

**Кузьмич Л. В., к.т.н., докторант** (Національний авіаційний університет, Київ), **Кузьмич А. А., студентка** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ МАЛОЦИКЛОВОЇ ТА БАГАТОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ**

**Запропоновано підхід щодо оцінки залишкового ресурсу у випадку домінування механізмів малоциклової втоми, багатоциклової втоми, повзучості або їхньому поєднанні, що базується на моделюванні основних фізичних стадій розвитку процесу вичерпування ресурсу, стадій зародження та поширення по всьому об'єму конструкції мікропошкоджень до утворення макроскопічної тріщини, її розвитку та досягнення її критичного розміру.**

**Ключові слова:** ресурс, залишковий ресурс, малоциклова втома, багатоциклова втома, повзучість, пошкодження, тріщина.

### **Постановка проблеми**

В умовах сучасного виробництва важливою задачею є оцінка ресурсу складних потенційно небезпечних інженерних конструкцій на стадії проектування, оцінка відпрацьованого та прогноз залишкового ресурсу в процесі експлуатації, подовження строку служби після відпрацювання нормативного терміну експлуатації. Експлуатаційні умови роботи таких конструкцій характеризуються різного роду впливами, що призводять до деградації конструкційних матеріалів та вичерпування ресурсу конструкцій. Процеси вичерпування ресурсу є багатостадійними, нелінійними та взаємопов'язаними.

При оцінці та обґрунтуванні ресурсу складних технічних конструкцій слід вирішувати наступні задачі:

- елементний аналіз конструкції, умови експлуатації, технологію виготовлення та початкову дефектність;
- виявлення домінуючих вузлів, що призводять до вичерпування ресурсу всієї конструкції;
- моделювання вичерпування ресурсу з врахуванням деградації конструкційних матеріалів і умов експлуатації;
- здійснення розрахунків та експериментальних досліджень для виявлення небезпечних зон в конструкціях і визначення конкретних характеристик процесів вичерпування ресурсу в цих зонах;
- формування відповідних баз даних з метою накопичення інфор-

мації про процеси вичерпування ресурсу в складних технічних конструкціях і отримання необхідної інформації для оперативної оцінки і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації;

- створення методик і систем оперативної оцінки і прогнозу залишкового ресурсу в процесі експлуатації складних технічних конструкцій;
- отримання необхідної інформації для прийняття рішення про продовження строку експлуатації конструкцій, їх ремонті, реконструкції або заміні.

Основними питаннями для вирішення цих питань з точки зору механіки є:

- вибір макрозмінних, що відображають істотні процеси вичерпування ресурсу на мікро- та макрорівнях;
- обґрунтування строків вичерпування ресурсу з врахуванням міри пошкодження (відмови);
- моделювання процесів деформування та вичерпування ресурсу;
- виявлення основних факторів, що впливають на швидкість процесів вичерпування ресурсу і встановлення конкретних залежностей для цих впливів;
- моделювання залежності швидкостей процесів вичерпування ресурсу конструкції на всіх стадіях його розвитку від умов експлуатації;
- встановлення принципів еквівалентності процесів вичерпування ресурсу між собою та експериментальними даними досліджень;
- встановлення кореляційних залежностей між параметрами математичних моделей вичерпування ресурсу та параметрами діагностики стану конструкційного матеріалу;
- розробка методики та алгоритму оперативної оцінки відпрацьованого ресурсу та прогнозу залишкового ресурсу конструкцій в процесі експлуатації на основі отриманої попередньої інформації;
- визначення реальних експлуатаційних параметрів складних технічних конструкцій впродовж усього часу його експлуатації.

#### **Аналіз останніх досліджень**

Вирішення поставлених задач вимагає адекватного інформаційного забезпечення за рахунок підвищення надійності функціонування конструкцій, застосування систем внутрішнього контролю і оперативної діагностики стану технічних засобів. Однак всі ці заходи не вирішують у повному обсязі поставлені задачі, особливо в умовах повільної еволюції характеристик об'єкту контролю, їхньої великої розмірності, складнощами в умовах спостереження за протіканням процесів та мінливості факторів, що на них впливають, інформацію про які можна віднести до категорії нечітких множин. Самі моделі процесів носять емпіричний та напівемпіричний характер [1].

В основу моделювання процесів деформування та вичерпування ресурсу рівняння взято рівняння термов'язкопластичності, рівняння розвитку макродефекту, критерії стійкості процесів вичерпування ресурсу та еволюційні рівняння [1; 2; 3].

Рівняння термов'язкопластичності містять в собі мікропараметри, що враховують вплив накопичення пошкоджень на фізико – механічні властивості матеріалу конструкції [1; 4; 5].

Критерії, що оцінюють стійкість процесів вичерпування ресурсу, засновані на контролі величини похідної пошкодження (відмови) за узагальненими енергетичними параметрами, що є внутрішнім часом даних фізичних процесів [6].

Еволюційні рівняння пошкоджень враховують фізичні стадії процесу накопичення пошкоджень, вплив параметрів напружено – деформованого стану, температури, виду траєкторії деформування і вплив деформування на швидкість процесу накопичення пошкоджень, його нелінійний характер, нелінійне сумування пошкоджень при зміні режиму навантаження та від різних механізмів вичерпування ресурсу [4; 6].

#### **Формулювання мети**

Оцінка залишкового ресурсу – багаторівневий ітераційний процес послідовної деталізації і оптимізації діагностичних рішень. Недостатня вивченість окремих явищ не дозволяє мати повністю математично формалізований опис конструкції. Оскільки оцінка здійснюється на основі функції пошкодження (відмови), то для її визначення потрібно враховувати невизначеності, що виникають через мінливість технологічних ситуацій, в яких ставляться діагнози.

#### **Виклад основного матеріалу**

Існуючі інженерні підходи до оцінки ресурсу при багато цикловій та мало цикловій втоми базуються на відомих даних навантаження на конструкцію у вигляді певного нестационарного процесу, що задається значеннями еквівалентних напружень або деформацій. За допомогою відомих методик реальний нестационарний процес деформування приводиться до симетричного блочного процесу, причому різні частини одного циклу можуть відноситись до різних навантажень. Використовуються правила лінійного сумування пошкоджень. Ступінь пошкодження оцінюється відносною кількістю циклів (втома) або відносним часом (повзучість). Процеси формування та вичерпування ресурсу моделюються окремо.

Для кожної стадії процесу вичерпування ресурсу встановлюється узагальнений енергетичний параметр, що характеризує конкретні умови протікання процесу для кожної небезпечної зони конструкції, що залежить від відповідних долей дисипації енергії на створення мікродефектів в рамках відповідного механізму вичерпування

ресурсу. На базі узагальнених енергетичних параметрів формуються принципи еквівалентності процесів вичерпування ресурсу між собою в їх еквівалентності експериментальним даним. Реалізується принцип нелінійного сумування пошкоджень. Задачі в рамках механіки пошкоджень формуються як зв'язані за процесами деформування і накопичення пошкоджень. Складаються еволюційні рівняння накопичення пошкоджень і визначаються критерії стійкості процесів вичерпування ресурсу.

В нашому випадку еволюційне рівняння накопичення пошкоджень матиме вигляд:

$$w = \sum_z \frac{\alpha_k + 1}{l_k + 1} f_k(q_k) z_k^{\alpha_p} (1-w)^{-r_k} \langle \dot{z}_k \rangle, 0 \leq w \leq w_f < 1, h = e, p, c, \quad (1)$$

де  $w$  – нормована функція пошкодження (відмови);  $q_k$  – параметри напружено-деформованого стану і виду траєкторії деформування;  $z_k$  – нормовані долі дисипації на створення мікрodefektів по механізмам багато циклової втоми  $z_e$ , мало циклової втоми  $z_p$ , повзучості  $z_c$ ;  $\alpha_k, r_k$  – матеріальні параметри – функції температури;  $w_f$  – критичне значення мікротріщини.

Рівняння (1) інтегрується разом з рівняннями термов'язкопластичності через параметри  $q_k, z_k, z_e$  і температуру  $T$ . В свою чергу матеріальні параметри рівнянь термопластичності залежать від накопичених пошкоджень (відмов).

При домінуючих механізмах мало циклової та багато циклової втоми процес накопичення пошкоджень описується рівнянням:

$$w = 1 - \left\{ 1 - \left[ (\alpha_p - 1) \int_0^{\bar{z}_e} f_p(q_k) z_e^{\alpha_p} \langle dz_e \rangle + (\alpha_e + 1) \int_0^{\bar{z}_k} f_e(q_k) z_k^{\alpha_e} \langle dz_k \rangle \right]^{\frac{1}{r+1}} \right\}, \quad (2)$$

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x \leq 0 \end{cases}$$

або

$$w = 1 - \left( 1 - \left[ y_p^{\alpha_p+1} + y_c^{\alpha_c+1} \right]^{\frac{1}{r+1}} \right), \quad (3)$$

де  $y_p$  та  $y_e$  – малоциклова та багатоциклова втоми, як параметри

внутрішнього часу процесу:

$$y_p = \left[ (\alpha_p + 1) \int_0^{z_p} f_p(q_k) z_p^{\alpha_p} \langle dz_p \rangle \right]^{\frac{1}{\alpha_p + 1}}, \quad (4)$$

$$y_e = \left[ (\alpha_e + 1) \int_0^{z_e} f_e(q_k) z_e^{\alpha_e} \langle dz_e \rangle \right]^{\frac{1}{\alpha_e + 1}},$$

$$z_p = \frac{W_p - W_a}{(W_f - W_a)_p}, \quad z_e = \frac{W_e - W_y}{W_{fe}},$$

де  $W_p$ ,  $W_e$  – долі енергії дисипації, спрямовані на утворення мікродефектів при малоцикловій та багатоцикловій втомі. Матеріальні функції  $W_a$ ,  $W_y$  відображають закінчення стадії зародження мікродефектів при мало цикловій та багато цикловій втомі ( $z_k = 0$  при  $W_p < W_a$  і  $W_e < W_y$ ), а матеріальні функції  $W_{fe}$  – критичного значення відповідних енергій.

Згідно рівнянь (2)-(4) для кожного процесу, що характеризується індивідуальною історією термосилового навантаження на певний об'єм матеріалу, відповідає своя крива накопичення пошкоджень у площині змінних  $w \sim W_p$  ( $w \sim z_p$ ),  $w \sim W_e$  ( $w \sim z_e$ ) і при зміні режимів термосилового навантаження відбувається перехід з однієї кривої на іншу (нелінійне сумування). На фазових площинах  $w \sim y_p$  та  $w \sim y_e$  кожному механізму вичерпування ресурсу відповідають єдині узагальнені криві пошкодження. При цьому швидкості руху по цим кривим залежать від конкретних параметрів навантаження.

### Висновки

Для прийняття рішення по залишковому ресурсу необхідно на основі аналізу технічного стану конструкції скласти її модель та задати критерій оцінки експлуатаційного режиму.

Запропонований підхід по оцінці виробленого ресурсу у випадку домінування механізмів малоциклової втоми, багатоциклової втоми, повзучості або їхньому поєднанні базується на моделюванні основних фізичних стадій розвитку процесу вичерпування ресурсу, стадій зародження та поширення по всьому об'єму конструкції мікропошкоджень до утворення макроскопічної тріщини, її розвитку та досягнення її критичного розміру.

1. Коротких Ю. Г., Бех О. И. Уравнения механики поврежденной среды для циклических неизотермических процессов деформирования. *Прикладные*

*проблемы прочности и пластичности. Методы решения* : всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т., 1989. С. 96–100. **2.** Маковкин Г. А., Юдников С. Г., Нестеров А. П. Оценка остаточной усталостной долговечности путем математического моделирования процессов повреждения. *Исследование технического состояния зданий и сооружений в процессе экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов. Промышленная безопасность – 2005* : сб. статей. Н. Новгород : Изд. ННГАСУ, 2005. С. 66–68. **3.** Volkov I. A., Korotkikh Yu. G., Tarasov I. S., Shishulin D. N. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions / *J. Strength of Materials*. 2011. Vol. 43b, No. 4. P. 471–485. **4.** Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 1994. 225 с. **5.** Волков И. А., Коротких Ю. Г., Шишулин Д. Н. Экспериментальные методы определения материальных параметров теории пластического течения. *Прикладная механика и технология машиностроения* : сб. науч. тр. ; под ред. В. И. Ерофеева, С. И. Смирнова и Г. К. Сорокина. Н. Новгород : Интелсервис, 2010. № 2(17). С. 189–203. **6.** Большухин М. А. Зверев Д. Л., Кайдалов В. Б. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости. *Проблемы прочности и пластичности* : межвуз. сб. Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2010. № 72. С. 28–35.

## REFERENCES:

**1.** Korotkikh Yu. H., Bekh O. Y. Uravneniya mekhanyky povrezhdennoi sredy dlia tsyklycheskykh neyzotermicheskikh protsessov deformatsyy. *Prykladnye problemy prochnosti y plastychnosti. Metody resheniya : vsesoiuz. mezhvuz. sb. Hork. un-t., 1989. S. 96–100.* **2.** Makovkyn H. A., Yudnykov S. H., Nesterov A. P. Otsenka ostatochnoi ustalostnoi dolhovechnosti putem matematycheskoho modelyrovaniya protsessov povrezhdeniya. *Yssledovanye tekhnicheskogo sostoianiya zdaniy y sooruzheniy v protsesse ekspertyzy prombezopasnosti opasnykh proyzvodstvennykh ob'ektov. Promyshlennaia bezopasnost – 2005* : sb. statei. N. Novhorod : Yzd. NNHASU, 2005. S. 66–68. **3.** Volkov I. A., Korotkikh Yu. G., Tarasov I. S., Shishulin D. N. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions / *J. Strength of Materials*. 2011. Vol. 43b, No. 4. P. 471–485. **4.** Kazakov D. A., Kapustyn S. A., Korotkikh Yu. H. Modelyrovanye protsessov deformatsyy y razrusheniya materyalov y konstruktsiy. N. Novhorod : Yzd-vo Nyzhehorod. un-ta, 1994. 225 s. **5.** Volkov Y. A., Korotkikh Yu. H., Shyshulyn D. N. Eksperimentalnye metody opredeleniya materyalnykh parametrov teoryy plastycheskogo techeniya. *Prykladnaia mekhanyka y tekhnolohiya mashynostroeniya* : sb. nach. tr. ; pod red. V. Y. Erofeeva, S. Y. Smyrnova y H. K. Sorokyna. N. Novhorod : Yntelservys, 2010. № 2(17). S. 189–203. **6.** Bolshukhyn M. A. Zverev D. L., Kaidalov V. B. Otsenka dolhovechnosti konstruktsyonnykh materyalov pry sovmestnykh protsessakh malotsyklovoi y mnohotsyklovoi ustalosty. *Problemy prochnosti y plastychnosti : mezhvuz. sb.*

N. Novhorod : Yzd-vo Nyzhehorod. hos. un-ta, 2010. № 72. S. 28–35.  
Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

---

**Kuzmych L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Postdoctoral Fellow**  
(National Aviation University, Kyiv), **Kuzmych A. A., Senior Student**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **THE EVALUATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF COMPLEX TECHNICAL STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF LOW-CYCLE AND MULTI-CYCLE FATIGUE**

**The proposed approach for estimating the produced resource in case of dominance of low-cycle fatigue mechanisms, multi-cycle fatigue, creep or their combination BASED on modeling of the basic physical stages of development of resource depletion process, stages of nucleation and spread throughout the volume of microdamage design to the formation of a macroscopic crack, its development and achievement critical size.**

**Keywords:** resource, residual resource, low-cycle fatigue, multi-cycle fatigue, creep, damage, crack.

---

**Кузьмич Л. В., к.т.н., докторант** (Национальный авиационный университет, г. Киев), **Кузьмич А. А., студентка** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ И МНОГОЦИКЛОЙ УСТАЛОСТИ**

**Предложенный подход по оценке произведенного ресурса в случае доминирования механизмов малоциклового усталости, многоциклового усталости, ползучести или их сочетании базируется на моделировании основных физических стадий развития процесса истощения ресурса, стадий зарождения и распространения по всему объему конструкции микрповреждений к образованию макроскопической трещины, ее развития и достижения ее критического размера.**

**Ключевые слова:** ресурс, остаточный ресурс, малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, ползучесть, повреждение, трещина.

---