

В. М. Михалевич А. О. Танасієнко, А. С. Присяжнюк

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПІДСУМОВУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ДО ЗАДАЧ ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ОЗБРОЄННЯ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Анотація. Запропоновано розглядати пластичність металу деталі озброєння і військової техніки як ресурс, що витрачається впродовж усього її життєвого циклу: під час виготовлення методами гарячого деформування, в процесі експлуатації при змінних і циклічних навантаженнях та під час відновлення пластичним деформуванням. Для оцінювання витрати цього ресурсу використано тензорну модель накопичення пошкоджень, яка враховує історію навантаження. Показано, що з моделі як окремий випадок випливає емпіричний критерій Менсона–Коффіна, а її застосування дає змогу оптимізувати режими гарячого деформування, оцінювати залишкову пластичність деталі після експлуатації та обґрунтовано призначати допустиму відновлювальну деформацію.

Ключові слова: накопичення пошкоджень, ресурс пластичності, циклічне деформування, гаряче деформування, відновлення деталей.

Abstract. It is proposed to regard the plasticity of the metal of a weapon or military equipment part as a resource consumed throughout the part's life cycle: during manufacturing by hot forming, during service under variable and cyclic loads, and during restoration by plastic deformation. A tensor damage accumulation model that takes the loading history into account is used to estimate the consumption of this resource. It is shown that the empirical Manson–Coffin criterion follows from the model as a special case, and that the model makes it possible to optimise hot forming modes, to estimate the residual plasticity of a part after service and to assign the admissible restoring deformation on a sound basis.

Keywords: damage accumulation, plasticity resource, cyclic deformation, hot forming, restoration of parts.

Інтенсивна експлуатація озброєння і військової техніки (ОВТ) в умовах бойових дій супроводжується зростанням потреби в запасних частинах, яка визначається передусім технічним станом агрегатів і швидкістю зношування їхніх сполучень [1]. Частину цієї потреби доцільно покривати оперативним виготовленням деталей методами обробки металів тиском і відновленням зношених або деформованих деталей пластичним деформуванням (осадженням, роздаванням, обтисканням, правкою). Обидва шляхи пов'язані з тим самим питанням: яку частину пластичності металу вже витрачено і скільки її залишилося. Технічна діагностика дає змогу оцінити геометричні параметри зносу (див., наприклад, дані щодо кінетики зношування ствола 120-мм міномета [2]), проте стан металу, зумовлений попередньою історією деформування, лишається поза її межами.

Управління технічним станом виробу охоплює всі етапи його життєвого циклу [3]; на рівні матеріалу деталі це означає контроль накопиченої пошкодженості. Тому пропонується розглядати пластичність металу деталі як «бюджет», що витрачається впродовж усього життєвого циклу: при виготовленні, експлуатації та відновленні. Міру витрати цього бюджету можна отримати на основі тензора пошкоджень ψ_{ij} , що визначається за тензорною моделлю накопичення пошкоджень [4]:

$$\psi_{ij} = \int_0^{\varepsilon_e} \left[(1 - c) + 2c \int_0^{\xi} \frac{d\tau}{\varepsilon_{s*}(\tau)} \right] \frac{h_{ij}(\xi) d\xi}{\varepsilon_{s*}(\xi)}, \quad \psi_{ij} \psi_{ij} \leq 1, \quad (1)$$

де ε_e – накопичена інтенсивність пластичної деформації; h_{ij} – напрямний тензор швидкостей деформацій; ε_{s*} – гранична деформація, що залежить від показників напруженого стану, температури та швидкості деформації і визначається за кривою граничних деформацій; c – стала матеріалу, що характеризує міру нелінійності підсумовування пошкоджень ($0 \leq c \leq 1$); при $c = 0$ модель стає тензорно-лінійною та базується на лінійному принципі підсумовування пошкоджень. Нелінійне підсумовування ($c > 0$) і тензорний характер моделі забезпечують урахування широкого спектру особливостей історії деформування: результат

залежить від послідовності етапів і від зміни напрямків головних деформацій, а не лише від сумарної деформації.

Експлуатація: змінні та циклічні навантаження. У [4] розглянуто найзагальніший випадок циклічного деформування, коли під циклом розуміють довільну комбінацію двоетапного деформування: чергування розтягу і кручення, розтягу в різних напрямках, кручення і стиску тощо. Отримано вирази, що визначають залишкову пластичність металу для будь-якого виду подальшого випробування в довільному напрямку після заданої кількості циклів. Для знакозмінного розтягу–стиску при достатньо великій кількості циклів до руйнування N_p модель дає

$$\Delta = \frac{d}{\sqrt{N_p}}, \quad d = \frac{\varepsilon_*}{\sqrt{2c}}, \quad (2)$$

де Δ – розмах пластичної деформації за півцикл. Залежність (2) збігається з емпіричним критерієм Менсона–Коффіна [5], що підтверджує достовірність моделі. Для процесів, у яких граничні деформації на обох етапах циклу однакові (кручення в протилежних напрямках тощо), з моделі випливає, що накопичена до руйнування деформація не залежить від амплітуди, що узгоджується з експериментальними даними. Для деталей ОБТ ці результати дають змогу оцінювати витрату ресурсу пластичності в зонах концентрації напружень при повторних перевантаженнях, а також у поверхневих шарах деталей, що зазнають циклічного термомеханічного навантаження (зокрема каналів стволів).

Виготовлення: гаряче деформування. Модель типу (1), з функцією пам'яті, використано для вибору режиму зміни швидкості деформації при багатоетапному гарячому деформуванні [6, 7]. Для високотемпературного осадження циліндричних заготовок плоскими бойками показано, що раціональний швидкісний режим при заданому рівні пошкодженості дає змогу скоротити тривалість деформування на 47 % (сталь 14X17H2, 1150 °C) [8]. Для штампування обкочуванням, яке дає змогу отримувати поковки при значно менших зусиллях, характерні немонотонні траєкторії деформування бічної поверхні заготовки [9, 10]; саме для таких траєкторій тензорна модель дає істотно точніші оцінки граничної деформації, ніж скалярні критерії.

Відновлення деталей пластичним деформуванням. Відновлення деталей є складовою виробничої системи ремонту [11]. Допустиму відновлювальну деформацію пропонується визначати з умови, щоб пошкодженість, обчислена за (1) для всієї історії деформування (виготовлення, експлуатація, відновлення), не перевищувала допустимого значення, встановленого з урахуванням подальшої експлуатації деталі. Оскільки при $c > 0$ підсумовування пошкоджень нелінійне, внески окремих етапів не можна просто додавати: той самий приріст деформації витрачає тим більше ресурсу, чим більшу пошкодженість уже накопичено. Тензорний характер моделі дає змогу врахувати й те, що деформація зворотного знака (наприклад, правка деталі, деформованої в процесі експлуатації) не додається до попередньої механічно, а частково змінює компоненти тензора пошкоджень.

Висновки. Тензорна модель накопичення пошкоджень дає єдиний підхід до оцінювання витрати ресурсу пластичності деталей ОБТ на етапах виготовлення, експлуатації та відновлення. Її достовірність підтверджується тим, що відомі емпіричні залежності, зокрема критерій Менсона–Коффіна, випливають з неї як окремі випадки. Перспективним є створення на її основі алгоритму підтримки рішень щодо вибору технології та режимів відновлення деталей ОБТ з урахуванням їхньої експлуатаційної історії.

Список використаних джерел

1. Поляков А. П., Мороз Л. В., Стороженко Я. В. Теоретичні підходи до визначення потреби в запасних частинах для спеціальних машин військового призначення в залежності від їх технічного стану. *Актуальні проблеми бойового застосування, експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки (2025)* : матеріали V Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 11–12 листоп. 2025 р. Вінниця : ВНТУ, 2025. С. 93–96.
2. Ярмоленко М. В., Векленко Ю. А. Дослідження кінетики зношування 120 мм мінометного ствола під час тривалих полігонних випробувань за планом NRT. *Актуальні проблеми бойового застосування, експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової*

техніки (2025) : матеріали V Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 11–12 листоп. 2025 р. Вінниця : ВНТУ, 2025. С. 71–72.

3. Біліченко В. В., Козак О. О. Аналіз структури життєвого циклу автомобіля. *Матеріали XLV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 23–24 березня 2016 р. Вінниця : ВНТУ, 2016. URL: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2016/paper/view/1195>

4. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.

5. Coffin L. F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Transactions of the ASME*. 1954. Vol. 76. P. 931–950.

6. Kraievskiy V. O., Mykhalevych V. M. Optimization of the speed mode of multistage hot deformation with equal duration of stages. *Visnyk of Donetsk National University. Ser. A: Natural Sciences*. 2015. No. 1–2. P. 46–52.

7. Kraievskiy V. O., Mykhalevych V. M., Dobranyuk Yu. V., Sawicki D., Mussabekov K. Selection of optimal path of strain rate change during hot deformation. *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10808. 108084T. DOI: 10.1117/12.2501490.

8. Mykhalevych V. M., Kolisnyk M. A. Selection of the strain rate change mode during high-temperature flat-die upsetting of cylindrical billets. *Vibrations in Engineering and Technology* (прийнято до друку).

9. Matviychuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. Analysis of SSS of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in Engineering and Technology*. 2023. No. 1(108). P. 63–72. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-7.

10. Sampaio R. F. V. et al. Reevaluating fracture forming limits in bulk forming under non-monotonic strain loading paths. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2026. Vol. 10, No. 2. 66. DOI: 10.3390/jmmp10020066.

11. Біліченко В. В. Виробничі системи на транспорті: стратегії розвитку : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016. 268 с.

Михалевич Володимир Маркусович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вищої математики Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>

Танасієнко Анастасія Олегівна – студентка групи 2БС-26б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: tanasiienkonastaa@gmail.com

Присяжнюк Ангеліна Сергіївна – студентка групи 2БС-26б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: anhelinaprysiashniuk@gmail.com

Volodymyr Markusovych Mykhalevych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Khmelnytske Shose St., Building 95, Ind. 21021, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>

Anastasiia Olehivna Tanasiienko – Student of Group 2BS-26b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: tanasiienkonastaa@gmail.com

Anhelina Serhiivna Prysiashniuk – Student of Group 2BS-26b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: anhelinaprysiashniuk@gmail.com