

М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М. А. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДВИГУНІВ ТА ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ УСТАНОВОК

Основна увага у статті приділяється проєктно-технологічним заходам, які спрямовані на забезпечення підвищених технологічних характеристик двигунів та турбодетандерних установок. Зокрема, розроблена удосконалена концепція технології дискретно-континуального зміцнення елементів конструкції. Ця концепція полягає у поєднанні проєктних та технологічних заходів у єдиному технічному рішенні. Завдяки такому розширеному простору параметрів забезпечується більша результативність кінцевого синтезованого рішення. Так, на прикладі аналізу напружено-деформованого стану представницького фрагменту контактуючих деталей конструкцій визначено закономірності впливу проєктних і технологічних параметрів на характеристики міцності: обґрунтовані такі набори параметрів, які забезпечують підвищену міцність контактуючих деталей та їх довговічність. Також знижується тертя у спражженні деталей. Крім того, підвищується ККД механізму, у який входять контактуючі деталі, піддані зміцненню. Як результат – підвищення технологічних характеристик двигунів, турбодетандерних установок та інших машин, деталі яких піддані дискретно-континуальному зміцненню. У цілому розроблена концепція спрямована на різке підвищення службових характеристик елементів конструкції. Для цього формуються цільові функції. Ці цільові функції мінімізуються або максимізуються у розширеному параметричному просторі. Для цього створюється параметрична модель напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл. Ця модель дає можливість досліджувати вплив проєктних та технологічних параметрів та трибомеханічні властивості контактуючих тіл. Шляхом цілеспрямованого варіювання властивостей матеріалів, форми та розмірів зон дискретно-го та континуального зміцнення можливо досягти підвищених трибомеханічних характеристик пари контактуючих тіл.

Ключові слова: двигун; турбодетандерна установка; дискретно-континуальне зміцнення; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; контактний тиск

Вступ

До сучасних виробів машинобудівних галузей промисловості ставляться усе зростаючі вимоги до техніко-економічних їх характеристик. Зокрема, це стосується двигунів і енергетичних установок. Зважаючи на особливий акцент на характеристики довговічності, ККД і енергоефективності цих машин, необхідно здійснювати заходи із їх забезпечення на конкурентному рівні. Відповідно, слід відшукувати нові, нетрадиційні шляхи досягнення цієї мети, оскільки традиційні себе значною мірою вичерпали.

Яскравими прикладами об'єктів, на які варто звернути першочергову увагу, є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) та турбодетандерні установки (ТДУ). Саме для цих виробів актуальними є проблеми підвищення міцності, довговічності та ККД їхніх вузлів, у складі яких – контактуючі під інтенсивним навантаженням деталі.

На вирішення зазначеної актуальної та важливої проблеми у частині проєктно-технологічного забезпечення підвищеної міцності, довговічності та ККД елементів двигунів та турбодетандерних установок спрямована ця стаття.

Аналіз існуючих методів зміцнення елементів машинобудівних конструкцій

Для забезпечення високих експлуатаційних характеристик елементів машинобудівних конструкцій застосовуються різноманітні методи їх зміцнення [1–3]. Так, привертають увагу застосування високоентропійних та наноструктурованих металів і сплавів [4–7], поверхневого модифікування [8, 9], нанесення

різного типу покриттів [10–13]. При цьому досягається задоволення тим чи іншим критеріям (міцність, зношуваність, корозійна стійкість, витривалість, антифрикційні властивості тощо).

Важливо зазначити, що у багатьох випадках поліпшуються тільки певні із значущих службових характеристик, а інші – або залишаються на тому ж рівні, або ж – погіршуються [1]. Тому із метою усунення цього протиріччя був розроблений метод дискретно-континуального зміцнення деталей машин [1, 14, 15]. Якраз його застосування дає потенційну можливість уникнути ситуації із конфліктом протиборчих тенденцій при зміцненні деталей конструкцій. Разом із тим із урахуванням розширення множини варійованих параметрів виникає інша проблема: ускладнена процедура пошуку прогресивних технічних рішень у такому розширеному параметричному просторі. Тому зусилля, спрямовані на створення методу обґрунтування таких рішень, а також його апробація складає актуальну науково-прикладну задачу. На її вирішення спрямована ця робота.

Мета роботи – формування узагальненої параметричної моделі дискретно-континуального зміцнення елементів конструкцій двигунів та турбодетандерних установок та дослідження напружено-деформованого стану цих контактуючих деталей.

Концепція обґрунтування прогресивних проєктно-технологічних рішень елементів двигунів, турбодетандерних установок та інших машинобудівних конструкцій

Основою створеної концепції обґрунтування

прогресивних проектно-технологічних рішень елементів двигунів, турбодетандерних установок та інших машинобудівних конструкцій є розвиток підходів, описаних у [1, 14, 15]. Зокрема, простір узагальнених варійованих параметрів $V = \bigcup_i p_i$ складається із двох напівпросторів:

$$V = V_{\Pi} \cup V_T, \quad (1)$$

де V_{Π} та V_T – множини проектних та технологічних параметрів.

Мається на увазі, що для тієї чи іншої пари деталей, які передають потужність шляхом контактної взаємодії, технологічні режими зміцнення обирають не ізольовано, а узгоджено із проектними рішеннями (i – навпаки). Наприклад, у парі «шийка колінчастого вала – вкладиш опори» важливу роль при визначенні технологічного зміцнення відіграє форма контактуючих поверхонь деталей, властивості матеріалів, із яких вони виготовлені. Те ж – і для деталей підшипникових вузлів турбодетандерних установок тощо.

Наступним кроком при здійсненні досліджень зміцнених деталей конструкцій є установлення закономірностей впливу проектних p_j^{Π} та технологічних p_k^T параметрів, а також експлуатаційних навантажень f на характеристики міцності, тертя, зношування тощо. Наприклад, напружено-деформований стан контактуючих деталей конструкції описується системою рівнянь теорії пружності [16]:

$$L = (u, p^{\Pi}, p^T, f, t) = 0, \quad (2)$$

де u – масив змінних стану (для прикладу – пружних переміщень); $p^{\Pi} = \bigcup p_j^{\Pi}$, $p^T = \bigcup p_k^T$ – масиви проектних та технологічних параметрів відповідно, f – навантаження; t – час.

Співвідношення (2) можуть набувати вигляду системи диференціальних рівнянь або варіаційних принципів. При застосуванні для розв’язання (2) чисельних методів (наприклад, методів скінченних елементів [17]) отримаємо залежності розподілів вектору переміщень u , тензорів деформацій ε та напружень σ :

$$u_i = (u_i, p^{\Pi}, p^T, f, t), \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (5)$$

де r – радіус-вектор поточної точки простору у системі координат $Ox_1x_2x_3$; C_{ijkl} – компоненти тензора

пружних модулів матеріалу деталі.

Зважаючи на те, що (3) містить, крім функціональних, ще й параметричні залежності для u , а ε та σ виражаються через u за (4), (5), то відповідно співвідношення (3) – (5) становлять також і параметричні залежності цих величин від p^{Π} , p^T .

Відповідно, якщо сформовані певні критерії

$$I(u, \varepsilon, \sigma, p^{\Pi}, p^T) \rightarrow \text{extr} \quad (6)$$

або обмеження на характеристики

$$H(u, \varepsilon, \sigma, p^{\Pi}, p^T) \geq [H], \quad (7)$$

то маємо задачу синтезу (2), (6), (7), яку сформовано в узагальненому параметричному просторі V . Тут у (7) $[H]$ – обмежувальні значення характеристик H .

Під критеріями I та характеристиками H можуть матися на увазі маса, габарити, допустимі напруження тощо.

Сукупність задач (2), (6), (7) формально мають своїми розв’язками оптимальні технічні рішення у просторі варійованих проектно-технологічних параметрів V .

Описана загальна канва у кожному конкретному випадку набуває того чи іншого частинного вигляду. Тоді загальна задача конкретизується (див. далі).

Дослідження напружено-деформованого стану контактуючих зміцнених тіл

Ілюстрацію запропонованого у роботі підходу здійснено на прикладі дискретно-континуального зміцнення у парі деталей «чавун – алюміній». На рис. 1 – представницький фрагмент такої пари деталей. У цій композиції матеріали мають різні та варійовані модулі пружності e та коефіцієнт Пуассона ν .

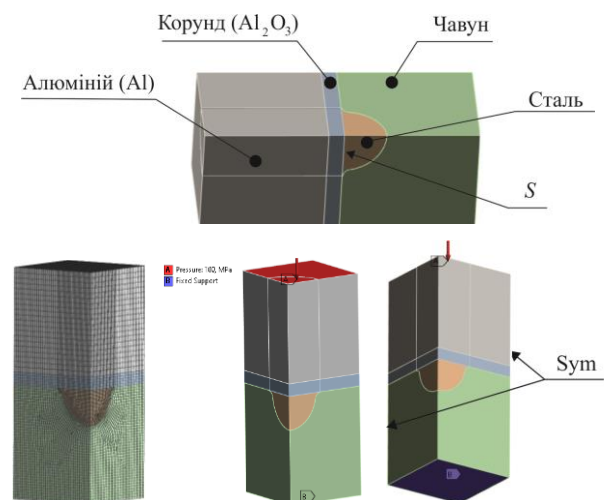


Рис. 1. Представницький фрагмент дискретно-континуально зміцнених деталей

Тут деталь із алюмінію (Al) континуально покривається за технологією MAO [10, 11] шаром корунду Al_2O_3 . Чавунна деталь Iron покривається системою зон дискретного зміцнення зі сталі (Steel). Як навантаження f – тиск $p = 100$ МПа. Фрагмент деталей входить у контакт уздовж поверхні S (див. рис. 1). У силу періодичності зон розташування дискретного зміцнення вводяться умови симетрії (Sym) – див. рис. 1 – та розглядається $1/4$ фрагмента із тими ж умовами Sym.

У просторі параметрів як варійований обрано відношення модулів пружності матеріалу зони дискретного зміцнення E_{Steel} та чавуну E_{Iron} :

$$p = E_{Steel} / E_{Iron}, p_0 = 1. \quad (8)$$

Базові властивості: для чавуна $E = 110,0$ ГПа, $\nu = 0,25$, для алюмінію $E = 70,0$ ГПа, $\nu = 0,35$, для корунду $E = 370,0$ ГПа, $\nu = 0,23$, для сталі $E = 220,0$ ГПа, $\nu = 0,28$. Варіюється $E = [1,1, 1,65, 2,2, 2,75, 3,3] \cdot 10^{11}$ Па. Для формування критеріальних та обмежувальних величин до розгляду вводиться номінальний варіант ($H_0 = 4,37$ мм, $h_0 = 4$ мм, $a = 1,58$ мм,

$d = 7,14$ мм).

До розгляду вводяться також контрольовані величини, що віддзеркалюють рівень контактного тиску q та еквівалентних напружень σ за Мізесом у системі тіл:

$$q = q(p), \quad \tilde{q} = q(p) / q(p_0), \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma(p), \quad \tilde{\sigma} = \sigma(p) / \sigma(p_0). \quad (10)$$

Ставиться задача установлення залежностей (9), (10).

Результати дослідження напружено-деформованого стану фрагмента системи контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл

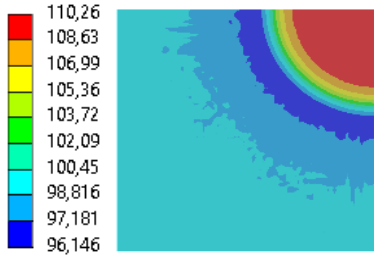
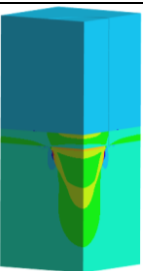
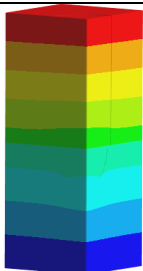
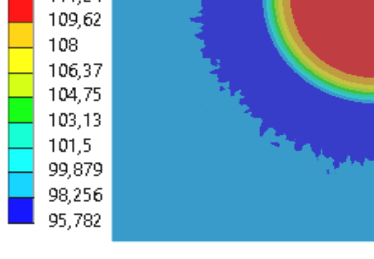
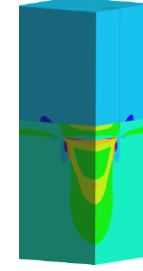
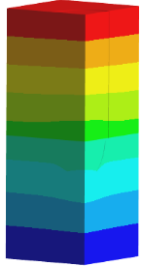
У табл. 1 наведено характерні розподіли компонент напружено-деформованого стану фрагмента системи контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл, визначених у ході дослідження. Видно, що зі зміною p відбувається зміна характеру розподілу контактного тиску q , переміщень u та еквівалентних за Мізесом напружень σ [16].

Шукані залежності (8), (9) наведено на рис. 2–5.

Таблиця 1. Розподіли компонент напружено-деформованого стану дослідженого фрагмента за різних значень параметра p

Параметр p	Розподіли компонент напружено-деформованого стану		
	контактний тиск, МПа	еквівалентні напруження, МПа	повні переміщення, 10^{-3} м
$p_0 = 1$			
1,5			
2			

Закінчення таблиці 1

Параметр p	Розподіли компонент напружено-деформованого стану		
	контактний тиск, МПа	еквівалентні напруження, МПа	повні переміщення, 10^{-3} м
2,5	 <ul style="list-style-type: none"> 110,26 108,63 106,99 105,36 103,72 102,09 100,45 98,816 97,181 96,146 	 <ul style="list-style-type: none"> 124,42 100 90 80 70 60 45 37,495 	 <ul style="list-style-type: none"> 0,0079446 0,0070618 0,0061791 0,0052964 0,0044137 0,0035309 0,0026482 0,0017655 0,00088273 0
3	 <ul style="list-style-type: none"> 111,24 109,62 108 106,37 104,75 103,13 101,5 99,879 98,256 95,782 	 <ul style="list-style-type: none"> 139,85 100 90 80 70 60 45 33,246 	 <ul style="list-style-type: none"> 0,0079384 0,0070563 0,0061743 0,0052922 0,0044102 0,0035282 0,0026461 0,0017641 0,00088204 0

Із їх аналізу випливає, що характеристики міцності залежать від p за монотонною залежністю. Можна констатувати, що установлені залежності недоцільно розглядати окремо, тобто у розрізі цільових функцій однієї змінної, а варто зосередитися на аналізі деякої цільової функції багатьох змінних (проектних та технологічних параметрів).

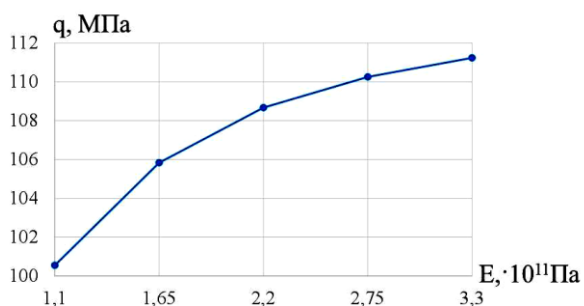


Рис. 2. Залежність максимуму контактного тиску від модуля пружності зміцненого матеріалу

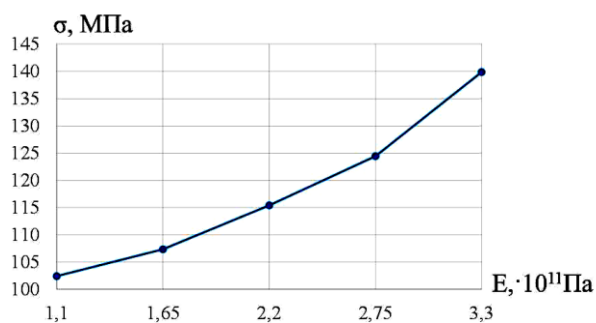


Рис. 3. Залежність максимуму еквівалентних напружень від модуля пружності зміцненого матеріалу

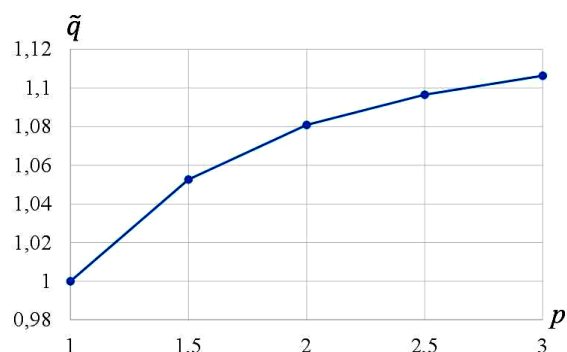


Рис. 4. Залежність відносного максимуму контактного тиску від відносного модуля пружності зміцненого матеріалу

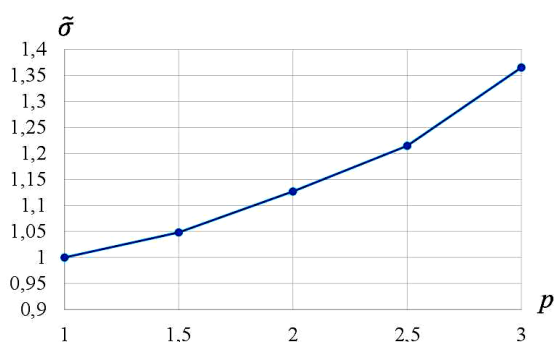


Рис. 5. Залежність відносного максимуму еквівалентних напружень від відносного модуля пружності зміцненого матеріалу

Аналіз наведених результатів дослідження напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл

1. Аналіз результатів дослідження напружено-

деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл свідчить про те, що контактний тиск та напруження розподіляються тим нерівномірніше, чим вищий модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення, тобто зі зростанням параметра p (див. рис. 2–5).

2. При $p > 1$ відбувається перерозподіл контактного тиску у зону спряження «шар Al_2O_3 – Steel» (див. табл. 1). Цей ефект є позитивним із точки зору міцності, антифрикційних властивостей та зношування.

3. Задля підвищення трибомеханічних властивостей системи дискретно-континуально зміцнених тіл бажано підвищувати модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення. Разом із тим обмежувальним чинником при цьому слугує небезпека різкої концентрації напружень у підповерхневому шарі у сполученні цієї зони із основним матеріалом.

Висновки

1. У роботі описана параметрична модель напружено-деформованого стану фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл. Ця модель дає можливість досліджувати вплив проектних та технологічних параметрів та трибомеханічні властивості контактуючих тіл.

2. Шляхом цілеспрямованого варіювання властивостей матеріалів, форми та розмірів зон дискретного та континуального зміцнення можливо досягти підвищення трибомеханічних характеристик пари контактуючих тіл.

3. Для пошуку ефективних технічних рішень контактуючих елементів конструкцій доцільно будувати спеціалізовану базу даних, у якій варто зосереджувати результати багатоваріантних досліджень напружено-деформованого стану, тертя та зношування дискретно-континуально зміцнених деталей.

Список літератури:

1. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Ткачук Н.А., С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко и др. – Харьков: Планета-Принт, 2018. – 259 с. 2. Інженерія поверхні / Юценко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с. 3. Канарчук В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата. – К.: Вісник НТУ, 2000. – Вип.4. – С. 3–14. 4. Firstov S.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening) / Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. // *Powd. Met. and Met. Ceram.* – 2018. – No. 3-4. – Pp. 161-174. DOI:10.1007/s11106-018-9964-2. 5. Sathiyamoorthi Praveen High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. / Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim // *Advanced Engineering Materials.* – 2017. – No. 20(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201700645> 6. Ovid'ko, I.A. Review on superior strength and enhanced

ductility of metallic nanomaterials / Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., Zhu., Y.T. // *Progress in Materials Science.* – 2018. – No. 94. – Pp. 462-540 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002> 7. Ming, K. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures / Ming, K., Bi, X., Wang, J. // *International Journal of Plasticity.* – 2019. – Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.10.005> 8. D'yachenko S.S. Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces / D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. // *The Phys. of Met. and Metallography.* – 2017. – T. 118. – No. 6. – Pp. 608-620. DOI:10.1134/s0031918x17060035 9. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. / Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E., et. al. // *DSMIE.* – 2019. – Pp. 238-247. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6_24 10. Subbotina, V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy / Subbotina, V., Sobol, O. // *Machines. Technologies. Materials.* – 2020. – Vol. 14. – No. 6. – Pp. 247-250. 247. [full.pdf \(stumejournals.com\)](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47) 11. A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types / Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., et. al. // *Eastern-european journal of enterprise technologies.* – 2020. – Vol. 4. – No. 12 (106) – Pp. 14–23. <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/209722/210868> 12. The Effect of Deposition Conditions and Irradiation on the Structure, Substructure, Stress-Strain State, and Mechanical Properties of TiN Coatings. / N. Pinchuk, M. Tkachuk, M. Zhadko, et. al. // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V: Proceedings of the 5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2022, June 7–10, 2022, Poznan, Poland – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering.* 2022. – Pp. 475-484 https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47. 13. Pinchuk N. Nanostructured coatings ZnN, obtained by vacuum-arc deposition method / N. Pinchuk, Terletskiy O.S. // *Modernization of research area: national prospects and European practices: Scientific monograph.* – Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. – Pp. 1–18. 14. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование / Ткачук, Н. А., Кравченко, С. А., Пылев, В. А. и др. // *Наука и техника.* – 2019. – № 18 (3). – С. 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-347> 15. Багатокритеріальна оцінка контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей / М.М. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко та інш. // *Двигуни внутрішнього згоряння.* – 2022. – № 1. – С. 65-77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371>. 16. Вацидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / Вацидзу К.; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 17. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. / Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu.; 7th ed. – Oxford: ButterworthHeinemann, 2013. – 756 p.

Bibliography (transliterated):

1. Tkachuk, N.A., D'yachenko, S.S., Posvyatenko, Je. K., Kravchenko, S.A. et. al. (2018), "Continuous and discrete-continuous modification of surfaces of parts": monograph ["Kontinual'naja i diskretno-kontinual'naja modifikacija poverhnostej detalej: monografija"], Planeta-Print, Kharkiv, 259 p. 2. Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D., Korzh, V.M. (2007), "Surface engineering" ["Inzheneriya poverkhni"], K.: Nauk. dumka, 558 p. 3. Kanarchuk, V. I., Posvyatenko, E. K., Lopata, L. A. (2000), "Surface engineering of transport vehicles components" ["Inzheneriya poverkhni detalei transportnykh zasobiv"], Visnyk NTU, K., No. 4, pp. 3–14. 4. Firstov, S.A., Rogul, T.G., Shut, O.A. (2018), "Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening)". *Powd. Met. and Met. Ceram.*, No. 3-4, pp. 161-174.

DOI:10.1007/s11006-018-9964-2 5. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim (2017), "High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview". *Advanced Engineering Materials*, No. 20(1) <https://doi.org/10.1002/adem.201700645> 6. Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., Zhu, Y.T. (2018), "Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials", *Progress in Materials Science*, No. 94, pp. 462-540 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002> 7. Ming, K., Bi, X., Wang, J. (2019), "Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures", *International Journal of Plasticity*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.10.005> 8. D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. (2017), "Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces", *The Phys. of Met. and Metallography*, T. 118, No. 6, pp. 608-620. DOI:10.1134/s0031918x17060035 9. Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E., et. al. (2019), "Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching", *DSMIE*, pp. 238-247. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-22365-6_24 10. Subbotina, V., Sobol, O. (2020), "Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy", *Machines. Technologies. Materials*, Vol. 14, No. 6, pp. 247-250. [247.full.pdf \(stumejournals.com\)](https://full.pdf.stumejournals.com) 11. Subbotina, V., Sobol, O., Belozherov, V. et. al. (2020), "A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types", *Eastern-european journal of enterprise technologies*, Vol. 4, No. 12 (106), pp. 14–23. <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/209722/210868> 12. Pinchuk, N., Tkachuk, M., Zhadko, M., et. al. (2022), "The Effect of

Deposition Conditions and Irradiation on the Structure, Substructure, Stress-Strain State, and Mechanical Properties of TiN Coatings", *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V : Proceedings of the 5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2022, June 7–10, 2022, Poznan, Poland – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering*, Pp. 475-484 https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_47 13. Pinchuk, N., Terlets'kyi, O.S. (2022), "Nanostructured coatings ZrN, obtained by vacuum-arc deposition method, Modernization of research area: national prospects and European practices": *Scientific monograph*. – Riga, Latvia: Baltija Publishing, – Pp. 1–18. 14. Tkachuk, N. A., Kravchenko, S. A., Pyilev, V. A., et. al. (2019), "Discrete-Continuum Hardening of Contacting Structural Elements: Concept, Mathematical and Numerical Modeling" [*"Diskretno-kontinualnoe uprochnenie kontaktiruyuschih elementov konstruktsiy: kontseptsiya, matematicheskoe i chislennoe modelirovaniye"*], *Nauka i tehnika*, No. 18 (3), – pp. 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-347> 15. Tkachuk, M. M., Marchenko, A. P., Kravchenko, S. O., Tkachuk, M. A. et. al. (2022), "Multi-criteria evaluation of the contact interaction of discrete-continuous reinforced parts" [*"Bahatokryterialna otsinka kontaknoi vziaemodii dyskretno-kontynualno zmitsnykh detalei"*], *Dvyhuny vnutrishnoho zgoriannia*, No. 1, pp. 65-77. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/264371> 16. Vasil'zhu, K. (1987), "Variational methods in the theory of elasticity and plasticity: Per. from English" [*"Variatsionny'e metody v teorii uprugosti i plastichnosti: Per. s angl."*], *Mir*, M., 542 p. 17. Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor, J. Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: ButterworthHeinemann. 2013. 756 p.

Надійшла до редакції 20.08.2023 р.

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О.О.Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор техн. наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>

Кравченко Сергій Олександрович – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dsvskhpi2016@gmail.com.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF DISCRETE-CONTINUOUS STRENGTHENING OF ENGINE AND TURBO-EXPANDER COMPONENTS

M. M. Tkachuk, A. Grabovskiy, M. A. Tkachuk, A. Marchenko, S. Kravchenko

The article focuses on design and technological measures aimed at ensuring improved technological characteristics of engines and turboexpander units. In particular, an improved concept of the technology of discrete-continuous strengthening of structural elements has been developed. This concept combines design and technological measures in a single technical solution. This expanded parameter space ensures greater efficiency of the final synthesised solution. For example, by analysing the stress-strain state of a representative fragment of contacting structural parts, the regularities of the influence of design and technological parameters on strength characteristics are determined: sets of parameters that provide increased strength of contacting parts and their durability are substantiated. Friction in the mating of parts is also reduced. In addition, the efficiency of the mechanism, which includes the contacting parts subjected to hardening, increases. The result is an increase in the technological characteristics of engines, turbo-expander units and other machines whose parts are subjected to discrete-continuous hardening. In general, the developed concept is aimed at a major enhancement of the service characteristics of structural elements. This is stated in the objective functions. These objective functions are minimized or maximized in the extended parametric space. A parametric model of the stress-strain state of a fragment of discrete-continuous reinforced bodies is created. This model makes it possible to study the impact of project and technological parameters and tribomechanical properties of contacting bodies. By purposefully varying the properties of materials, the shape and size of the zones of discrete and continuous strengthening, it is possible to achieve increased tribomechanical characteristics of a pair of contacting bodies.

Keywords: engine; turboexpander unit; discrete-continuous hardening; stress-strain state; finite element method; contact pressure.