharova // Sovershenstvovaniye turbostanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya: Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. – Khar'kov: IPMash, 2012. – S. 1 – 7.

15. Ovcharova N.Yu. Ispol'zovaniye MKE dlya analiza vozdeystviya lokal'nykh udarnykh nagruzok na tsilindricheskiye elementy konstruktsiy. / Impul'snyye protsessy v mekhanike sploshnykh sred / N.Yu. Ovcharova, Yu.S. Vorob'yev // materialy KH Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii 19 – 22 avgusta 2013, Nikolayev 2013. – S. 194 - 197.

16. Ovcharova N.Yu. Analiz dinamicheskoy prochnosti korpusov GTD pri udarnykh nagruzkakh / N.Yu. Ovcharova // Sovershenstvovaniye turbostanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya: Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. – Khar'kov: IPMash, 2015. – S. 1 – 9.

17. Ovcharova N. Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 4th

International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013 - June 19-22, 2013, Sevastopol, Ukraine, P. 351 – 356.

18. Ovcharova N. Computer analysis of high-rate deformation of plane and cylindrical structural elements under impact / Iu. Vorobiov, T. Niezgod, L. Kruszka, N. Ovcharova // Proceedings of The XIII Science and Technology Conference (TKI 2014), WAT, Poland – 2014, P. 201 – 202.

19. Ovcharova N. Nonlinear deformation of structure elements from different materials under impulse and shock loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2016 - September 27-30, 2016, Kharkov, Ukraine, P. 406 – 413.

20. Ovcharova N. Dynamics strength analysis of protective structures under local impact loads / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Analysis and Practice of Protective Structures /Proceedings of the 4th International Conference on Protective Structures Beijing, China, 18-21 October 2016. – P. 359 – 367.

21. Ovcharova N. Nonlinear Deformation of Structure Elements from New Materials under Impulse and Shock Loads / N. Ovcharova // International symposium on Advanced Materials and Additive Manufacturing IS-AMAM, Harbin, China, November 27-30, 2016. – P. 13.

22. Ovcharova N.Y. Dynamic Behaviour of Structure Element Under Impact Loads L. Kruszka, Iu.S. Vorobiov and N.Y. Ovcharova / Book of Abstracts «10th Workshop Dynamic Behaviour of Materials and its Applications in Industrial Processes» 24-26 August 2016. - Poznan University of Technology. - Poland. – P. 53 -55.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ І РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ТА УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....	10
1.1 Стан проблеми.....	10
1.2 Огляд експериментальних досліджень.....	13
1.3 Теоретичні дослідження.....	18
Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження.....	32
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПЛОСКИХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.....	35
2.1 Основні особливості процесу швидкісного деформування і вимоги до моделі.....	35
2.2 Математична модель.....	36
2.3 Скінченно-елементна реалізація моделі.....	48
Висновки до розділу 2.....	61
РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПЛОСКИХ ТА ПОЛОГИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	63
3.1 Тестові задачі визначення напружено-деформованого стану елементів при ударному навантаженні.....	63
3.2 Вплив ударної хвилі на прямокутну пластину з розрізом, порівняння чисельних і експериментальних результатів.....	66
3.3 Вплив урахування динамічних властивостей матеріалу.....	72
3.4 Визначення напружено-деформованого стану елемента облицювання при ударному навантаженні.....	78
3.5 Аналіз швидкісного деформування пологого елемента конструкції при ударному навантаженні.....	82

3.6 Визначення напружено-деформованого стану елементів захисних конструкцій з різних матеріалів.....	86
Висновки до розділу 3.....	90
РОЗДІЛ 4 ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	93
4.1 Однорідний матеріал (зіставлення з експериментом).....	93
4.2 Практичні задачі аналізу динамічного напружено-деформованого стану елементів корпусу газотурбінного двигуна.....	101
4.3 Аналіз напружено-деформованого стану двошарового металополімерного колеса силової хвильової передачі.....	108
Висновки до розділу 4.....	112
РОЗДІЛ 5 ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ЗАХИСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ.....	114
5.1 Визначення напружено-деформованого стану багатошарових захисних елементів при ударному навантаженні.....	114
Висновки до розділу 5.....	120
ВИСНОВКИ.....	121
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ.....	141