

М. І. ШАПОВАЛОВА, О. О. ВОДКА

ДВОРІВНЕВІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА РЕСУРСУ ПЛАСТИНИ З ОТВОРОМ

Сучасні тенденції розвитку машинобудування та інших галузей, пов'язаних з виробництвом матеріалів та конструкцій із заданим комплексом фізико-механічних та технологічних властивостей – спрямовані на зниження матеріалоемності, енерговитрат, підвищення точності, надійності та конкурентоспроможності виготовленого продукту. Тому створення математичних методів оцінки напруженого стану елементів конструкції на основі аналізу пружних характеристик матеріалу з урахуванням особливостей його внутрішньої мікроструктури є актуальною задачею. Алгоритм, що розглядається, включає наступні етапи: ідентифікація параметрів міцності з використанням даних, отриманих із зображень мікроструктури матеріалу; вивчення напружено деформованого стану моделі на основі варіаційно-різницевого методу скінченних елементів; формування система лінійних алгебраїчних рівнянь для вирішення задачі аналізу пружних властивостей матеріалу використовуючи плоску задачу теорії пружності; побудова поверхні текучості матеріалу для серії випробувань спираючись на критерії міцності композиційних матеріалів, які враховують різний супротив матеріалу при розтягуючих та стискаючих навантаженнях. На основі розробленої математичної моделі проводиться оцінка НДС та поверхні текучості пластинки з отвором. Аналіз конструкції проводиться на макро та мікро рівні. Виникнення пластичних деформацій на мікрорівні може призвести до розвитку тріщин та структурних руйнувань на макрорівні. У результаті дослідження визначена ймовірність виникнення пластичної деформації у пластині, та встановлені критичні зони моделі, які потребують ретельного контролю. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні підходу для оцінки механічних властивостей матеріалу, таких як модуль пружності, зсуву, коефіцієнта Пуассона, та їх ймовірнісних характеристик відповідно до внутрішньої структури; а також у аналізі коефіцієнтів взаємного впливу другого роду – такий підхід сприяє розширенню знання про матеріал та дозволяє збільшити кількість корисної інформації отриманої шляхом його моделювання. Для оцінки ймовірності виникнення пластичних деформацій запропонований метод, що працює не у детермінованій постановці, а використовує весь набір ймовірнісних характеристик поверхні текучості.

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

Современные тенденции развития машиностроения и других отраслей, связанных с производством материалов и конструкций с заданным комплексом физико-механических и технологических свойств - направлены на снижение материалоемкости, энергозатрат, повышению точности, надежности и конкурентоспособности произведенного продукта. Поэтому создание математических методов оценки напряженного состояния элементов конструкции на основе анализа упругих характеристик материала с учетом особенностей его внутренней микроструктуры является актуальной задачей. Рассматриваемый алгоритм включает следующие этапы: идентификация параметров прочности с использованием данных, полученных из изображений микроструктуры материала; изучение напряженно деформированного состояния модели на основе вариационно-разностного метода конечных элементов; формирование система линейных алгебраических уравнений для решения задачи анализа упругих свойств материала используя плоскую задачу теории упругости; построение поверхности текучести материала для серии испытаний опираясь на критерии прочности композиционных материалов, учитывающих различные сопротивления материала при растягивающих и сжимающих нагрузках. На основе разработанной математической модели проводится оценка НДС и поверхности текучести пластинки с отверстием. Анализ конструкции производится на макро- и микро- уровне. Возникновение пластических деформаций на микроуровне может привести к развитию трещин и структурных разрушений на макроуровне. В результате исследования, определена вероятность возникновения пластической деформации в пластине, а так же установлены критические зоны модели, которые требуют тщательного контроля. Практическое значение полученных результатов заключается в создании подхода к оцениванию механических свойств материала, таких как модуль упругости, модуль сдвига, коэффициента Пуассона, и их вероятностных характеристик в соответствии с внутренней структурой исследуемого образца. Более того, предложенный подход включает анализ коэффициентов взаимного влияния второго рода, что способствует расширению знания о материале и позволяет увеличить количество полезной информации полученной путем его моделирования. Для оценки вероятности возникновения пластических деформаций предложенный метод, работает не в детерминированной постановке, а использует весь набор вероятностных характеристик поверхности текучести.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, микроструктура, обработка изображений, компьютерное моделирование, МСЭ, механические свойства материала, поверхность текучести, ресурс

Modern trends in the development of mechanical engineering and other industries related to the production of materials and structures with a given set of physical, mechanical, and technological properties are aimed at reducing material consumption, energy consumption, increasing accuracy, reliability, and competitiveness of the manufactured product. Therefore, the creation of mathematical methods for assessing the stress state of structural elements based on the analysis of the elastic characteristics of a material, taking into account the peculiarities of its internal microstructure, is an actual task. The considered algorithm includes the following stages: identification of strength parameters using data obtained from images of the material microstructure; study of the stress-strain state of the model based on the variational-difference finite element method; formation of a system of linear algebraic equations for solving the problem of analyzing the elastic properties of a material using the plane problem of the theory of elasticity; construction of the material yield surface for a series of tests based on the strength criteria of composite materials, taking into account the different resistance of the material under tensile and compressive loads. Based on the developed mathematical model, the SSS and the yield surface of the plate with a hole are estimated. Structural analysis is performed at the macro and micro levels. The occurrence of plastic deformations at the micro-level can lead to the development of cracks and structural damage at the macro level. As a result of the study, the probability of plastic deformation in the plate is determined, and the critical zones of the model are established. The practical significance of the results obtained is to create an approach to assessing the mechanical properties of a material, such as elastic modulus, shear modulus, Poisson's ratio, and their probabilistic characteristics following the internal material structure. The proposed approach contributes to the expansion of knowledge about the material and allows to increase the valuable information obtained by modeling. To assess the probability of plastic deformations, the generated method uses the entire set of probabilistic characteristics of the yield surface.

Keywords: cast iron, microstructure, image processing, computer simulation, FEM, mechanical properties, yield surface, resource.

Вступ. Серед традиційних методів визначення характеристик матеріалу виділяють експериментальні дослідження, що пов'язані з істотними матеріальними та часовими витратами. Альтернативою таким

підходам стає використання математичних моделей та методів аналізу об'єктів на всіх стадіях створення нових та вдосконаленні існуючих технологій. Розвиток обчислювальної техніки та програмного

забезпечення, сприяв перетворенню математичного моделювання у потужний інструмент наукових досліджень. Проблемі оцінки механічних властивостей матеріалу приділено багато уваги у роботах закордонних та вітчизняних науковців. Врахування усієї доступної інформації при проведенні аналізу механічних властивостей мікроструктури матеріалу, дозволяє отримувати та аналізувати дані на різних масштабних рівнях. Металографічний аналіз [1] є одним з найпоширеніших методів дослідження мікроструктури матеріалу, що дозволяє одночасно контролювати цілий ряд фізико-механічних властивостей зразка. Для прямих методів дослідження зразка, характерні проведення експериментів з прикладанням механічного навантаження [2] чи температури [3, 4]. У роботах [5, 6] автори аналізують розмір зерна металу, розкид цих розмірів та ступінь анізотропії, орієнтацію зерен у просторі, та інше. За результатами експериментів аналізуються показники міцності, пружності, пластичності та робиться висновок, який вплив відіграє відповідна мікроструктура на: розвиток тріщини [7], фазовий склад [8], морфологію, та твердість досліджуваного зразка [9].

В основі розглянутих підходів аналізу внутрішньої будови матеріалу – лежать натурні експерименти, які для кінцевої оцінки властивостей зразка потребують наявності кваліфікованих матеріалознавців. З іншого боку, створення алгоритмів інтелектуальної підтримки прийняття рішення в області аналізу мікроструктури, сприяла формуванню напрямку досліджень об'єднаних застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання. Сучасні підходи при роботі з технологією та методами комп'ютерного зору описані в роботах Форсайта Д., Шапіро Л., Стокмана Дж. [10, 11]. Розпізнавання образів зображень використовується для широкого класу задач в усіх областях діяльності людини. У тому числі такі методи застосовуються при роботі із матеріалами та їх мікроструктурою для: класифікації структури за відповідними ознаками [12, 13]; оцінки кількості дефектів (вироджених графітових вузликів [14]); сегментації складних мікроструктур [15], знаходження розмірів частинок та розподілу їх по площині.

Оцінка технічного стану конструкцій в процесі експлуатації базується на результатах детального вивчення напружено-деформованого стану та міцності їх відповідальних елементів. Розрахунки на міцність сприяють встановленню рівню експлуатаційних навантажень, при яких гарантується безпечна робота машин і конструкцій. Механіка композитів базується на класичній механіці суцільного середовища, та для дослідження міцності матеріалу використовує два основні підходи: структурний та феноменологічний [16]. Феноменологічні підходи аналізу матеріалу дозволяють застосовувати спільні умови міцності для композитів із значною анізотропією властивостей, для яких один і той самий напружений стан може призвести до різних граничних станів у випадку зміни

знаку напружень чи їх орієнтації. За відсутності теплових, часових та інших впливів на матеріал, його руйнування пов'язують із напруженим станом.

Метою донної роботи є створення математичних методів оцінки міцності елементів конструкції на основі аналізу пружних параметрів матеріалу з урахуванням особливостей його внутрішньої мікроструктури; встановлення залежності розподілу включень від їх концентрації на площині зразка використовуючи технологію комп'ютерного зору та обробки зображень структури матеріалу; застосування розроблених підходів до оцінки ймовірнісних показників характеристик матеріалу; побудова моделей та алгоритмів для аналізу переходу мікроструктури у пластичний стан, пошук поверхні текучості з урахуванням можливості штучної генерації внутрішньої структури зразка. Для оцінки ймовірності виникнення пластичних деформацій пластини з отвором використати весь набір ймовірнісних характеристик поверхні текучості.

Постановка задачі. Основне завдання дослідження – побудова дворівневої математичної моделі заснованої на даних про поверхню текучості, для визначення напруженого стану та ресурсу пластини з отвором. Поставлені цілі вимагають виконання таких завдань:

– використовуючи алгоритм попередніх досліджень [17-19] виконати обробку вхідних зображень мікроструктури високоміцного чавуну, встановити функцію розподілу графітових включень на площині, реалізувати побудову штучної структури на основі реальних зображень матеріалу, визначити пружні властивості та напружений стан зразка метод скінченних елементів;

– створити експериментальний набір поверхонь текучості для забезпечення відсутності пластичних деформацій, оцінити вплив концентрації включень при розтягуючих та стискаючих навантаженнях;

– застосувати отримані пружні властивості матеріалу для аналізу напруженого стану та ресурсу пластини з отвором.

Визначення пружних характеристик матеріалу на основі методу обробки зображень.

Запропонована технологія вивчення виникнення пластичних деформацій включає кілька етапів. На першому етапі створюється штучна мікроструктура статистично еквівалентного матеріалу для аналізу напружено-деформованого стану. Генерація штучної мікроструктури здійснюється шляхом встановлення залежності між розміром та концентрацією включень [17-19]. Інформація про кількість та розмір включень, розташованих на площині, збирається за допомогою технології комп'ютерного зору. Отримано залежність математичного очікування $M[R]$ та дисперсії $D[R]$ радіусів включень від концентрації. Встановлено, що розташування центрів включень відповідає рівномірному розподілу, а розмір включень відповідає функції нормального розподілу від концентрації, при

цьому концентрація (ψ) визначається як відношення площі включення до площі зразка. Для даного дослідження $\psi = 0.0255$, що відповідає реальній мікроструктурі високоміцного чавуну ШГ2.

Побудова скінченно-елементної моделі згенерованої мікроструктури відбувається з використанням двовимірної 8-вузлової скінченної елементу з двома ступенями свободи в кожному вузлі [21]. Для розрахунку досліджуваного зразка передбачено, що матриця матеріалу ізотропний ферит, а включення – ортотропний графіт, властивості матеріалів та пружні постійні яких наведені в табл. 1. Результат обробки та розпізнавання включень вихідного зображення мікроструктури високоміцного чавуну (Рис.1, а), та штучно створена статистично еквівалентна мікроструктура, розбита на сітку скінченних елементів, показано на (Рис.1, б).

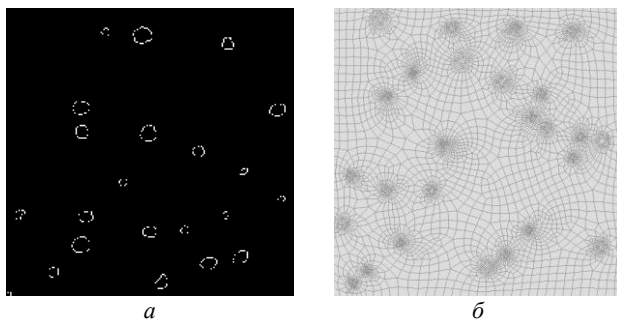


Рис. 1 – Процес дослідження мікроструктури

Таблиця 1 – Механічні властивості матеріалу

Ферит							
E, ГПа		ν		σ _T , МПа			
180		0.35		196			
Графіт							
C ₁₁ , C ₂₂	C ₁₂	C ₁₃ , C ₂₃	C ₃₃	C ₄₄ , C ₅₅	C ₆₆	σ _T , МПа	
						σ _T ⁻	σ _T ⁺
ГПа						МПа	
1060	290	109	46.6	2.3	385	31.9	3.9

Визначення поверхні текучості. Наступним етапом дослідження ресурсу пластини з отвором є розрахунок поверхні текучості для матеріалу на мікрорівні. Важливим завданням аналізу є встановлення умов навантаження, які викликають пластичну деформацію, тобто призводить до переходу від пружності до пластичності. При цьому, для одновісного напруженого стану достатньо мати зв'язок між напруженням та деформацією, що отримують з експериментів на просте розтягування та стиснення. Однак для матеріалів, що знаходяться в багатовимірному напруженому стані прогнозування пластичності пов'язано з низкою технічних труднощів. З одного боку, складність експериментального середовища, а з іншого – величезна кількість зразків, які необхідно протестувати – сприяли розвитку методів комп'ютерного моделювання та створенню віртуальних тестів для аналізу матеріалу.

У роботі, для побудови поверхні текучості, модель розглядається при різних видах навантаження. Один з типових варіантів навантаження для концентрації $\psi = 0.0255$ (що відповідає ШГ2), показаний на Рис. 2.

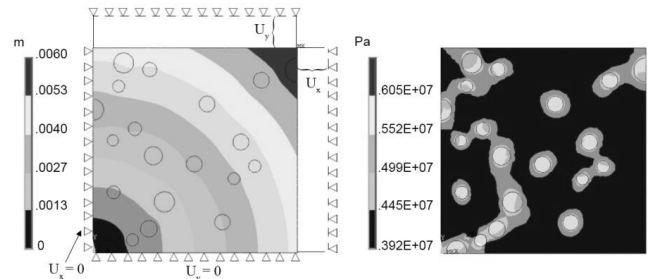


Рис. 2 – Переміщення (м) та еквівалентні напруження по Мізесу (Па) для моделі мікроструктури, $\psi = 0.0255$

У роботі розглядається порівняння двох критеріїв міцності. Один із запропонованих методів комп'ютерного моделювання поверхні текучості в багатовимірному напруженому стані, спирається на гіпотезу теорії максимальної енергії формоутворення (гіпотеза Хубера-Мізеса-Хенкі) [22]. Згідно з якою, деформація зразка в складному напруженому стані виникає, коли питома енергія формоутворення стає рівною або перевищує питому енергію формоутворення матеріалу під дією одновісного напруженого стану. Для випадку штучно згенерованої мікроструктури, що складається з двох типів матеріалу – фериту та графіту, прийнято, що для графіту міцності на розтягнення та стиснення істотно розрізняються. Тому, для визначення поверхні початку текучості, окремо для кожного типу напруженого стану знаходяться відношення максимальних напружень до відповідної допустимої межі міцності. Проведено групу розрахунків типових реалізацій поверхонь текучості. Накопичена статистична інформація дозволяє визначити зону впливу максимальних напружень. Метод визначення кумулятивної функції розподілу та параметрів описової статистики, таких як математичне очікування та дисперсія функції випадкового радіуса, детально описані у роботі [19].

Другий метод оцінювання міцності моделі розрахований на основі критерію руйнування Цай-Ву [23], що широко використовується для анізотропних композиційних матеріалів, які мають різну міцність на розтяг та стиск. Модель вважається пластиною, тому критерій розглядається у плоскій постановці (1):

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_6 \tau_{12} + F_{66} \tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

Зазначений вище критерій Цай-Ву вимагає формулювання відповідних коефіцієнтів безпеки, помноження на які призведе до руйнування матеріалу. При цьому, за умови, що запас міцності більше 1.0 – матеріал вважається безпечним щодо руйнування.

$$FOS = \frac{-C_1 + R}{2C_2}, \quad (2)$$

Типові реалізації розташування поверхонь текучості для концентрації включень $\psi = 0.0255$, розрахованих по модифікованому критерію Мізеса та за критерієм Цяя-Ву приведені на Рис. 3 відповідно.

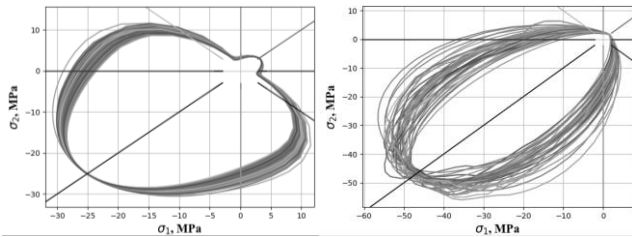


Рис. 3 – Типові реалізації поверхонь текучості.

Пластичні деформації у пластині з отвором. На третьому етапі аналізу ресурсу пластини з отвором, напружений стан моделі оцінюється методом скінчених елементів з використанням в якості властивостей матеріалу зразка – визначені на першому етапі пружних характеристик, які наведені у табл. 2.

Розрахункова модель пластини наведена на Рис. 4, де наведені граничні умови та прикладене розтягуюче навантаження у $P = 1.5$ МПа.

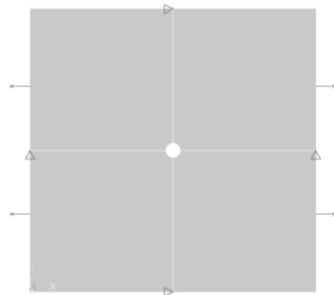


Рис. 4 – Розрахункова модель пластини з отвором.

Візуалізація ймовірності пластичної деформації всієї моделі реалізована за допомогою бібліотеки ruansys Рис. 5. Досягнення порогу 1.0 відповідає виникненню мікропластичних деформацій.

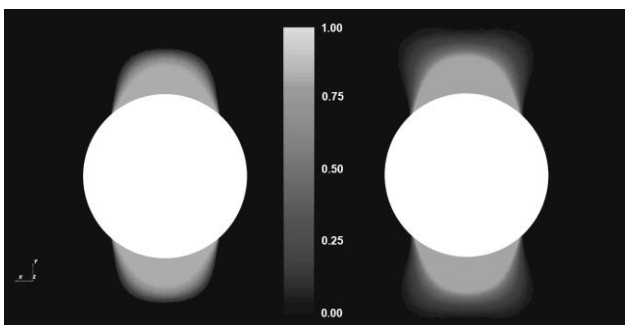


Рис. 5 – Ймовірність пластичної деформації пластини з отвором: а – для критерію міцності по Мізесу; б - для критерію міцності по Цяй-Ву.

Таблиця 2 – Пружні характеристики матеріалу

$E_x = E_y$, ГПа	G_{xy} , ГПа	$\nu_{xy} = \nu_{yx}$	$\Gamma_{xy,xy} \times 10^{-3}$	$\Gamma_{xy,yx} \times 10^{-3}$	$\Gamma_{xy,xz} \times 10^{-3}$	$\Gamma_{xy,yz} \times 10^{-3}$
1.791	1.305	0.368	-0.565	0.635	-0.766	0.856

Висновки. У статті обговорюються етапи дослідження ймовірності виникнення пластичних деформацій у пластині з отвором. Використовуючи технологію обробки зображень мікроструктури високоміцного чавуну, визначені пружні характеристики матеріалу. На основі критеріїв міцності Мізеса та Цяя-Ву для плоского напруженого стану визначено експериментальні набори поверхонь текучості з використанням методу скінчених елементів. Враховується різна поведінка композитного матеріалу при розтягуючих та стискаючих навантаженнях. Вихід за межі поверхні текучості вказує на можливість переходу в пластичний стан. Розуміння процесів в структурі на мікрорівні дозволяє заздалегідь спрогнозувати можливе макроруйнування моделі. Результати роботи показують ймовірність пластичної деформації пластини з отвором.

Список літератури

1. *Bramfitt B. L., Benschoter A. O.* Metallographer's guide : practice and procedures for irons and steels / B. L. Bramfitt., A. O. Benschoter // ASM International – 2001. – 354с.
2. *Son S., Lee Y. H., Choi D. W., та ін.* Investigation of the microstructure of laser-arc hybrid welded boron steel / S. Son // JOM – 2018. №70 (8). – С. 1548–1553.
3. *Sikora P., Abd Elrahman M., Chung, S. Y., та ін.* Mechanical and microstructural properties of cement pastes containing carbon nanotubes and carbon nanotube-silica core-shell structures, exposed to elevated temperature / P. Sikora та ін. // Cement and Concrete Composites – 2019. – № 95. – С. 193–204.
4. *Salinas A., Celentano D., Carvajal L., та ін.* Microstructure-based constitutive modelling of low-alloy multiphase TRIP steels / A. Salinas та ін. // Metals. – 2019. – №9 (2). – С. 250.
5. *Borgh I., Hedström P., Persson T., та ін.* Microstructure, grain size distribution and grain shape in WC-Co alloys sintered at different carbon activities/ I. Borgh та ін. // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – № 43. – С. 205–211.
6. *Hart K. A., Rimoli J. J.* Generation of statistically representative microstructures with direct grain geometry control / K. A. Hart., J. J. Rimoli // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2020. – № 370. – С. 113242.
7. *Fernandino D. O., Boeri R. E.* In-situ microscopic analysis of ferritic ductile iron during tensile loading: relation between matrix heterogeneities and damage mechanisms / D. O. Fernandino, R. E. Boeri // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2019. – №42 (10). – С. 2220–2231.
8. *Freitas B. J. M., Otani L. B., Kiminami C. S., та ін.* Effect of iron on the microstructure and mechanical properties of the spray-formed and rotary-swaged 319 aluminum alloy / B. J. M. Freitas, L. B. Otani, та ін. // Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – №102 (9–12). – С. 3879–3894.
9. *Ramakrishnan A., Dinda G. P.* Microstructure and mechanical properties of direct laser metal deposited Haynes 282 superalloy / A. Ramakrishnan, G. P. Dinda // Materials Science and Engineering. – 2019. – №748. – С. 347–356.
10. *Шаниро Л., Стокман Д.* Компьютерное зрение / Л. Шаниро, Д. Стокман. – М.: Наука, 2013. – 761с.
11. *Форсайт Д. А., Понс Д.* Компьютерное зрение. Современный подход / Д. А. Форсайт, Д. Понс. – М.: «Вильямс», 2004. – 928с.
12. *Decost B. L., Holm E. A.* A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data /

- B. L. Decost, E. A. Holm // Computational Materials Science. – 2015. № 110. – С. 126–133.
13. Kwon O., Kim H. G., Ham M. J., та ін. A deep neural network for classification of melt-pool images in metal additive manufacturing / O. Kwon та ін. // J. Intelligent Manufacturing. – 2020. №31 (2). – С. 375–386.
 14. Pereira R. F., Silva Filho V. E. R. da, Moura L. B., та ін. Automatic quantification of spheroidal graphite nodules using computer vision techniques. / R. F. Pereira, та ін. // Journal of Supercomputing. – 2020. – №76 (2). – С. 1212–1225.
 15. DeCost B. L., Lei B., Francis T., та ін. High throughput quantitative metallography for complex microstructures using deep learning: A case study in ultrahigh carbon steel / B. L. DeCost., та ін. // Microscopy and Microanalysis. – 2019. № 25 (1). – С. 21–29.
 16. Icardi U., Locatto S., Longo A. Assessment of recent theories for predicting failure of composite laminates / U. Icardi, та ін. // American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. – 2007. – С. 76–86.
 17. Shapovalova M. I., Vodka O. O. Computer methods for constructing parametric statistically equivalent models of high-strength cast iron microstructure to analyze its elastic characteristics / M. I. Shapovalova., O. O. Vodka // Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. – 2019. – № 6 (1). – С. 179–187.
 18. Shapovalova M., Vodka O. Image microstructure estimation algorithm of heterogeneous materials for identification their chemical composition. / M. Shapovalova., O. Vodka // IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Ukraine, Lviv: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2019. – С. 975–979.
 19. Shapovalova M., Vodka O. A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics / M. Shapovalova., O. Vodka // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2020. – №188. – С. 565–576.
 20. Zienkiewicz O. The finite element method in engineering science / O. Zienkiewicz. – London: McGraw-Hill, 1971, 521 c.
 21. Ambartsumian S. Theory of anisotropic plates / S. Ambartsumian. – М.: Наука, 1967, 320 с.
 22. Ву Е. М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. Композиционные материалы / Е. М. Ву. – М.: Мир, 1978. – С. 401–491.
- References (transliterated)**
1. Bramfitt B. L., Benscoter A. O. *Metallographer's guide: practice and procedures for irons and steels*. ASM International, 2001, 354p.
 2. Son S., Lee Y. H., Choi D. W., et. al. *Investigation of the microstructure of laser-arc hybrid welded boron steel*. JOM, 2018, Vol. 70, No. 8, pp. 1548–1553.
 3. Sikora P., Abd Elrahman M., Chung S. Y., et. al. *Mechanical and microstructural properties of cement pastes containing carbon nanotubes and carbon nanotube-silica core-shell structures, exposed to elevated temperature*. Cement and Concrete Composites, 2019. Vol. 95, pp. 193–204.
 4. Salinas A., Celentano D., Carvajal L., et. al. *Microstructure-based constitutive modelling of low-alloy multiphase TRIP steels*. Metals, 2019, Vol. 9, No. 2, p. 250.
 5. Borgh I., Hedström P., Persson T., et. al. *Microstructure, grain size distribution and grain shape in WC-Co alloys sintered at different carbon activities*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, Vol. 43, pp. 205–211.
 6. Hart K. A., Rimoli J. J. *Generation of statistically representative microstructures with direct grain geometry control*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, Vol. 370, pp. 113242.
 7. Fernandino D. O., Boeri R. E. *In-situ microscopic analysis of ferritic ductile iron during tensile loading: relation between matrix heterogeneities and damage mechanisms*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, Vol. 42, No. 10, pp. 2220–2231.
 8. Freitas B. J. M., Otani L. B., Kiminami C. S., et. al. *Effect of iron on the microstructure and mechanical properties of the spray-formed and rotary-swaged 319 aluminum alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, Vol. 102, No. 9–12, pp. 3879–3894.
 9. Ramakrishnan A., Dinda G. P. *Microstructure and mechanical properties of direct laser metal deposited Haynes 282 superalloy*. Materials Science and Engineering A, 2019, Vol. 748, pp. 347–356.
 10. Shapiro L., Stockman D. *Komputernoe zrenie*. [Computer vision]. М.: Nauka, 2013, 761p.
 11. Forsyth D. A., Pons D. *Komputernoe zrenie. Sovremenniy podhod*. [Computer vision. Modern approach]. М.: Williams, 2004, 928p.
 12. Decost B. L., Holm E. A. *A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data*. Computational Materials Science, 2015, Vol. 110, p. 126–133.
 13. Kwon O., Kim H. G., Ham M. J., et. al. *A deep neural network for classification of melt-pool images in metal additive manufacturing*. J. Intelligent Manufacturing, 2020. Vol. 31, No. 2, pp. 75–386.
 14. Pereira R. F., Silva Filho V. E. R. da, Moura L. B., et. al. *Automatic quantification of spheroidal graphite nodules using computer vision techniques*. J. Supercomputing, 2020, Vol. 76, No. 2, pp. 1212–1225.
 15. DeCost B. L., Lei B., Francis T., et. al. *High throughput quantitative metallography for complex microstructures using deep learning: A case study in ultrahigh carbon steel*. Microscopy and Microanalysis, 2019, Vol. 25, No. 1, pp. 21–29.
 16. Icardi U., Locatto S., Longo A. *Assessment of recent theories for predicting failure of composite laminates*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2007, pp. 76–86.
 17. Shapovalova M. I., Vodka O. O. *Computer methods for constructing parametric statistically equivalent models of high-strength cast iron microstructure to analyze its elastic characteristics*. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences, 2019, Vol. 6, No. 1, pp. 179–187.
 18. 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), Ukraine, Lviv: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019, pp. 975–979. DOI:10.1109/UKRCON.2019.8879861
 19. Shapovalova M., Vodka O. *A data-driven approach to the prediction of spheroidal graphite cast iron yield surface probability characteristics*. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, 2020, Vol. 188, pp. 565–576. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_48
 20. Zienkiewicz O. *The finite element method in engineering science*. London: McGraw-Hill, 1971, 521p.
 21. Ambartsumian S. *Teoria anizotropnih plastin*. [The theory of anisotropic plates]. М. Nauka, 1967, 320 p.
 22. Ву Е. М. *Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред. Композиционные материалы*. [Phenomenological criteria of destruction of anisotropic media. Composite materials]. Механика композиционных материалов. М.: Мир, 1978, pp. 401–491.

Надійшла (received) 19.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаповалова Марія Ігорівна (Шаповалова Мария Игоревна, Shapovalova Mariya Ihorivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри Динаміки та міцності машин; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: MiShapovalova@gmail.com; ORCID: 0000-0002-4771-7485.

Водка Олексій Олександрович (Водка Алексей Александрович, Vodka Oleksii Oleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри Динаміки та міцності машин; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: vodka@gmail.com; ORCID: 0000-0002-4462-9869