

**М.В. ПРОКОПЕНКО**

### **ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ДЕТАЛЕЙ, ЩО РУХАЮТЬСЯ З ВЕЛИКИМИ ШВИДКОСТЯМИ В РІДИНІ АБО ГАЗІ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)**

У статті виконано оглядовий аналіз напружень та деформацій деталей, що рухаються з великими швидкостями в рідині або газі. Проаналізовано умови роботи матеріалів та деталей турбін (лопатки, ротору і корпусу), що працюють в умовах високих температур і навантажень. Наведено основні способи вирішення проблеми забезпечення міцності таких деталей. Розглянуто аналітичний вигляд діаграм деформування як основний засіб здійснення практичних розрахунків матеріалу на міцність. Показано, що для визначення напружень та деформацій у деталях, які рухаються з великими швидкостями в рідині чи газі, потрібно враховувати модель експлуатації деталей, процеси повзучості та термовтомленості матеріалу, нестационарність процесів навантаження.

**Ключові слова:** напруження та деформації деталей турбін; діаграма деформування; модель експлуатації деталей турбін; повзучість та термовтомленість; нестационарність процесів навантаження

**Н.В. ПРОКОПЕНКО**

### **ОБЩИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ, ДВЖУЩИХСЯ С БОЛЬШИМИ СКОРОСТЯМИ В ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗЕ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)**

В статье выполнен обзорный анализ напряжений и деформаций деталей, движущихся с большими скоростями в жидкости или газе. Проанализированы условия работы материалов и деталей турбин (лопатки, ротора и корпуса), работающих в условиях высоких температур и нагрузок. Приведены основные способы решения проблемы обеспечения прочности таких деталей. Рассмотрен аналитический вид диаграмм деформирования как основное средство осуществления практических расчетов материала на прочность. Показано, что для определения напряжений и деформаций в деталях, которые движутся с большими скоростями в жидкости или газе, надо учитывать модель эксплуатации деталей, процессы ползучести и термоусталости материала, нестационарность процессов нагрузки.

**Ключевые слова:** напряжения и деформации деталей турбин; диаграмма деформирования; модель эксплуатации деталей турбин; ползучесть и термоусталость; нестационарность процессов нагружения

**М. ПРОКОПЕНКО**

### **GENERAL ANALYSIS OF STRESS AND DEFORMATION OF PARTS MOVING WITH HIGH VELOCITY IN A LIQUID OR GAS (REVIEW ARTICLE)**

The article provides an analytical review and analysis of stresses and deformations of parts moving at high speeds in a liquid or gas. The working conditions of materials and parts of turbines (blades, rotor and casing) operating at high temperatures and loads are analyzed. The main ways of solving the problem of ensuring the strength of such parts are presented. The main ways to solve the problem of reliability of parts or the product as a whole are given: mathematical modeling (calculated determination of strength, durability and reliability); physical modeling (model testing); testing of full-scale products in reproducible real or operational conditions. It is impossible to speak about the strength of a part only from the calculation of deformations and stresses, even taking into account their change over time, so it is necessary to have strength criteria that establish the relationship between the strength parameters. It is emphasized that in the general case, the criterion of strength should answer the question: will the part collapse or not with the known laws of change in time of stresses, strains and temperatures. It is shown that the considered standard characteristics of creep and long-term strength can be directly used in calculations only for those parts in which the uniaxial stress state at constant stresses and temperature is realized, when the working conditions of the material fully meet the test conditions of materials. An analytical view of deformation diagrams is considered as the main means of carrying out practical calculations of material strength. It is shown that in order to determine the stresses and strains in parts that move at high speeds in a liquid or gas, it is necessary to take into account the model of parts exploitation, the processes of creep and thermal fatigue of the material, and the unsteadiness of load processes.

**Keywords:** stresses and deformations of turbine parts; deformation diagram; operating model of turbine parts; creep and thermal fatigue; nonstationarity of loading processes

**Вступ.** Як відомо, деталі турбін та інших лопатевих машин, а саме лопатки, ротору і корпусу працюють в умовах високих температур, значних навантажень, що зумовлені відцентровими силами інерції і нерівномірністю розподілу температур. При цьому в деталях виникають неоднорідні температурні деформації [1–7].

У процесі роботи природа навантаження на деталі може бути силова (дія відцентрових сил) і теплова (виникає внаслідок різниці температур). Крім того, обидва види навантажень можуть бути як стаціонарними (постійні у часі), так і нестационарними (повільно або швидко мінливі у часі). Постійне чергування стаціонарних і нестационарних (перехідних) режимів викликає накопичення пошкоджень від малоциклової втоми і повзучості.

Часті та різкі зміни швидкості роботи деталей викликають коливання елементів. При цьому можливі руйнування деталей внаслідок багатоциклової втоми. Якщо деталь працює у потоці пари або газу, то присутні рідкі або тверді частинки при зіткненні з деталлю викликають поверхневе її ушкодження, що призводить до ерозії цієї поверхні. Наприклад, серйозною проблемою вважається ерозія деталей у потоці вологої пари, при якій пошкоджуються лопатки та інші елементи проточної частини парових турбін. Домішки у воді, парі, газі негативно впливають на деталі. Вони можуть викликати різного виду корозію: загальну, виразкову, корозійно-ерозійне зношування тощо.

© М.В. Прокопенко, 2021

Щоби виконати розрахунки напружень і деформацій у деталях при заданих зовнішніх умовах, необхідно мати певні співвідношення і закономірності (кінцеві, диференціальні), тобто знати фізичні закони деформування матеріалу. Як відомо, для матеріалу, що знаходиться у пружному стані, таким законом деформування є закон Гука. При напруженнях, що перевищують межу пружності, потрібно мати закон пластичного деформування. У разі роботи деталі при підвищених температурах додатково треба мати закон повзучості.

У загальному вигляді закон деформування – це залежність напружень  $\sigma$  і деформацій  $\varepsilon$  тіла від зовнішніх навантажень, температур та інших факторів впливу.

Про міцність деталі неможливо говорити тільки з розрахунку деформацій і напружень, навіть з урахуванням їх зміни у часі. Необхідно мати критерії міцності, що встановлюють співвідношення між параметрами міцності. У загальному випадку критерій міцності має відповідати на питання: зруйнується чи ні деталь при відомих законах зміни в часі напружень, деформацій і температур [7–13]?

Відмова або вихід деталі (або всього вузла чи системи) з ладу може відбутися не тільки внаслідок порушення її міцності, а й за іншими причинами. Наприклад, через неприпустимі зміни розмірів і форми деталі і торкання обертових деталей об нерухомі, через підвищення вібрацій тощо.

*Мета роботи* – аналіз напружень та деформацій деталей, що рухаються з великими швидкостями в рідині або газі.

**Способи вирішення завдань міцності деталей.** Існують такі способи вирішення завдання надійності деталей або виробу в цілому [7, 10]:

1. Математичне моделювання (розрахункове визначення міцності, довговічності та надійності).
2. Фізичне моделювання (випробування моделей).
3. Випробування натурних виробів у відтворюваних реальних або експлуатаційних умовах.

Перший спосіб є найбільш економічним. Він пов'язаний із найменшими витратами коштів і часу. Однак він не завжди дає достатню точність і, крім того, для його застосування потрібно найбільше інформації про властивості об'єкта та необхідно мати його математичну модель. При використанні третього способу потрібні мінімальні відомості про об'єкт, а достовірність результатів – найбільша, тому що можливо безпосередньо встановити ресурс роботи об'єкта в реальних умовах його експлуатації. Однак третій спосіб, як правило, найбільш фінансово витратний, трудомісткий, тривалий і дає одиничний результат, тобто отриманий результат не завжди можна розповсюдити на інші подібні об'єкти. Другий спосіб займає проміжне становище. У реальних умовах при визначенні надійності деталей, що рухаються з високими швидкостями, і виробів у цілому, застосовують всі три способи. Перший спосіб, як правило, використовують на

стадії проектування. Потім для перевірки рішення можуть використовувати фізичне моделювання елементів. І на третій стадії здійснюють натурні випробування окремих вузлів або всього виробу [7].

У випадку одноосового розтягування–стиснення закон деформування матеріалу визначається істинною діаграмою розтягування (рис. 1). Ця діаграма будується в координатах напруження–деформація:

$$\varepsilon = f(\sigma), \quad (1)$$

де  $\varepsilon = \ln(F_0/F)$ ;  $\sigma = P/F$ ;

$F$  – площа поперечного перерізу зразка у найбільш вузькому перерізі шийки зразка;

$F_0$  – початкова площа перетину зразка;

$P$  – розтягуюче навантаження, прикладене до зразка.

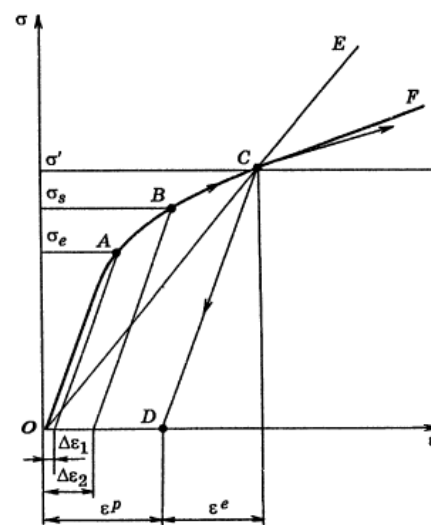


Рисунок 1 – Істинна діаграма розтягування

До моменту утворення шийки на зразку умовна діаграма розтягування, побудована в координатах  $\sigma_y = P/F_0$ ,  $\varepsilon_y = \Delta l/l_0$ , мало відрізняється від істинної діаграми. Тут  $\Delta l$  – подовження зразка, а  $l_0$  – початкова довжина зразка.

Умовна межа пружності  $\sigma_e$  – напруження, при якому залишкова деформація  $\Delta \varepsilon_1$  досягає 0,001 ... 0,01%. Таким чином, межа пружності є умовною характеристикою, що залежить від значення прийнятої залишкової деформації.

Професор А.Г. Костюк у своїх роботах [7, 10] пропонує наступну методику визначення напружень і деформацій. Вводиться умовна межа напружень  $\sigma_k$ , що визначається як напруження, при якому залишкова деформація  $\varepsilon_k^p$  після розвантаження дорівнює пружній деформації перед розвантаженням (рис. 2):

$$\varepsilon_k^p = \sigma_k/E, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль пружності.

У довільній точці  $C$  діаграми розтягування (див. рис.1) визначимо січний і дотичний модулі відповідно, які характеризують відповідно кути

нахилу січної OSE та дотичної CF лінії до кривої деформування у цій точці:

$$E^p = \sigma/\varepsilon, \quad (3)$$

$$E^t = d\sigma/d\varepsilon. \quad (4)$$

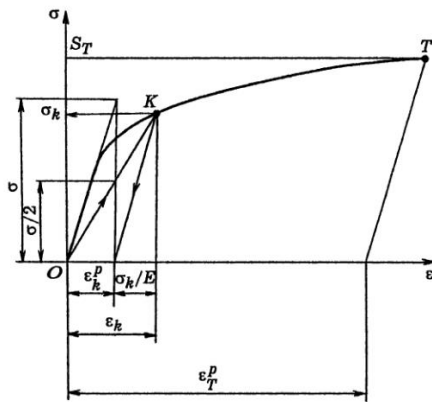


Рисунок 2 – Графічне визначення  $\sigma_k$

Використовуючи рівняння (2), можна знайти значення  $\sigma_k$  і  $\varepsilon_k^p$  (див. рис. 2).

Повна деформація у точці К:

$$\varepsilon_k = \sigma_k/E + \varepsilon_k^p = 2\sigma_k/E.$$

Звідси січний модуль

$$E_k^p = \sigma_k/\varepsilon_k = E/2.$$

З останнього рівняння виходить, що січний модуль у розрахунковій точці К дорівнює половині модуля пружності. Отже, для отримання точки К слід провести з початку координат пряму з кутовим коефіцієнтом  $E/2$  до перетину з кривою розтягування. Координати точки перетину (значення  $\sigma_k$  і  $\varepsilon_k$ ) задовольняють умові (2).

У цих же працях [7, 10, 12, 14] вказано, що навантажування зразка і подальше його розвантаження до  $\sigma = 0$  дає можливість виявити наступні особливості пружного деформування (див. рис. 1).

Якщо  $\sigma < \sigma_e$ , то приймають, що закон деформування виражається законом Гука, як при навантаженні, так і під час розвантаження.

Якщо  $\sigma > \sigma_e$ , то в умовах навантаження ( $\Delta\sigma > 0$ ) залежність  $\sigma$  від  $\varepsilon$  стає нелінійною, тобто

$$\varepsilon = \sigma/E + \varepsilon^p, \quad (5)$$

де  $\varepsilon^p$  – пластична деформація, яка нелінійно залежить від  $\sigma$ .

Якщо при напруженні  $\sigma > \sigma_e$  здійснюється розвантаження ( $\Delta\sigma < 0$ ), то залежність  $\sigma$  від  $\varepsilon$  лінійна, тобто

$$\varepsilon - \varepsilon' = (\sigma - \sigma')/E,$$

де  $\sigma'$ ,  $\varepsilon'$  – значення напруження і деформації у точці переходу від навантаження до розвантаження (точка С).

Навантаженням матеріалу у пластичній області

є процес зі зміною значення пластичної деформації. Розвантаження – процес, що протікає при незмінному значенні пластичної деформації. У точці С, як і у довільній точці у пластичній області, існує дві можливості деформування: навантаження і розвантаження. При навантаженні точка рухається по кривій деформування вправо від точки С, при розвантаженні – по прямій CD.

**Аналітичний вигляд діаграм деформування.** Відомо, що для здійснення практичних розрахунків зручно користуватися аналітичними формами діаграм деформування. Тому діаграми апроксимують деякими спрощеними залежностями (моделями діаграм) [7, 10].

Модель пружного ідеально-пластичного матеріалу характеризується діаграмою (рис. 3), що складається з двох прямих

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon, & (0 < \varepsilon < \varepsilon_s); \\ \sigma = \sigma_s, & (\varepsilon > \varepsilon_s). \end{cases} \quad (6)$$

Залежність  $\sigma = f(\varepsilon)$  при розвантаженні визначається так:

$$\Delta\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon'). \quad (7)$$

У більшості випадків достатньо точний опис діаграми деформування дається апроксимуючою залежністю:

$$\varepsilon = \sigma/E + \varepsilon_k^p (\sigma/\sigma_k)^m. \quad (8)$$

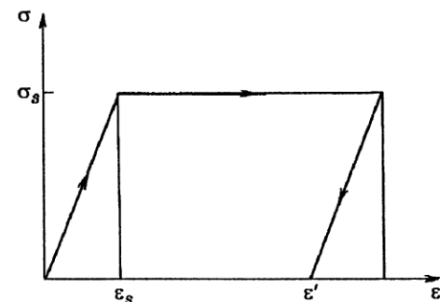


Рисунок 3 – Діаграма деформування пружного ідеально-пластичного матеріалу

Пластична деформація має ступеневу залежність із напруженням

$$\varepsilon^p = \varepsilon_k^p (\sigma/\sigma_k)^m, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_k^p$  і  $\sigma_k$  – пластична деформація і напруження довільно обраної точки на діаграмі деформування.

Зручно як базову точку вибрати таку, для якої справедливе співвідношення (2). Постійна  $m$  може бути знайдена з умови проходження кривої (8) ще через одну обрану точку з координатами  $\varepsilon_0, \sigma_0$ . Тоді

$$m = \ln(\varepsilon_0^p/\varepsilon_k^p)/\ln(\sigma_0/\sigma_k), \quad (10)$$

де  $\varepsilon_0^p = \varepsilon_0 - \sigma_0/E$ .

Другою опорною точкою може бути обрана точка руйнування  $T$  (див. рис. 2), для якої

$$\sigma_0 = S_T \quad \text{і} \quad \varepsilon_0^p = \varepsilon_T^p,$$

де  $S_T$  – дійсний опір руйнування,

$\varepsilon_T^p$  – дійсна пластична деформація у момент руйнування.

При виконанні умови (2) співвідношення (8) може бути записано у вигляді такої універсальної залежності:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\sigma} + \bar{\sigma}^m. \quad (11)$$

При цьому

$$\bar{\varepsilon} = E\varepsilon/\sigma_k; \bar{\sigma} = \sigma/\sigma_k. \quad (12)$$

Наведені параметри (12) дають можливість узагальнити діаграми деформування для різних температур і навіть для змінної температури у процесі деформування, тобто розглянути неізотермічне деформування. Для неізотермічного випадку має виконуватися умова  $E/\sigma_k = const$  у певній області зміни температур. Ця умова, як правило, виконується із достатньою точністю для усіх сталей і сплавів [1, 8].

Умови навантаження і розвантаження у пластичній області в разі неізотермічного деформування можна подати у вигляді

$$d\varepsilon^p > 0, \text{ якщо } d(\sigma/\sigma_k) > 0, \\ \text{та } d\varepsilon^p = 0, \text{ якщо } d(\sigma/\sigma_k) < 0.$$

Питання вивчення процесу пластичного деформування та тривалої міцності розглянуто у роботах А. Г. Костюка, Ю. Н. Работнова, John Wesley Mitchell та ін. [7–13, 15–17].

Основні характеристики повзучості для конструкційних матеріалів зазвичай отримують при випробуванні призматичних (циліндричних) зразків на розтягнення при постійному навантаженні  $P$  [11, 12, 18].

При випробуваннях вимірюють подовження зразка в залежності від часу від моменту навантаження. Температуру при випробуванні підтримують постійною.

У результаті випробувань партії зразків при різних початкових напруженнях і однакової температурі отримують серію первинних кривих повзучості [7, 10].

Якщо випробування кожного зразка довести до його руйнування, то отримують і характеристики тривалої міцності (зірочками відзначені моменти руйнування). Як правило, криві повзучості визначають для декількох значень температури  $T$ .

Відносну силову деформацію  $\varepsilon = \Delta l/l_0$  можна записати у вигляді [7, 11]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c,$$

де  $\varepsilon^e = \sigma/E$  – пружна деформація, що виникає у момент навантаження;

$\varepsilon^p$  – пластична деформація (короткочасна), яка також виникає в момент навантаження, якщо напруження перевищує межу пружності матеріалу;

$\varepsilon^c$  – деформація повзучості.

Перші дві складові деформації розглянути раніше. Залежність третьої складової від часу має три характерних ділянки, які відповідають трьом стадіям повзучості.

На першій стадії повзучість відбувається зі швидкістю, що постійно зменшується і прагне до кінця періоду до деякого граничного значення, на другій – характеризується постійною швидкістю повзучості, нарешті, на третій стадії швидкість повзучості починає зростати до моменту руйнування ( $t = t_p$ ) [7].

На перших двох стадіях деформація зразка рівномірна по його довжині, площа поперечного перерізу мало відрізняється від початкового значення. На третій стадії повзучості на зразку зазвичай (але не завжди) утворюється місцеве зменшення площі перетину (шийка) аналогічно короткочасному деформуванню. При утворенні шийки повзучість протікає при напруженнях, що збільшуються, оскільки випробування здійснюються при постійних навантаженнях, а площа перетину зразка зменшується з розвитком шийки. Друга причина збільшення швидкості повзучості на стадії III – це поява мікротріщин, їх зростання, злиття і поширення на весь перетин зразка [7, 10].

Для аналітичного аналізу кривих повзучості користуються емпіричними залежностями, що зв'язують деформацію повзучості з основними параметрами (часом, напруженням і температурою), тобто [1]

$$\varepsilon^c = f(t, \sigma, T). \quad (13)$$

Із численних залежностей виду (13) розглянемо найбільш поширену

$$\varepsilon^c = v\Omega(t), \quad (14)$$

$$v = A\sigma^n, \quad (15)$$

$$\Omega(t) = a(1 - e^{-pt}) + t. \quad (16)$$

Тут  $v$  – швидкість повзучості на стадії II, а  $\sigma$  – напруження, при якому здійснюють випробування.

Для залежності  $A$  від температури  $T$  справедлива напів-емпірична формула

$$A = A_0 \exp(-\Delta H/T_0), \quad (17)$$

де  $A_0$ ,  $\Delta H$  – константи;

$T_0$  – абсолютна температура.

Коли  $a$  і  $p$  залежать тільки від температури і не залежать від напружень, функція  $\Omega(t)$  однакова для всіх кривих повзучості, отриманих при фіксованій температурі.

Усі постійні при фіксованій температурі величини  $A, n, a, p$  визначаються обробкою первинних кривих повзучості методом найменших квадратів.

Апроксимуючі залежності типу (14)–(16) не описують стадії повзучості III. Вони служать для екстраполяції деформаційних залежностей на області зміни визначальних параметрів (напруження, температури, часу), що виходять за межі зміни цих параметрів при випробуваннях. Подібна екстраполяція абсолютно необхідна у тих випадках, коли випробовуваний матеріал призначений для обладнання, розрахованого на тривалий термін

експлуатації. Зазвичай тривалість випробувань матеріалу становить від 2 до 10 тис. год.

Наприклад, стаціонарні турбіни мають бути розраховані на ресурс до  $10^5 \div 2 \cdot 10^5$  год. Тому матеріали випробують при напруженнях, що перевищують значення напружень у деталях обладнання. Швидкість повзучості при випробуваннях відповідно значно більша, ніж при експлуатації, а час до руйнування значно менший, ніж ресурс деталей [7, 10].

Прогнозування деформацій повзучості і є основним призначенням екстраполяційних формул (14)–(16).

Розглянуті стандартні характеристики повзучості і тривалої міцності можуть бути безпосередньо використані в розрахунках тільки для тих деталей, у яких реалізовано одновісний напружений стан при постійних напруженнях і температурі, тобто коли умови роботи матеріалу повністю відповідають умовам випробувань матеріалів. У більшості випадків така відповідність не спостерігається. Тому виникає питання розрахунку деталей в умовах неодносного і змінного напруженого стану при змінних температурах [7, 10–12].

Тривала міцність матеріалу при неодносному нестаціонарному напруженому стані (особливо при зміні головних осей тензора напружень у просторі) повністю не досліджена, тому розрахунки, засновані на використанні багатьох припущень, недостатньо перевірених експериментально, виправдані як перше наближення. Введення чималих коефіцієнтів запасу є гарантією неруйнування деталі за термін служби [1, 8].

**Висновок.** Таким чином, для визначення напружень та деформацій в деталях, що рухаються з великими швидкостями в рідині або газі, у сучасних методиках обов'язково враховують:

- 1) модель експлуатації деталей та вузлів;
- 2) процеси повзучості матеріалу;
- 3) процеси термовтомленості матеріалу;

4) нестаціонарність процесів навантаження деталей та вузлів (велика швидкість зміни рівня навантажень, температур, частота обертання тощо).

Надалі ці чинники будуть враховані у дослідженнях міцності елементів різноманітних конструкцій.

#### Список літератури

1. Веретельник Ю.В., Ткачук Г.В., Кохановська О.В., Храмова І.Я., Зарубина А.О., Кохановський В.І., Ткачук М.А., Малакей А.М., Набоков А.В., Головін А.М., Веретельник О.В. Комп'ютерне моделювання процесів і станів складних систем: обґрунтування параметрів моделей розрахунково-експериментальним шляхом *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 12 (1234). С. 14–25.
2. Гриньов В.Б., Танченко А.Ю., Ткачук М.А., Грабовський А.В., Гусев Ю.В., Набоков А.В., Лісовол Я.М. Методи дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних конструкцій при варіюванні товщини. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 12 (1234). С. 33–43.
3. Шейченко Р. І., М. А. Ткачук, М. О. Бондаренко, Луньов Є. О. Числове моделювання напружено-деформованого стану

інноваційних тонкостінних машинобудівних конструкцій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 12 (1234). С. 137–145.

4. Ткачук Н.А., А.В. Хлань, А.В. Грабовський, А.В. Заворотний, О.В. Веретельник, А. М. Головін, А. О. Черкашин Математические модели напряженно-деформированного состояния элементов боевых машин и технологических систем для их изготовления. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 7 (1283). С. 121–131.
5. Хлань О.В., М.А. Ткачук, А.В. Грабовський, О.О. Атрошенко, А.Ю. Васильев, А.Ю. Танченко, Шеманська В. В. Розв'язання прикладних задач аналізу динамічних процесів і напружено-деформованого стану при обґрунтуванні технічних рішень для бойових машин та технологічних систем для їх виготовлення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. № 7 (1283). С. 148–157.
6. Ткачук Н.А., Хлань А.В., Шейко А.И. [и др.] Разработка математического аппарата для решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2017. № 12 (1234). С. 110–131.
7. Костюк А.Г. *Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов* /3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом, МЭИ, 2007. 476 с.
8. Barber D. J. John Wesley Mitchell. 3 December 1913 - 12 July 2007. *Biogr. Mem. Fell. R. Soc.*, 2011, vol. 57, pp. 269–289
9. Mitchell J. W. Elementary processes in the formation of slip bands in single crystals of  $\alpha$ -phase Cu–Al alloys. *Phys. Status Solidi*, 1993, vol. 135, pp. 455–466
10. Костюк А.Г. *Пластичность и разрушение кристаллического материала при сложном нагружении*. М.: Издательство МЭИ, 2000. 178 с.
11. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
12. Шестериков С.А., Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. *Итоги науки и техники. Сер.: Механ. деформ. тверд. тела*. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 13. С. 3-104.
13. Браун Р. Дж., Лонсдейл Д., Флюитт П. Испытания на длительную прочность при многоосном напряженном состоянии и анализ данных для жаропрочных сталей. *Тр. Амер. общ-ва инженеров-механиков. Теорет. основы инж. расчетов*. 1982. Т. 104. № 4. С. 56-65.
14. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. *Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии* / Под ред. А.А. Лебедева. Киев: Издат. дом «Ин Юре», 2003. 540 с.
15. Никитенко А.Ф. *Ползучесть и длительная прочность металлических материалов*. Новосибирск: НГАСУ, 1997. 278 с.
16. Collins J. A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention (Second edition)*. New York: John Wiley & Sons, 1993. 654 p.
17. Cane B. J., Townsend R. D. Prediction of Remaining Life in Low-Allow Steels, Flow and Fracture at Elevated Temperatures, ed. R. Raj, *Amer. Soc. For Metals, Ohio*, 1985, pp. 279–316
18. Локощенко А. М. *Моделирование ползучести и длительной прочности металлов*. М., МГИУ, 2007. 264 с. [А. М. Lokoshchenko, Modeling of Creep and Long-Term Strength of Metals, Moscow State Industr. Uni., Moscow, 2007, 264 p.]

#### References (transliterated)

1. Veretel'ny`k Yu.V., Tkachuk G.V., Koxanovs'ka O.V., Khramcova I.Ya., Zarubina A.O., Koxanovs'ky`j V.I., Tkachuk M.A., Malakej A.M., Nabokov A.V., Golovin A.M., Veretel'ny`k O.V. Komp'yuterne modelyuvannya procesiv i staniv skladny`x sy`stem: obg`runtuvannya parametriv modelej rozrakhunkovo-ekspery`mental'ny`m shlyaxom *Visny`k Nacional'noho texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2017, no. 12 (1234), pp. 14–25.

2. Gry`n`ov V.B., Tanchenko A.Yu., Tkachuk M.A., Grabovs`ky`j A.V., Gusyev Yu.V., Nabokov A.V., Lisovol Ya.M. Metody` doslidzhennya napruzhenno-deformovanogo stanu tonkostinny`x konstrukcij pry` varyuvanni tovshhy`ny`. *Visny`k Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR. Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2017, no. 12 (1234), pp. 33–43.
3. Shejchenko R. I., M. A. Tkachuk, M. O. Bondarenko, Lun`ov Ye.O. Chy`slove modelyuvannya napruzhenno-deformovanogo stanu innovacijny`x tonkostinny`x mashy`nobudivny`x konstrukcij. *Visny`k Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR. Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2017, no. 12 (1234), pp. 137–145.
4. Tkachuk N.A., A.V. Xlan`, A.V. Grabovs`ky`j, A.V. Zavorotny`j, O.V. Veretel`ny`k, A. M. Golovy`n, A. O. Cherkashy`n Matematy`chesky`e modely` napryazhenno-deformy`rovannogo sostoyany`ya elementov boevy`x mashy`n y` texnologiy`chesky`x sy`stem dlya y`x y`zgotovlenny`ya. *Visny`k Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR. Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2018, no. 7 (1283), pp. 121–131.
5. Xlan` O.V., M.A. Tkachuk, A.V. Grabovs`ky`j, O.O. Atroshenko, A.Yu. Vasy`l`yev, A.Yu. Tanchenko, Shemans`ka V. V. Rozv'yazannya pry`kladny`x zadach analizu dy`namichny`x procesiv i napruzhenno-deformovanogo stanu pry` obg`runtuvanni texnichny`x rishen`k dlya bojovy`x mashy`n ta texnologichny`x sy`stem dlya yix vy`gotovlennya. *Visny`k Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR. Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2018, no. 7 (1283), pp. 148–157.
6. Tkachuk N.A., Xlan` A.V., Shejko A.Y`. [y` dr.] Razrobotka matematy`cheskogo apparata dlya resheny`ya zadach raschetno-ekspery`mental`nogo y`ssledovany`ya elementov mexany`chesky`x sy`stem. *Visny`k Nacional`nogo texnichnogo universy`tetu «KhPI»*. Seriya: *Mashy`noznavstvo ta SAPR. Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2017, no. 12 (1234), pp. 110–131.
7. Kostyuk A.G. Dy`namy`ka y` prochnost` turbomashy`n: uchebny`k dlya vuzov /3-e y`zd., pererab. y` dop. M.: Y`zdatel`sky`j dom, MEY`, 2007. 476 p.
8. Barber D. J. John Wesley Mitchell. 3 December 1913 - 12 July 2007. *Biogr. Mems. Fell. R. Soc.*, 2011, vol. 57, pp. 269–289
9. Mitchell J. W. Elementary processes in the formation of slip bands in single crystals of  $\alpha$ -phase Cu–Al alloys. *Phys. Status Solidi*, 1993, vol. 135, pp. 455–466
10. Kostyuk A.G. *Plasty`chnost` y` razrusheny`e kry`stally`cheskogo matery`ala pry` slozhnom nagruzheny`y`*. M.: Y`zdatel`stvo MЭУ, 2000. 178 p.
11. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest` elementov konstrukcy`j*. M.: Nauka, 1966. 752 p.
12. Shestery`kov S.A., Lokoshhenko A.M. Polzuchest` y` dly`tel`naya prochnost` metallov. *Y`tohy` nauky` y` texny`ky`*. Ser.: *Mexan. deform. tverd. tela*. M.: VY`NY`TY`, 1980, vol. 13, pp. 3–104.
13. Braun R. Dzh., Lonsdejl D., Flyuy`tt P. Y`spytany`ya na dly`tel`nuyu prochnost` pry` mnogoosnom napryazhennom sostoyany`y` y` analy`z dannyx dlya zharoprochnyx stalej. *Tr. Amer. obshh-va y`nzhenrov-mexany`kov. Teoret. osnovy y`nzh. raschetov*. 1982, vol. 104, no. 4, pp. 56–65.
14. Lebedev A.A., Koval`chuk B.Y., Gy`gy`nyak F.F., Lamashevsky`j V.P. *Mexany`chesky`e svoystva konstrukcy`omnyx matery`alov pry` slozhnom napryazhennom sostoyany`y` / Pod red. A. A. Lebedeva*. Ky`ev: Y`zdat. dom «Y`n Yure», 2003. 540 p.
15. Ny`ky`tenko A.F. *Polzuchest` y` dly`tel`naya prochnost` metally`chesky`x materialov*. Novosy`b`rsk: NGASU, 1997. 278 p.
16. Collins J. A. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention (Second edition)*. New York: John Wiley & Sons, 1993. 654 p.
17. Cane B. J., Townsend R. D. Prediction of Remaining Life in Low-Allow Steels, Flow and Fracture at Elevated Temperatures, ed. R. Raj, *Amer. Soc. For Metals, Ohio*, 1985, pp. 279–316
18. Lokoshhenko A. M. *Modelirovanie polzuchesti i dlitel`noj prochnosti metallov*. M., MGIU, 2007, 264 s. [Lokoshchenko A. M. Modeling of Creep and Long-Term Strength of Metals]. Moscow, Moscow State Industr. Uni., 2007, 264 p.

Надійшла (received) 11.09.2021

#### Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

**Прокопенко Микола Вікторович (Прокопенко Николай Викторович, Prokopenko Mykola)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: kola0123@ukr.net.