

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, А. С. ХОРОШУН, А. В. СЕНЬКО, О. А. ТАТАРІНОВА

ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ З ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КРИВИХ ЕДВАРДСА

Надано опис розробленого програмного засобу для збереження та аналізу даних з високотемпературного деформування та довготривалої міцності металевих матеріалів. Для його реалізації як веб-застосунку обрано веб-фреймворк з відкритим кодом Laravel. Рішення Voyager використовується спільно з ним як графічний інтерфейс для взаємодії з базою даних. Для побудови графіків використовується рішення на мові програмування JavaScript з використанням технології Canvas. Описано основні класи та компоненти. За допомогою діаграм варіантів використання показано можливість застосування програмного засобу в інженерній практиці обробки даних експериментальних високотемпературних досліджень повзучості та руйнування. Запропоновано підхід та алгоритм для апроксимації кривих довготривалої міцності загального вигляду, що включають різні типи руйнування, з застосуванням кривих Едвардса. З їхнім використанням отримано аналітичний нелінійний вираз для функціональної залежності між часом до руйнування та руйнівним напруженням. Обговорюються апроксимації різних типів кривої довготривалої міцності, що відповідають процесам накопичення пошкоджувальності у матеріалі за різними типами фізичних механізмів. Продемонстровано небажану можливість отримання завищеного значення часу до руйнування у випадку малих та середніх значень напружень без використання інформації щодо ділянок міжзеренного руйнування, руйнування завдяки окисленню чи корозії та старіння на кривій довготривалої міцності. Використання розробленого програмного засобу, підходу та способу аналітичного представлення функціональної залежності значень руйнівного напруження від часу в еволюційному рівнянні для параметру пошкоджуваності дозволяє проводити уточнені розрахунки елементів конструкцій, що працюють в умовах високотемпературного навантаження.

Ключові слова: програмний засіб, веб-застосунок, база даних, довготривала міцність, повзучість, пошкоджуваність, криві Едвардса.

A description of the developed software for saving and analyzing data on high-temperature deformation and long-term strength of metallic materials is provided. The open source Laravel web framework was chosen to implement in the application. The Voyager solution is used together with it as a graphical interface for interacting with the database. A JavaScript programming language solution using Canvas technology is used to build plots. Basic classes and components are described. With the help of diagrams of use cases, the possibility of using the web application in the engineering practice of data processing of experimental high-temperature creep and fracture studies is shown. An approach and an algorithm for approximating long-term strength curves of general appearance, including different types of failure, using Edwards curves are proposed. With their use, an analytical nonlinear expression for the functional dependence between the time to failure and the failure stress was obtained. Approximations of various types of the long-term strength curve corresponding to the processes of accumulation of damage in the material by various types of physical mechanisms are discussed. The undesirable possibility of obtaining an overestimated value of the time to failure in the case of small and medium stress values without using information on the areas of intergranular failure, failure due to oxidation or corrosion, and overaging on the long-term strength curve is demonstrated. The use of the developed software, approach and method of analytical representation of the functional dependence of the values of failure stress on time in the evolution equation for the damage parameter allows you to carry out refined calculations of structural elements operating under high-temperature load conditions

Key words: software, web application, database, long-term strength, creep, damage, Edwards curves.

Вступ. Завдяки експериментальним дослідженням властивостей сучасних конструкційних матеріалів на сьогодні є накопиченим великий обсяг даних, що їх описують. Одним з найбільш складних питань їхнього використання у практиці наукових досліджень та інженерних розрахунків є встановлення функціональних залежностей між різними типами властивостей. Такі залежності є необхідними для проведення розрахунків при визначенні заданих параметрів у різних діапазонах напружень, температур тощо. Для аналізу подібних функціональних залежностей є необхідною наявність експериментальних даних, оброблених та представлених у цифровому вигляді. Така обробка найкращим чином відбувається з застосуванням баз даних. Для ефективного їхнього використання на сучасному етапі є необхідною програмна реалізація доступу до бази даних. Найкраще це робиться у вигляді інтернет-орієнтованих програмних засобів, або веб-застосунків.

Останні двадцять років характеризувались істотним зростанням веб-застосунків, які містять інформацію про характеристики фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів. На жаль, переважна частина з них містить інформацію або у вигляді bitmap – зображень, або надає її текстово, але

без можливості обробки даних. Також з'являються роботи, в яких міститься краще структурована інформація щодо обмеженої групи сталей, сплавів або неметалевих матеріалів. В таких роботах [1-4] іноді містяться посилання на бази даних, створені як таблиці MS Excel. Японські дослідники публікують дані з досліджень повзучості та довготривалої міцності різних сталей та сплавів, як приклад наведемо роботу [5]. Слід також відмітити великий веб-портал www.matweb.com [6], в якому збережено дані щодо властивостей біля 175000 матеріалів. Ефективно організовано можливість аналізу та порівняння різних властивостей металевих матеріалів у веб-порталі www.splav-kharkov.com [7].

Слід зауважити, що у переважній кількості баз даних, в яких існує можливість оцінювання та порівняння різних марок та класів матеріалів, більшість даних наведено для нормальних, кімнатних температур. Нелінійні залежності, які притаманні деформівній поведінці металевих матеріалів, практично не відтворюються. Винятком є бази пластмас та інших полімерних матеріалів фірми BASF (див., наприклад, [8]), в яких надано температурні залежності та деякі графіки.

Вибір типу матеріалу для високотемпературних конструкцій є відповідальною задачею, тому

автоматизація процесу є необхідною. Для організації ефективного доступу до такої бази даних є необхідним створення системи її управління (СУБД) та програмного засобу, за допомогою якого організовується робота з базою.

На сьогодні питання розробки баз даних, систем їхнього управління та створення відповідних програмних застосунків є добре проробленими [9,10]. Аналіз цих та інших джерел свідчить, що для ефективної розробки та оптимального використання ресурсів колективу розробників одним з найкращих варіантів є застосування веб-фреймворку з відкритим кодом Laravel [11]. Графічні модулі та елементи ефективно створюються з застосуванням мови програмування JavaScript[12] та технології Canvas [13].

Дану роботу присвячено опису програмного засобу, бази даних та методу використання оброблених за їхньою допомогою характеристик для оцінювання довготривалої міцності матеріалів за умов високотемпературного деформування.

Опис бази даних та структури програмного засобу.

Для оцінювання довготривалої міцності матеріалів при високих температурах використовують експериментальні дані, оброблені у вигляді кривих повзучості або довготривалої міцності [14]. З кривих повзучості, які, як відомо [14], будуються для конкретних значень напружень, що були задані у випробуванні, є можливим оцінити значення часу до руйнування зразку та руйнівної деформації. З кривих довготривалої міцності отримують значення часу до руйнування при заданому напруженні [14]. Отже, для аналізу довговічності можуть бути необхідними криві обох типів. Також у випадку циклічного навантаження використовують граничні діаграми, що пов'язують амплітудні та середні компоненти напруження циклу. Розглянемо структуру проекту, присвяченого саме структуруванню експериментальних даних для їхнього подальшого використання у побудові функціональних залежностей, зі стислим описом застосунку для аналізу полів бази даних.

Тестування та аналіз реалізованого раніше підходу до вирішення даної задачі [15] показали низку нерозв'язаних питань. Вони були пов'язані з обмеженістю застосованого програмного забезпечення, яке використовувалось при створенні застосунків на той час. Для використання сучасних підходів та доробку у галузі інформаційних технологій розпочато новий проект.

Для його реалізації було обрано веб-фреймворк з

відкритим кодом Laravel. Рішення Voyager використовується спільно з ним як графічний інтерфейс для взаємодії з базою даних [11].

До структури бази даних веб-фреймворка відносяться три таблиці:

- криві довготривалої міцності (long_term_strength_curves);
- криві повзучості (creep_curves);
- граничні діаграми (diagrams_of_limiting_amplitudes_and_stresses).

Полями бази даних є марка матеріалу, значення температури та напружень, при яких було проведено випробування, значення точок на відповідних кривих (деформація або напруження – час визначення), інформація про джерело, звідки дані отримано. Реалізовано можливості зберігання, додавання та доступу до експериментальної інформації.

Реалізація проекту з використанням фреймворку Laravel передбачає наявність окремого класу для кожної сутності та кожної таблиці у базі даних (БД).

Структура класів у програмі відображена на UML-діаграмі класів (рис.1). Діаграма варіантів використання для створюваного застосунку має вигляд, наведений на рис.2.

Реалізовано методику графічного відображення кривих повзучості з використанням обмеженої кількості експериментальних даних, наданих користувачем. Для побудови графіків використовується рішення на JavaScript. Сторонні бібліотеки у цьому випадку не використовуються, задіяно нативні засоби JavaScript та технологія Canvas [12, 13].

Ідеалізоване представлення кривої повзучості складається з трьох сегментів: прямої, що відповідає за ділянку усталеної повзучості, та двох квадратичних кривих Без'є [16], якими описуються перша та третя ділянки [14]. Криві довготривалої міцності представлені набором відрізків прямих між заданими експериментальними значеннями. Детальний опис підходів до відображення даних надано у роботі [15].

При циклічному навантаженні велику роль у визначенні довготривалої міцності відіграють значення двох компонентів напружень – циклічно змінного, або амплітудного, та середнього, незмінного у часі. Для опису довготривалої міцності при циклічному навантаженні використовують граничні діаграми (діаграми Гудмена) [17]. Розглянемо реалізовані у застосунку варіанти використання у випадку застосування аналізу граничних діаграм (рис.3).

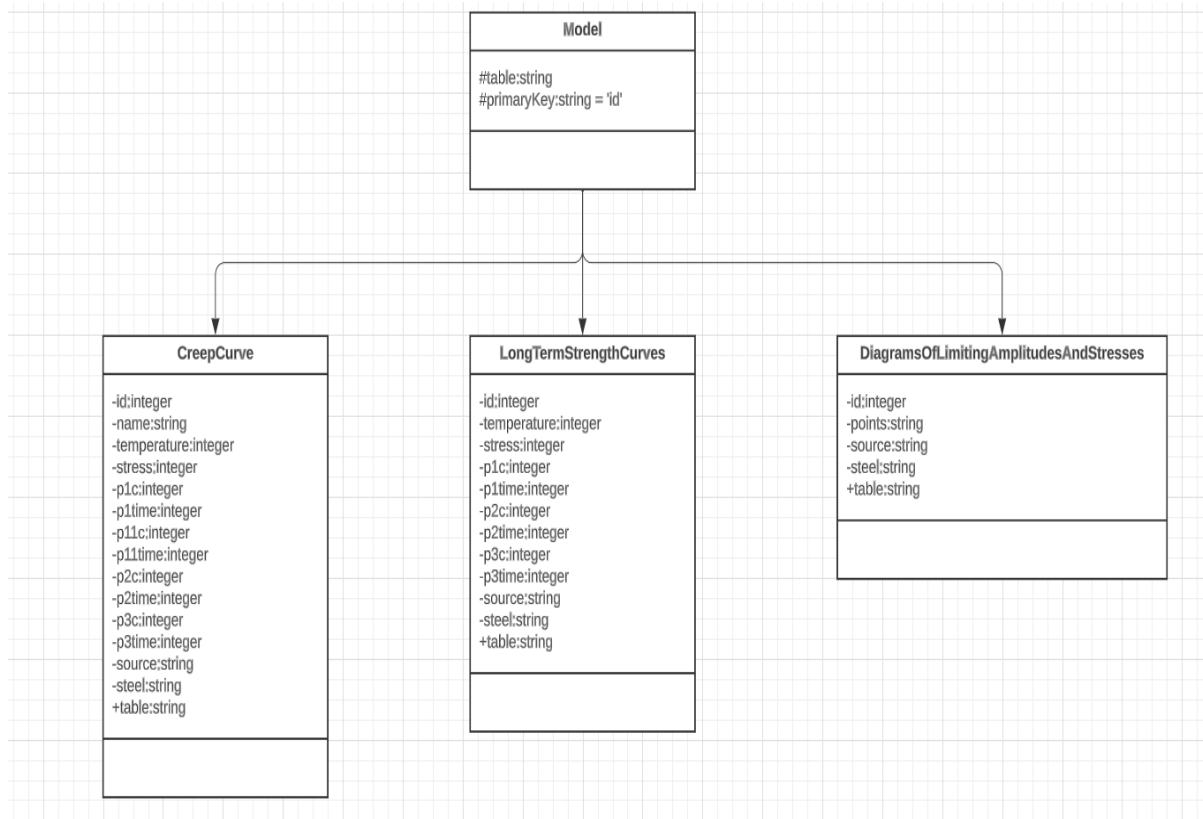


Рис. 1 – Діаграма класів

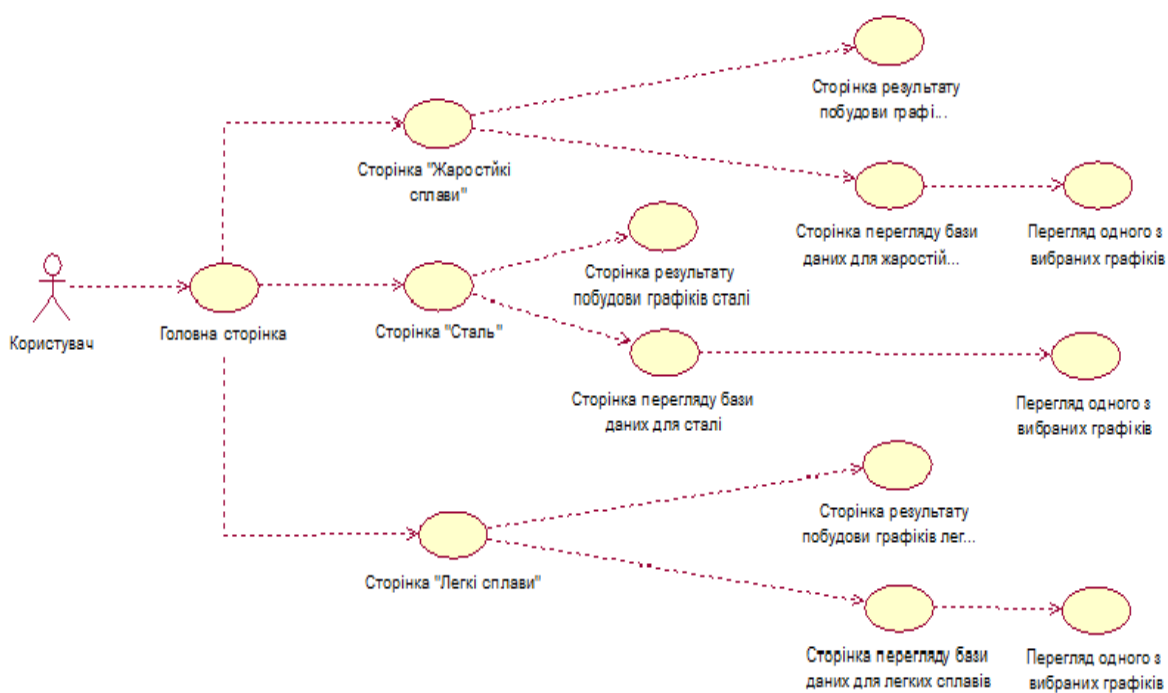


Рис. 2 – Діаграма варіантів використання

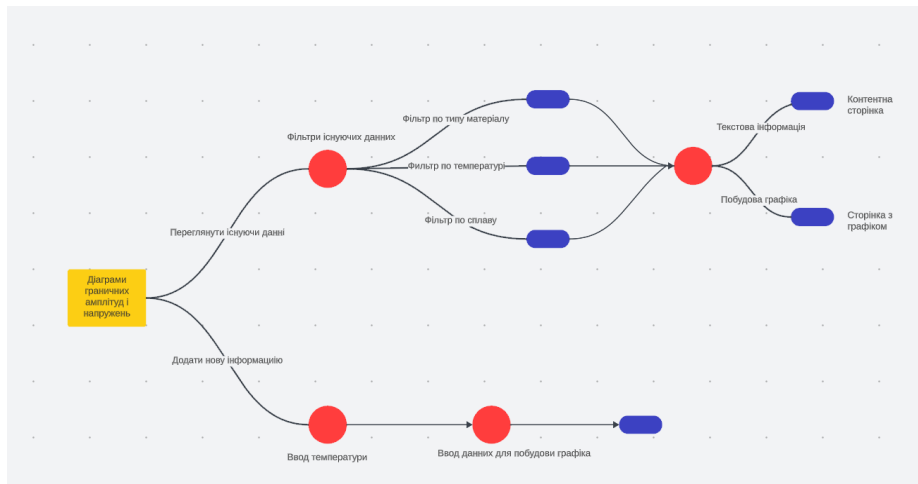


Рис. 3 – Діаграма варіантів використання. Граничні діаграми

Користувачі мають можливість побудови та візуального аналізу кривих усіх трьох типів. Крім того, реалізовані функціональні властивості застосунку дозволяють отримати вибірки даних для подальшої обробки.

Використання застосунку для обробки даних та аналізу довготривалої міцності.

На теперішній час завдяки дослідженням механіків та матеріалознавців (див., наприклад [14, 17]) встановлено, що крива довготривалої міцності має ні дві ділянки- крихку та в'язку (1 та 2 відповідно на рис. 4), як вважалося раніше, а значно більше. Серед основних, які мають місце при менших значеннях напружень, Пенні та Марріотт [14] вказують ділянки міжзеренного руйнування (3, intergranular), руйнування завдяки окисненню чи корозії доквілля (4, oxidation) та внаслідок старіння (5, overaging). На жаль, такі криві побудовано лише для дуже невеликої кількості матеріалів, тому у сучасній розрахунковій практиці обмежуються моделюванням за крихкою та/або в'язкою ділянкою кривої.

Припустимо, що у створеній базі даних міститься інформація щодо точок, які є вершинами ламаної - кривої довготривалої міцності у заданому температурному діапазоні, загальний вигляд якої надано на рис. 4.

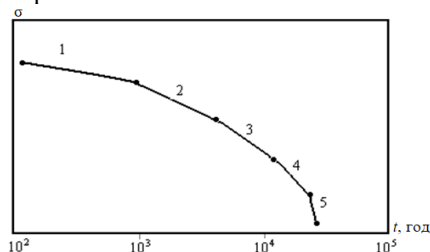


Рис. 4 – Схематичне уявлення узагальненої кривої довготривалої міцності

За запропонованим алгоритмом відбувається відбір відповідних точок з бази даних та передача у необхідний програмний модуль для виконання розрахунків. Навіть якщо повна інформація з механічних випробувань при низьких значеннях

напружень є відсутньою, завжди є можливість використати дані матеріалознавчих досліджень щодо процесів окислення та старіння й побудувати апроксимовану криву.

Для подібних апроксимацій є можливим використання сімейства кривих Едвардса [18, 19]. На площині у декартовій системі координат (x, y) сімейство еліптичних кривих Едвардса представляється наступним чином:

$$x^2 + y^2 = c^2(1 + dx^2y^2); d(1 - dc^4) \neq 0. \quad (1)$$

де d, c – константи.

У разі наявності різних типів експериментальних даних криві довготривалої міцності загального вигляду можуть мати не тільки 5 ділянок, що у напівлогарифмічній шкалі представлено відрізками прямих, але й складатись з комбінації ламаних та нелінійних функцій. Залежність такого типу представлено на рис. 5 кривою 1. З іншого боку, є можливим, що випробування не покажуть наявності всіх п'яти ділянок, як представлено кривою 2 на рис. 5. Використаємо аналітичні залежності, що побудовано на базі використання рівнянь для кривих Едвардса, для виразу залежності руйнівних значень напружень σ від часу t :

$$\sigma(t) = A \left(\frac{B - t^2}{F^2 t^2 + C} \right)^{1/2} \quad (2)$$

де A, B, C, F – константи.

Для апроксимації різного типу залежностей руйнівних напружень від часу у рівняннях кривих Едвардса, представлених, наприклад, кривими 1 та 2 на рис. 5, змінюються тільки значення констант, що до них входять. Наприклад, апроксимація кривої 1 можлива при наступних значеннях констант: $A = 9 \cdot 10^{-3}$ МПа, $B = 1 \cdot 10^{-10}$ год², $C = 7$ год², $F = 5 \cdot 10^{-5}$. Змінювання значень двох констант ($A = 3.75 \cdot 10^{-3}$ МПа, $C = 1$ год²) призводить до опису залежності, описаної кривою 2 на рис.5.

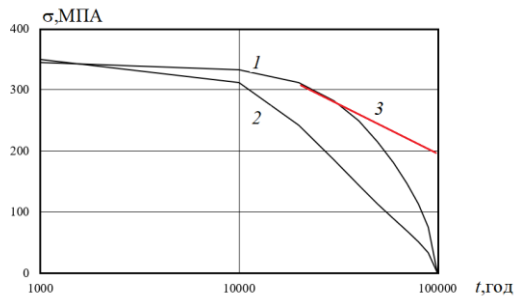


Рис. 5 – Форма кривих довготривалої міцності, отриманих з використанням залежності (2): 1, 2; криву 3 побудовано за даними ділянки крихкого руйнування

Далі, наявність аналітичного виразу для функціональної залежності (2) руйнівного напруження від часу дозволяє її використання при аналізі накопичення прихованої пошкодженості згідно підходів континуальної механіки пошкодженості [20]. Використаємо скалярний параметр пошкодженості ω . Еволюційне (кінетичне) рівняння для нього запишемо у формі з використанням додаткового параметру r – степені при параметрі ω [20, 21]:

$$\dot{\omega} = D \frac{(\sigma(t))^m}{(1-\omega^r)^l} = D \frac{\left(\frac{B-t^2}{F^2 t^2 + C}\right)^{m/2}}{(1-\omega^r)^l} \quad (3)$$

$$\omega(0)=0, \omega(t^*)=\omega^* \quad (4)$$

де D, l, m, r – константи, що визначаються за кривими типу 1, 2 рис. 5,

t^* – значення часу завершення руйнування,

ω^* – т.зв. критичне значення параметру пошкодженості, ($\omega^* \leq 1$) [20].

Для визначення значень констант D, l, m, r є необхідним проінтегрувати еволюційне рівняння (3) з додатковими умовами (4). Далі використати 4 пари значень (σ, t) з різних ділянок кривої довготривалої міцності, такі різні ділянки мають відповідати якісно різним механізмам руйнування, відміченим на рис. 5. Підстановка даних чотирьох пар значень в проінтегроване рівняння для параметру пошкодженості надасть систему чотирьох рівнянь для визначення значень невідомих констант D, l, m, r .

Наголосимо, що використання класичного підходу апроксимації кривої довготривалої міцності з використанням тільки ділянки крихкого руйнування (2 на рис.4) при наявності міжзеренного руйнування, руйнування завдяки окисленню чи корозії та старіння може призвести до завищеної оцінки довговічності. Таку апроксимацію проілюстровано на рис.5 кривою 3. Аналіз даних, наведених на цьому рисунку, свідчить, що традиційна апроксимація може надати більші на 40-50% значення часу до руйнування при середніх значеннях напружень, а при малих вони будуть відрізнятися у рази.

Запропонований спосіб визначення констант легко автоматизується, у програмному засобі

створюються відповідні форми, в які заносяться значення напружень та часу з різних ділянок кривої довготривалої міцності.

Висновки. Надано опис розробленого програмного засобу для збереження та аналізу даних з високотемпературного деформування та довготривалої міцності металевих матеріалів. Описано основні класи та компоненти. За допомогою діаграм варіантів використання показано можливість використання застосунку в інженерній практиці обробки даних експериментальних високотемпературних досліджень.

Запропоновано підхід та алгоритм для апроксимації кривих довготривалої міцності загального вигляду, що включають різні типи руйнування. Застосування кривих Едвардса дозволило отримати аналітичний вираз для функціональної залежності між часом до руйнування та руйнівним напруженням. Використання даного аналітичного виразу в еволюційному рівнянні для параметру пошкодженості дозволить проводити уточнені розрахунки елементів конструкцій, що працюють в умовах високотемпературного навантаження.

Наголосимо, що запропонований підхід може певною мірою розглядатись як альтернативний до підходу з використанням т.зв. «mechanism based» еволюційних рівнянь, що використовують декілька параметрів пошкодженості для опису різних її механізмів [22, 23]. Використання одного параметру пошкодженості полегшує аналіз процесів поточного прихованого руйнування з однозначним визначенням місць його завершення.

Подяка. Ця робота була частково підтримана (Д.В.Бреславський) Фондом Фольксваген "Visiting research program for refugee Ukrainian scientists" (Az. 9D257).

Список літератури

1. Li Z. A database of mechanical properties for multi principal element alloys / Z. Li et al. // Chemical Data Collections. – 2023. – Т. 47. – С. 101068.
2. Jitsukawa S. Development of an extensive database of mechanical and physical properties for reduced-activation martensitic steel F82H / S. Jitsukawa et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2002. – Т. 307. – С. 179-186.
3. Kimura A. Recent progress in reduced activation ferritic steels R&D in Japan / A. Kimura et al. // Nuclear fusion. – 2003. – Т. 43. – №. 10. – С. 1246.
4. Sakai T. Statistical fatigue properties of SCM435 steel in ultra-long-life regime based on JSMS database on fatigue strength of metallic materials / T. Sakai et al. // International journal of fatigue. – 2006. – Т. 28. – №. 11. – С. 1486-1492.
5. Sawada K. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18cr-10ni-ti stainless steel for boiler and heat exchanger seamless tubes (SUS 321H TB). / K. Sawada et al. – 1987.
6. MatWeb. Material property data – Режим доступу: www.matweb.com. – Дата звертання: 20 листопада 2023.
7. Breslavskaya E.A. Internet-portal «Database of Steels and Alloys» as an efficient tool in engineering / E.A. Breslavskaya, D.V. Breslavsky // CIS Iron & Steel Review 2011. – 2011. – № 1. – P. 12-15.
8. Product Locator for Engineering Plastics – Режим доступу: https://pmttools-na.basf.com/product. – Дата звертання: 25 листопада 2023.
9. Garcia-Molina H. Database systems: the complete book. / Garcia-Molina H. – Pearson Education India, 2008.
10. Casteleyn S. Engineering web applications. / S. Casteleyn et al. – Heidelberg : Springer, 2009. – Т. 30.

11. *Matula T.* Laravel application development cookbook. / *T. Matula* – Packt Publishing Ltd, 2013.
12. *Crockford D.* JavaScript: The Good Parts: The Good Parts. / *D. Crockford* – "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
13. *Joshi B.P.* Canvas Cookbook. / *B.P. Joshi* – Packt Publishing Ltd, 2016.
14. *Penny R.K.* Design for creep. / *R.K. Penny, D.L. Marriott* – London: Chapman and Hall, 1995. – 430 p.
15. *Breslavsky D.V.* Web-application for archiving of creep and long term strength data / *D.V. Breslavsky, O.A. Breslavska, A.S. Khoroshun* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Динаміка і міцність машин. - Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 57 (1166). - С. 11 14.
16. *Joon Ahn Young* Approximation of circular arcs and offset curves by Bézier curves of high degree / *Ahn Young Joon* // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2004. – Vol. 167, № 2. – P. 405–416.
17. *Бреславський Д.В.* Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / *Д.В. Бреславський* – Харків, Друкарня Мадрид, 2020. – 249 с.
18. *Edwards, H.M.* A normal form for elliptic curves. / *H.M. Edwards*. – Bulletin of the American Mathematical Society, July 2007. – P. 393–422.
19. *Bernstein, D.J.* Faster Addition and Doubling on Elliptic Curves / *D.J. Bernstein, T. Lange*. – Advances in Cryptology—ASIACRYPT'20077 (Proc. 13th Int. Conf. On the Theory and Application of Cryptology and Information Security. Kuching, Malaysia. December 2–6, 2007). – 2007.
20. *Lemaitre J.* Mechanics of solid materials. / *J. Lemaitre, J.L. Chaboche* // Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
21. *Rabotnov Yu. N.* Creep Problems in Structural Members. *Yu.N. Rabotnov* / – Amsterdam/London: North-Holland Publishing, 1969. – 822 p.
22. *Hayhurst D.R.* The use of continuum damage mechanics in creep analysis and design. / *D.R. Hayhurst*. // Journal Of Strain Analysis For Engineering Design. 1994. – Vol. 29 (3). – P. 233–241.
23. *Dyson B.F.* Micromechanism-quantification for creep constitutive equations. IUTAM Symposium on Creep in Structures / *B.F. Dyson, M. McLean* Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 3–16.
5. *Sawada K. et al.* Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr-10Ni-ti stainless steel for boiler and heat exchanger seamless tubes (SUS 321H TB). 1987.
6. *MatWeb.* Material property data – Available at: www.matweb.com. (accessed 20.11.2023)
7. *Breslavskaya E. A., Breslavsky D. V.* Internet-portal «Database of Steels and Alloys» as an efficient tool in engineering. CIS Iron & Steel Review 2011. 2011. № 1. P. 12–15.
8. *Product Locator for Engineering Plastics* – Available at: <https://pmttools-na.basf.com/product>. (accessed 25.11.2023)
9. *Garcia-Molina H.* Database systems: the complete book. *Pearson Education India*, 2008.
10. *Casteleyn S. et al.* Engineering web applications. *Heidelberg: Springer*, 2009. Т. 30.
11. *Matula T.* Laravel application development cookbook. *Packt Publishing Ltd*, 2013.
12. *Crockford D.* JavaScript: The Good Parts: The Good Parts. "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
13. *Joshi B. P.* Canvas Cookbook. *Packt Publishing Ltd*, 2016.
14. *Penny R.K., Marriott D.L.* Design for creep. *London: Chapman and Hall*, 1995. 430 p.
15. *D.V. Breslavsky, O.A. Breslavska, A.S. Khoroshun.* Web-application for archiving of creep and long term strength data. *Vestn. Khar'k. politekhn. in ta. Ser.: Dynamika i micnist' mashyn* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series Dynamics and strength of machines]. Kharkiv., 2015. № 57 (1166). P. 11 14.
16. *Joon Ahn Young* Approximation of circular arcs and offset curves by Bézier curves of high degree *Ahn Young Joon.* *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2004. Vol. 167, № 2. P. 405–416.
17. *Breslavsky D.V.* Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. [Deformation and long term strength of structural elements of nuclear reactors] *Kharkiv, Madrid*, 2020. 249 p.
18. *Edwards, H.M.* A normal form for elliptic curves. *Bulletin of the American Mathematical Society*, July 2007. P. 393–422.
19. *Bernstein, D.J.* Faster Addition and Doubling on Elliptic Curves *D.J. Bernstein, T. Lange.* *Advances in Cryptology ASIACRYPT'20077 (Proc. 13th Int. Conf. On the Theory and Application of Cryptology and Information Security.* Kuching, Malaysia. December 2–6, 2007), 2007.
20. *Lemaitre J., Chaboche J.L.* *Mechanics of solid materials.* Cambridge: University press, 1994. 556 p.
21. *Rabotnov Yu. N.* *Creep Problems in Structural Members.* Amsterdam. London: North-Holland Publishing, 1969. – 822 p.
22. *Hayhurst D.R.* The use of continuum damage mechanics in creep analysis and design. *D.R. Hayhurst.* *Journal Of Strain Analysis For Engineering Design.* 1994. Vol. 29 (3). P. 233–241.
23. *Dyson B.F., McLean M.* Micromechanism-quantification for creep constitutive equations. IUTAM Symposium on Creep in Structures / Ed.: S. Murakami, N. Ohno. Dordrecht: *Kluwer Academic Publishers*, 2001. P. 3–16.

References (transliterated)

Надійшла (received) 11.12.2023

Відомості про авторів/ About the Authors

Бреславський Дмитро Васильович (Breslavsky Dmytro) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khai.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>

Хорошун Андрій Сергійович (Khoroshun Andriy) – аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: a.s.khoroshun@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4369-137X>

Сенько Альона Володимирівна (Senko Alyona) – доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Alyona.Senko@khai.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7419>

Татарінова Оксана Андріївна (Tatarinova Oksana) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Oksana.Tatarinova@khai.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>