

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шаповалова Марія Ігорівна

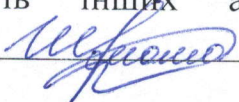
УДК 539.3

ДИСЕРТАЦІЯ
ОЦІНКА ГРАНИЧНОГО СТАНУ ДВОКОМПОНЕНТНОГО МАТЕРІАЛУ З
КУЛЯСТИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ
КОНСТРУКЦІЇ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО І МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ

113 – Прикладна математика
11 – Математика та статистика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 М. І. Шаповалова

*Грештисеність за змістом
з першими присудженнями
дисертації засвідчено*



Науковий керівник:
Водка Олексій Олександрович,
кандидат технічних наук, доцент

Вчений секретар
15.11.2021

Олександр Закозворотний

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Шаповалова М.І. Оцінка граничного стану двокомпонентного матеріалу з кулястими включеннями та прогнозування надійності конструкції методами комп'ютерного і математичного моделювання.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 «Прикладна математика». – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена створенню математичних методів оцінки міцності елементів конструкції на основі аналізу пружних параметрів матеріалу з урахуванням особливостей його внутрішньої мікроструктури; встановленню залежності розподілу включень від їх концентрації на площині зразка використовуючи технологію комп'ютерного зору та обробки зображень структури матеріалу; застосуванню розроблених підходів до оцінки ймовірнісних показників характеристик матеріалу.

Об'єкт дослідження – процес деформування двокомпонентних матеріалів з кулястими включеннями.

Предмет дослідження – ймовірнісні характеристики пружних параметрів, граничного стану, як поверхні плинності, при різноманітній концентрації внутрішніх компонентів матеріалу; статистичний прогноз надійності конструкцій з двокомпонентних матеріалів.

Теоретичною базою дисертації є методи: обробки зображень (фільтрація, сегментація, нормалізація та розпізнаванням об'єктів); механіки твердого деформованого тіла; теорії ймовірностей та випадкових процесів, теорій надійності. Розрахунок НДС статистично-еквівалентних мікроструктур проводився у рамках методу скінченних елементів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

– запропоновано новий розрахунковий підхід для оцінки ймовірнісних параметрів граничного стану двокомпонентного матеріалу з кулястими включеннями. Цей підхід оснований на методі Монте-Карло, та, на відміну від

існуючих, спирається на аналіз статистично-еквівалентних мікроструктур. Він дозволяє прогнозувати залишковий ресурс елементів конструкцій, визначати його ймовірнісні характеристики;

- розроблено алгоритми (основані на методах комп'ютерної обробки зображень) для автоматизованого визначення ймовірнісних характеристик розміру, просторового розподілу та концентрації сферичних включень двокомпонентного матеріалу;

- вперше, за допомогою створених алгоритмів, встановлено функції густини розподілу радіусів включень в залежності від їх концентрації для чавуну марок ВЧ35-ВЧ100 (мікроструктури типу ШГ2-ШГ12). Це дозволило розробити алгоритм синтезу статистично-еквівалентних структур;

- вперше встановлено закономірності впливу концентрації включень на функції густини розподілу (та їх параметри) компонентів тензору жорсткості (зокрема коефіцієнтів взаємного впливу першого та другого порядку) для чавуну марок ВЧ35-ВЧ100 (мікроструктури типу ШГ2-ШГ12);

- вперше встановлено концентраційні залежності математичного очікування, дисперсії та довірчі інтервали границь плину при стисканні та розтяганні для чавуну марок ВЧ35-ВЧ100 (мікроструктури типу ШГ2-ШГ12).

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ роботи присвячений аналізу сучасних підходів до визначення впливу мікроструктури матеріалу на його механічні властивості, та містить огляд наукових публікацій за напрямом роботи. Розглянуто прямі (експериментальні) та розрахункові методи оцінки взаємозв'язку мікроструктури матеріалу та характеристик міцності. Проаналізовано використання методів машинного навчання та комп'ютерного зору при роботі із металографічними зображеннями, для задач класифікації, передбачення та статистичної оцінки впливу внутрішньої структури на властивості матеріалу. Надано стислий опис і

сучасний стан критеріїв міцності механіки суцільного середовища, та методів керованих даними у задачах механіки твердого тіла.

Визначено, що найпоширенішим чисельним методом, який використовується для дослідження напружено-деформованого стану моделей, є метод скінченних елементів (МСЕ). Проведений аналіз наукових напрямів та підходів пов'язаних із задачею ідентифікації параметрів міцності матеріалів на основі їх мікроструктури у тому числі визначення граничного стану, як поверхні плинності — сприяв формулюванню задач дослідження, та опису шляхів побудови методу розрахунку.

У *другому розділі* описані теоретичні основи розв'язання задачі ідентифікації параметрів міцності з використанням даних, отриманих із зображень мікроструктури матеріалу. Включає розгляд технологій, що використовуються при обробці зображень. Описано підходи і методи попередньої обробки вхідного зображення, сегментації, нормалізації та фільтрації із подальшим розпізнаванням об'єктів.

Сформульована загальна математична постановка для аналізу пружних властивостей матеріалу на основі плоскої задачі теорії пружності. Як одним з універсальних методів визначення напружено деформованого стану моделі – розглядається метод скінченних елементів (МСЕ). Це чисельний варіаційно-різницевий метод аналізу технічних конструкцій, прийнятий як стандартний метод дослідження завдяки універсальності та можливості роботи на обчислювальних системах. Увагу приділено формуванню скінченно-елементного підходу до розв'язання задачі класичної теорії пружності. Механічні властивості матеріалу визначаються через коефіцієнти тензора жорсткості. Оцінка міцності реалізована побудовою поверхні плинності матеріалу. Для визначення граничного стану матеріалу розглянуті існуючі гіпотези міцності композиційних матеріалів, та проведено модифікацію критеріїв для врахування різного супротиву матеріалу при розтягуючих та стискаючих напруженнях.

У *Третьому розділі* описаний процес штучної генерації статистично-еквівалентної мікроструктури, що за основу бере металографічні знімки

високоміцного чавуну з кулястими включеннями. Описано алгоритм отримання функції розподілу включень на площині та процес побудови штучної мікроструктури на основі математичного очікування та дисперсії радіусів включень в залежності від їх концентрації.

На основі отриманих моделей, для розрахунку складного напруженого стану при одночасній дії розтягуючих і зсувних навантажень, використовується серія віртуальних експериментів. Пружні константи матеріалу визначаються з використанням МСЕ із серії тестів на одновісний розтяг уздовж X координати, Y координати, одночасний розтяг уздовж X та Y координатних осей, та зсув у площині XY . Отримано ймовірнісні характеристики модуля пружності, коефіцієнту Пуассона та модуля зсуву. Проведена перевірка отриманих результатів дослідження на достовірність, та надано результати з верифікації методу розрахунку. За допомогою тесту Шапіро-Вілкі, перевірено гіпотези щодо нормального розподілу параметрів включень на площині.

Четвертий розділ спрямований на визначення параметрів плинності матеріалу. На основі скінченно-елементних моделей проведені дослідження матеріалу при складному напруженому стані на плоских моделях. Визначені поверхні плинності для серії випробувань. Використано метод аналізу переходу матеріалу з пружного в пластичний стан застосовуючи ймовірнісні характеристики поверхонь плинності. Визначені статистичні параметри границі плину, як: математичне очікування, дисперсія та коефіцієнт варіації випадкової величини. Аналіз отриманих даних показує вплив концентрації включень на характеристики міцності матеріалу.

У *П'ятому розділі* здійснено оцінку параметрів надійності та залишкового ресурсу насосу відцентрового типу, при нормальних умовах експлуатації та при гідровипробуваннях. Враховано зменшення товщини стінок корпусних деталей від ерозійно-корозійного зносу. На основі розробленої математичної моделі, проводиться оцінка поверхні плинності матеріалу корпусних деталей насоса з використанням даних його властивостей, отриманих у попередньому розділі. Аналіз конструкції проведено на макро- та мікрорівні. Виникнення пластичних

деформацій на мікрорівні може призвести до розвитку тріщини та структурних руйнувань на макрорівні. У результаті дослідження визначена ймовірність виникнення пластичної деформації у контрольних точках, та встановлені зони, що вимагають ретельного контролю протягом усього терміну експлуатації обладнання.

У *Висновках* зазначено науково-практичні задачі, що були розв'язані в роботі, викладені найбільш важливі наукові та практичні результати, надані відомості щодо впровадження результатів дослідження.

Ключові слова: високоміцний чавун, мікроструктура, обробка зображень, комп'ютерне моделювання, МСЕ, механічні властивості матеріалу, анізотропія, поверхня плинності, надійність, граничний стан.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Шаповалова М. І., Водка А. А. Методи розпознавання мікроструктури матеріала. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях.* Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 23 (1245). С. 56–61.

2. Шаповалова М. І., Водка О. О. Комп'ютерні методи побудови параметричних статистично еквівалентних моделей мікроструктури високоміцного чавуну для аналізу його пружних характеристик. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2019. Т. 6, № 1. С. 179–187.

3. Shapovalova M., Vodka O. Computer method of determining the yield surface of variable structure of heterogeneous materials based on the statistical evaluation of their elastic characteristics. In: Chaari F., Leskow J., Wylomanska A., Zimroz R., Napolitano A. (eds) *Nonstationary Systems: Theory and Applications. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring, Springer, Cham.* 2022. Vol. 18. P. 378–392.

4. Shapovalova M., Vodka O. Application of data-driven yield surface to prediction of failure probability for centrifugal pump. In: Altenbach H., Amabili M.,

Mikhlin Y.V. (eds) *Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials, Springer, Cham*. 2021. Vol. 157. P. 295–309.

5. Шаповалова М. І., Водка О. О. Дворівневі математичні моделі визначення напруженого стану та ресурсу пластини з отвором. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. № 1. С. 55–60.

6. Шаповалова М. И., Водка А. А. Компьютерные методы моделирования синтетической структуры высокопрочного чугуна для статистической оценки его механических свойств и прочностных характеристик. *Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический сборник*. Белорусский национальный технический университет; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). Минск : БНТУ, 2020. Вып. 35. С. 257–264.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Шаповалова М. И., Водка А. А. Методы распознавания микроструктуры материала: *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2017, 17-19 травня 2017р.: у 4 ч. Ч. I. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. С. 86.*

8. Шаповалова М. И., Водка А. А. Разработка алгоритмов сегментации изображений, полученных в результате оцифровки фотокаталогов: *Інформатика, управління та штучний інтелект: матеріали 4-ї міжнар. наук.-техн. конф. студентів, магістрів та аспірантів*. Харків, 21-23 жовтня 2017р. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. С. 106.

9. Шаповалова М. І., Водка О. О. Один из методов извлечения графических изображений расположенных на одном листе. *XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів: матеріали конф.*, 17-20 квітня 2018 р. : у 3 ч. Ч. 1., за ред. проф. Є.І. Сокола. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. С. 159.

10. Шаповалова М. І. Визначення складу сталі, виходячи із даних мікроструктурного аналізу. *Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми механіки та математики»: збірник наукових праць*, 22–25 травня 2018 р. : у 3-х т. Т. 1., Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 2018. С. 141.
11. Шаповалова М. И., Водка А. А. Алгоритм определения химического состава стали по изображению его микроструктуры: *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018*, 16-18 травня 2018р.: у 4 ч. Ч. I. за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. С. 76.
12. Shapovalova M., Vodka O. Image microstructure estimation algorithm of heterogeneous materials for identification their chemical composition. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 – Proceedings*, 2–6 July 2019, Lviv, Ukraine, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 975–979.
13. Kelin A., Larin O., Naryzhna R., Trubayev O., Vodka O., Shapovalova M. Estimation of residual life-time of pumping units of electric power stations. *IEEE XIV International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2019 – Proceedings*, 17–20 September 2019, Lviv, Ukraine, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 153–159.
14. Kelin A., Larin O., Naryzhna R., Trubayev O., Vodka O., Shapovalova M. Mathematical modelling of residual lifetime of pumping units of electric power stations. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2020. P. 271–288.
15. Шаповалова М., Водка О. Метод синтетичного моделювання структури високоміцного чавуну з подальшим аналізом властивостей матеріалу. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій / Тези доповідей Другої міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження)*, 10–12 жовтень 2019 р.: Дніпро: Дніпровський національний університету ім. Олеся Гончара. 2019. С. 233–234.

16. Shapovalova M., Vodka O. Statistical analysis of the probabilistic spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics. *IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2020»*, 5-7 October 2020. : Ukraine, Vinnytsia, VNTU. 2020. P. 107.

17. Шаповалова М. І., Водка О. О. Визначення поверхні пластичності гетерогенного матеріалу на основі аналізу статистично еквівалентної мікроструктури. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : наук. вид. : тези доп. 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2020, 28–30 жовтня 2020 р. : у 5 ч. Ч. І. за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». С. 96.*

18. Shapovalova M., Vodka O. A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2021. P. 565–576.

19. Шаповалова М. І., Водка О. О. Підхід керований даними для визначення поверхні текучості матеріалу на основі його мікроструктури. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : наук. вид. : тези доп. 29-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2021, 18–20 травня 2021 р. : у 5 ч. Ч. І. за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. С. 81.*

ABSTRACT

Shapovalova M.I. Evaluation of the limiting state of a two-component material with spherical inclusions and predicting the reliability of the structure by methods of computer and mathematical modeling. – Manuscript.

Thesis for obtaining the philosophy doctor scientific degree on the specialty 113 “Applied mathematics”. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2021.

The PhD work devoted to the creation of mathematical methods for assessing the strength of structural elements based on the analysis of the elastic material parameters, taking into account the features of its internal microstructure; determining the dependence of the inclusions distribution from their concentration on the sample plane using computer vision and image processing technology of the material structure; application of developed approaches to the estimation of the probabilistic features of material characteristics.

The object of research is the deformation process of two-component materials with spherical inclusions.

The subject of research is the probabilistic characteristics of elastic parameters, the limiting state, as a yield surface, at various concentrations of the internal components of the material; statistical forecast of the reliability of structures made of two-component materials.

The theoretical basis of the PhD work is the following methods: image processing (filtration, segmentation, normalization, and object recognition); solid mechanics, probability theory, theory of random processes. The calculation of the stress-strain state is carried out using the finite element method.

The scientific novelty of the dissertation work consists of the following ones:

- a new computational approach is proposed for assessing the probabilistic parameters of the boundary state of a two-component material with spherical inclusions. This approach is based on the Monte Carlo method and, in contrast to the existing ones, is based on the analysis of statistically equivalent microstructures. It allows predicting the residual life of structural elements, determining its probabilistic characteristics;

- algorithms (based on methods of computer image processing) have been developed for the automated determination of the probabilistic characteristics of the size, spatial distribution, and concentration of spherical inclusions of a two-component material;

- for the first time, using the created algorithms, the distribution density functions of the radii of the inclusions were determined depending on their concentration for cast iron (microstructures of the ShG2-ShG12 type). This made it possible to develop an algorithm for the synthesis of statistically equivalent structures;

- for the first time, the regularities of the influence of the concentration of inclusions on the distribution density functions (and their parameters) of the components of the stiffness tensor (including the coefficients of mutual influence of the first and second-order) are established for cast iron (microstructures of the ShG2-ShG12 type);

- for the first time, concentration dependences of the mathematical expectation, dispersion, and confidence intervals of the flow boundaries under compression and tension are established for cast iron (microstructures of the ShG2-ShG12 type).

The introduction contains the relevance of the chosen topic, objectives, subject and research methods, scientific novelty, and the practical significance of the work.

The first section of the work contains the analysis of modern approaches to determining the influence of the material microstructure on its mechanical properties and a review of scientific publications on the topic of work. The analysis of experimental and analytical methods of the material microstructure influence on its strength characteristics is carried out. The machine learning and computer vision methods for metallographic images classification, prediction, and statistical assessment of the internal structure influence on material properties are considered. The current state of strength criteria and data-driven methods in problems of solid mechanics is described.

It is determined that the most common numerical method, that used to study the stress-strain state of models is the finite element method (FEM). The analysis of scientific directions and approaches related to the task of identifying the strength

parameters of materials based on their microstructure, including the determination of the yield surface, contributed to the formulation of research tasks and the description of ways of building a calculation method.

The second section describes the theoretical basis for solving the problem of identifying strength parameters using data obtained from material microstructure images. Including consideration of techniques used in image processing. Approaches and methods of input image pre-processing, segmentation, normalization, and filtering with further object recognition are described.

A general mathematical statement is formulated for analyzing the elastic properties of a material based on plane stress elasticity theory. The finite element method is used to determine the stress-strain state of the model. This is a numerical variation-difference method for analyzing technical structures, which is a standard research method due to its versatility and ability to work on computing systems. Attention is paid to the formation of a finite-element approach for solving the problem of the classical theory of elasticity. The mechanical properties of the material are determined through the stiffening tensor coefficients. Strength assessment is implemented by the construction of material yield surface. To determine the limit state of material existing hypotheses of the strength of the composite material are considered and modified to take into account different resistance to tensile and compressive stresses.

The third section describes the process of artificially generating a statistically equivalent microstructure, which is based on metallographic images of high-strength cast iron. An algorithm for obtaining the function of inclusion distribution in-plane and process of artificial microstructure construction based on mathematical expectation and dispersion of inclusion radii depending on their concentration is described.

Based on the obtained models, a series of virtual experiments is used to calculate the complex stress state with the simultaneous action of tensile and compressive loads. Elastic material constants are determined using FEM from the series of tests for uniaxial stretching along with X coordinates, Y coordinates, simultaneous stretching along X and Y coordinate axes, and displacement in the XY plane. Probabilistic characteristics of

elasticity modulus, Poisson coefficient, and shear modulus are obtained. The obtained results of the study are verified for reliability. For testing the hypotheses about the normal distribution of the inclusion parameters on the plane the Shapiro-Wilk test is used.

The fourth section is aimed to determine the yield parameters of the material. Materials research is carried out in a complex stress state using the finite element method on plane models. The yield surfaces for the test series have been determined. The research of the transition of a material from an elastic to a plastic state based on the entire set of probabilistic characteristics of the yield surfaces is used. The statistical parameters of the yield stress are determined by the mathematical expectation, variance, and coefficient of variation. Analysis of the obtained data shows the effect of the inclusions concentration on the strength characteristics of the material.

In the fifth section, the reliability parameters of the centrifugal pump are evaluated (under normal operating conditions and during hydro tests), taking into account the decrease in wall thickness of the housing parts from erosion-corrosion wear. Based on the developed mathematical model, the yield surface of the parts of the pump is evaluated using the material properties data obtained in the previous section. Structural analysis is carried out at the macro- and micro-levels. The occurrence of plastic deformations at the micro-level can lead to the development of a crack and structural damage at the macro level. As a result of the study, the probability of plastic deformation at control points is determined, and areas that require careful control during the entire life of the equipment are established.

The conclusion indicates the scientific and practical problems that are solved in the work, outlines the most important scientific and practical results provided by the information on the implementation of the research results.

Keywords: cast iron, microstructure, image processing, computer modeling, FEM, mechanical properties, anisotropy, yield surface, reliability, limit state.

LIST OF APPLICANT PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Shapovalova M. I., Vodka A. A. Metody raspoznavaniya mikrostruktury materiala. *Visnik NTU «KHPI». Seriya: Novi rishennya u suchasniy tehnologiyah.* Kharkiv : NTU «KHPI», 2017. No. 23 (1245). P. 56–61.

2. Kelin A., Larin O., Naryzhna R., Trubayev O., Vodka O., Shapovalova M. Mathematical modelling of residual lifetime of pumping units of electric power stations. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer. 2020. P. 271–288.

3. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Komp'yuterni metodi pobudovi parametrichnih statistichno ekvivalentnih modelej mikrostrukturi visokomicnogo chavunu dlya analizu jogo pruzhnykh harakteristik: *Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I. Vernadskogo. Seriya: Tehnichni nauki.* 2019. Vol. 6, No. 1. P. 179–187.

4. Shapovalova M., Vodka O. A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2021. P. 565–576.

5. Shapovalova M., Vodka O. Application of data-driven yield surface to prediction of failure probability for centrifugal pump. In: Altenbach H., Amabili M., Mikhlin Y.V. (eds) *Nonlinear Mechanics of Complex Structures. Advanced Structured Materials*, Springer, Cham. 2021. Vol. 157. P. 295–309.

6. Shapovalova M., Vodka O. Computer method of determining the yield surface of variable structure of heterogeneous materials based on the statistical evaluation of their elastic characteristics. In: Chaari F., Leskow J., Wylomanska A., Zimroz R., Napolitano A. (eds) *Nonstationary Systems: Theory and Applications. WNSTA 2021. Applied Condition Monitoring*, Springer, Cham. 2022. Vol. 18. P. 378–392.

7. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Dvorivnevi matematichni modeli viznachennya napruzhenogo stanu ta resursu plastini z otvorom. *Visnik NTU «KHPI». Seriya: Dinamika ta micnist mashin.* Kharkiv : NTU «KHPI», 2021. No 1. P. 55–60.

Published works of approbatory character:

8. Shapovalova M. I., Vodka A. A. Metody raspoznavaniya mikrostruktury materiala. *Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezi dopovidej XXV mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2017, 17-19 travnya 2017r.: u 4 ch. Ch. I.* / za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KHPI». 2017. P. 86.

9. Shapovalova M. I., Vodka A. A. Razrabotka algoritmov segmentacii izobrazhenij, poluchennyh v rezultate ocifrovki fotokatalogov. *Informatika, upravlinnya ta shtuchnij intelekt: materialy 4-yi mizhnar. nauk.-tehn. konf. studentiv, magistriv ta aspirantiv.* Kharkiv, 21-23 zhovtnya 2017r. Kharkiv: NTU «KHPI». 2017. P. 106.

10. Shapovalova M. I., Vodka A. A. Algoritm opredeleniya himicheskogo sostava stali po izobrazheniyu ego mikrostruktury. *Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: dop. XXVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2018, 16-18 travnya 2018r.: u 4 ch. Ch. I.* za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KHPI». 2018. P. 76.

11. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Odin iz metodov izvlecheniya graficheskikh izobrazhenij raspolozhennyh na odnom liste. *XII Mizhnarodna naukovo-praktichna konferenciya magistrantiv ta aspirantiv: materialy konf., 17-20 kvitnya 2018 r.: u 3 ch. Ch. 1.,* za red. prof. Ye.I. Sokola. Kharkiv: NTU «KHPI». 2018. P. 159.

12. Shapovalova M. I. Vznachennya skladu stali, vihodyachi iz danih mikrostrukturnogo analizu. *Mizhnarodna naukova konferenciya «Cuchasni problemi mehaniki ta matematiki»: zbirnik naukovih prac, 22–25 travnya 2018 r.: u 3-h t. T. 1.,* Lviv: Institut prikladnih problem mehaniki i matematiki im. Ya.S. Pidstrigacha NAN Ukraini. 2018. P. 141.

13. Shapovalova M., Vodka O. Image microstructure estimation algorithm of heterogeneous materials for identification their chemical composition. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 – Proceedings, 2–6 July 2019, Lviv, Ukraine, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 975–979.*

14. Kelin A., Larin O., Naryzhna R., Trubayev O., Vodka O., Shapovalova M. Estimation of residual life-time of pumping units of electric power stations. *IEEE XIV*

International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2019 – Proceedings, 17–20 September 2019, Lviv, Ukraine, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 153–159.

15. Shapovalova M., Vodka O. Metod sintetichnogo modelyuvannya strukturi visokomicnogo chavunu z podalshim analizom vlastivostej materialu. *Aktualni problemi mehaniki sucilnogo seredovisha i micnosti konstrukcij / Tezi dopovidej Drugoyi mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferenciyi pam'yati akademika NAN Ukrayini V. I. Mossakovskogo (do storichchya vid dnya narodzhennya)*, 10–12 zhovten 2019 r.: Dnipro: Dniprovskij nacionalnij universitetu im. Olesya Gonchara. 2019. P. 233–234.

16. Shapovalova M., Vodka O. Statistical analysis of the probabilistic spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics. *IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies «PHOTONICS-ODS 2020»*, 5-7 October 2020. : Ukraine, Vinnytsia, VNTU. 2020. P. 107.

17. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Vznachennya poverhni plastichnosti geterogennogo materialu na osnovi analizu statistichno ekvivalentnoyi mikrostrukturi. *Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya : nauk. vid. : tezi dop. 28-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2020*, 28–30 zhovtnya 2020 r. : u 5 ch. Ch. I. za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KHPI». P. 96.

18. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Pidhid kerovanij danimi dlya viznachennya poverhni tekuchosti materialu na osnovi jogo mikrostrukturi. *Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya : nauk. vid. : tezi dop. 29-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2021*, 18–20 travnya 2021 r. : u 5 ch. Ch. I. za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KHPI». 2021. P. 81.

Published works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

19. Shapovalova M. I., Vodka A. A. Kompyuternye metody modelirovaniya sinteticheskoy struktury vysokoprochnogo chuguna dlya statisticheskoy ocenki ego mehanicheskikh svoystv i prochnostnykh harakteristik. *Teoreticheskaya i prikladnaya mehanika : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik. Belorusskij nacionalnyj tehnikeskij universitet; redkol.: Yu. V. Vasilevich (pred. redkol., gl. red.)*. Minsk : BNTU, 2020. Vyp. 35. P. 257–264.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОСТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ НА ЙОГО МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ...	11
1.1 Експериментальні методи оцінки мікроструктури матеріалу.....	11
1.2 Використання методів машинного навчання та комп'ютерного зору для оцінки мікроструктури матеріалу	18
1.3 Розрахунково-експериментальні методи визначення механічних характеристик матеріалу.	23
1.4 Методи керовані даними у задачах механіки твердого тіла.....	31
Висновки до розділу та постановка задачі дослідження	33
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ	36
2.1 Обробка зображень мікроструктури	36
2.2 Визначення напружено-деформованого стану мікроструктури.	43
2.3 Критерій плинності.....	50
Висновки до розділу	56
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ.....	57
3.1 Обробка зображень мікроструктури високоміцного чавуну.....	57
3.2 Генерація статистично-еквівалентної штучної мікроструктури високоміцного чавуну.....	64
3.3 Скінченно-елементний аналіз напруженого стану досліджуваної мікроструктури	67
3.4 Перевірка нормальності розподілу пружних констант	78
3.5 Оцінка похибок отриманих результатів	80
3.5.1 Оцінка похибок при моделюванні методом скінченних елементів.....	80
3.5.2 Оцінка репрезентативності вибраного об'єму.....	83
Висновки до розділу.	85
РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНІ ПЛИННОСТІ	86
4.1 Загальні положення визначення поверхні плинності матеріалу	86
4.2 Визначення поверхні плинності на основі критерію Мізеса.....	89
4.3 Визначення поверхні плинності на основі критерію Цай-Ву.....	92

4.4 Визначення ймовірнісних характеристик поверхонь плинності	94
Висновки до розділу	102
РОЗДІЛ 5 ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНОЇ ДАНИМИ ПОВЕРХНІ ПЛИННОСТІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ.....	104
5.1 Аналітичний метод оцінки запропонованого алгоритму прогнозування надійності конструкції на основі задачі Кірша.....	104
5.2 Прогнозування надійності насосу відцентрового типу	107
5.3 Оцінка похибок отриманих результатів	120
Висновки до розділу	122
ВИСНОВКИ.....	124
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТОК А.....	143
ДОДАТОК Б	148
ДОДАТОК В	150
ДОДАТОК Г	155