

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-21>
УДК 621.833.65

СТРІЛЕЦЬ ОЛЕГ

Національний університет водного господарства та природокористування
<https://orcid.org/0000-0003-3834-7176>
e-mail: o.r.strilets@nuwm.edu.ua

НАДІЄВЕЦЬ ІЛІЯ

Національний університет водного господарства та природокористування
<https://orcid.org/0009-0009-9882-2136>
e-mail: nadiievets_m24@nuwm.edu.ua

БАТЕЙКО МАКСИМ

Національний університет водного господарства та природокористування
<https://orcid.org/0009-0009-3550-0519>
e-mail: bateiko_m24@nuwm.edu.ua

СТЕПАНЮК АНТОН

Рівненський автотранспортний фаховий коледж НУВГП
<https://orcid.org/0000-0002-4213-9719>
e-mail: a.s@at.rv.ua

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ V-ПОДІБНИХ ПРУЖИН МУФТИ ПРУЖНОЇ

У роботі розглянуто спосіб виготовлення V-подібних пружин для пружних муфт, що працюють в умовах динамічного навантаження. Проаналізовано існуючі конструкції муфт і технології виготовлення пружин складного профілю. Виявлено недоліки відомих методів, зокрема неможливість формування V-подібних пружин спеціального профілю за допомогою традиційних інструментів. Запропоновано новий спосіб формування пружини із застосуванням поворотних пуансонів, який забезпечує точність геометрії виробу. Наведено розрахунок довжини заготовки та обґрунтовано технологічні параметри процесу. Результати можуть бути використані у машинобудуванні при виготовленні пружних елементів муфт.

Ключові слова: муфта, пружина, деформація, пуансон, матриця, виготовлення.

STRILETS OLEH, NADIEVETS ILLIA, BATEIKO MAKSYM

National University of Water and Environmental Engineering

STEPANIUK ANTON

Rivne Motor Vehicle Vocational College of NUWEE

METHOD OF MANUFACTURING V-SHAPED SPRINGS OF ELASTIC COUPLINGS

The paper considers a method for manufacturing V-shaped springs used in elastic couplings operating under dynamic loading conditions. Existing designs of elastic couplings and manufacturing technologies for complex-shaped springs are analyzed. The main drawbacks of known methods are identified, particularly the impossibility of forming V-shaped springs of a specific profile using conventional punch-and-die techniques. A new manufacturing method is proposed, based on simultaneous rotation of profiled punches, which ensures accurate formation of the spring geometry. A formula for determining the blank length is presented and justified based on geometric and technological considerations. An analytical dependence for determining the length of the workpiece was obtained, which takes into account the geometry of the spring and the influence of the material thickness, which allows to reduce the error in selecting the length of the workpiece compared to empirical methods.

The stress-strain state during bending was analyzed, it was found that with a decrease in the bending radius, deformations increase nonlinearly, and the introduction of a roller increases the effective bending radius and reduces maximum deformations. It was shown that the use of rollers in the bending zone reduces the risk of crack formation, reduces local hardening and stabilizes the forming process. The effect of elastic unloading was established, which can lead to an angle error of up to 2–5° for steels, which must be taken into account when designing the tool.

Additionally, a calculation model is proposed to determine deformation parameters and stress distribution during forming. The study shows that the use of rotational punches allows reducing internal stresses and improving dimensional accuracy compared to traditional forming methods.

The proposed method simplifies the manufacturing process and expands technological capabilities for producing springs of complex geometry. The results can be applied in mechanical engineering, particularly in the design and production of elastic couplings and other dynamically loaded elements.

Keywords: coupling, spring, deformation, punch, die, manufacturing.

Стаття надійшла до редакції / Received 06.05.2026
Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026
Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Стрілець Олег, Надієвець Ілля, Батейко Максим, Степанюк Антон

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасному машинобудуванні пружні муфти широко застосовуються для передачі обертового моменту між валами з одночасною компенсацією динамічних навантажень, ударів, а також радіальних, осьових і кутових зміщень, [1]. Особливої актуальності набувають конструкції муфт, що працюють в умовах змінних і імпульсних навантажень, де надійність та довговічність визначаються напружено-деформованим станом пружних елементів, [2].

Перспективною є конструкція двосторонньої пружної муфти, розробленої на рівні патенту України, [3], та показаної на рис. 1, а, в якій для передавання обертового моменту від півмуфти 1 до півмуфти 2 використовуються складені W-подібні пружини, сформовані з двох V-подібних пружин 3 та однієї П-подібної

частини 4. Додатковою особливістю такої конструкції є наявність циліндричних роликів або втулок 5, встановлених у зонах криволінійних переходів V-подібних пружин 3, що дозволяє зменшити концентрацію напружень та підвищити ресурс роботи такої муфти.

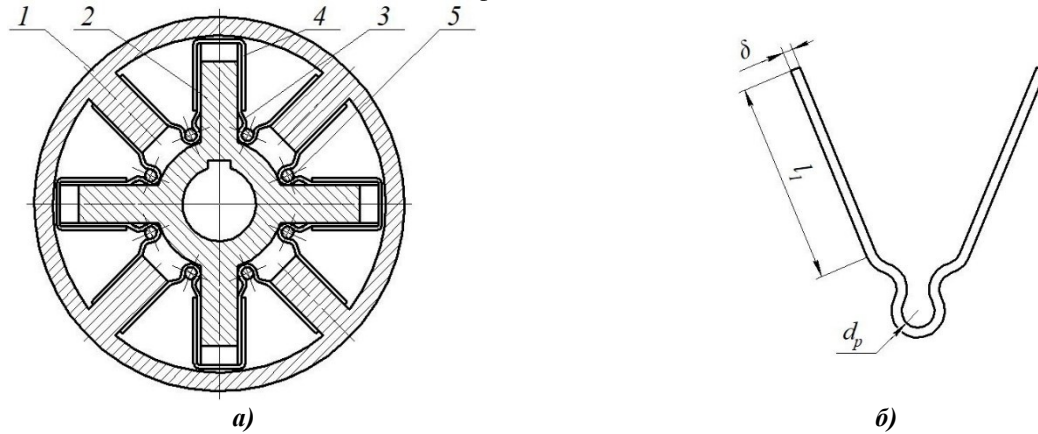


Рис. 1. Двостороння пружна муфта: а) – схема; б) – V-подібна пружина

У процесі передавання обертального моменту найбільш навантаженими є саме V-подібні ділянки пружин, особливо в місцях їх контакту із зовнішніми виступами внутрішньої півмуфти. У традиційних конструкціях суцільних пружин у цих зонах виникають значні згинальні напруження, що призводить до передчасного руйнування елементів. Запропоноване конструктивне рішення із розділенням пружини та введенням роликів дозволяє зменшити ці напруження за рахунок часткового розвантаження зон перегину.

Разом з тим, ефективність роботи такої муфти безпосередньо залежить від точності геометрії V-подібних пружин (рис. 1, б), зокрема параметрів їх криволінійних переходів, довжин прямолінійних ділянок та взаємного розташування робочих поверхонь. Недостатня точність виготовлення або відхилення від заданого профілю призводять до нерівномірного розподілу навантаження, локальних перевантажень і зниження довговічності вузла.

Існуючі способи виготовлення пружин складного профілю, засновані на використанні класичних штампувальних схем із нерухомими пуансонами, [4], не забезпечують формування V-подібних елементів із необхідною геометричною точністю, особливо у зонах малих радіусів кривизни. Крім того, такі методи супроводжуються підвищеними залишковими напруженнями та нерівномірною пластичною деформацією.

Отже, виникає науково-практична задача розробки спеціалізованого способу виготовлення V-подібних пружин, який би враховував особливості їх роботи у складі пружної муфти, забезпечував точне формоутворення складного профілю, зменшення залишкових напружень та підвищення експлуатаційних характеристик.

Розв'язання цієї задачі має важливе значення для підвищення надійності пружних муфт, що застосовуються у транспортному машинобудуванні, енергетичному обладнанні та приводах технологічних машин.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасні методи виготовлення профільних пружин базуються на процесах пластичної деформації, зокрема згинанні, навиванні та комбінованому формоутворенні. Однак більшість існуючих технологій орієнтовані на прості геометричні форми (циліндричні або гвинтові пружини) і мають обмеження при виготовленні складних профільних елементів.

У [5] наведено класифікацію методів виготовлення пружин, серед яких виділяються процеси холодного та гарячого навивання. Холодне формоутворення забезпечує високу точність геометрії, але супроводжується значними залишковими напруженнями, що знижують довговічність виробів. Гаряче навивання, навпаки, покращує пластичність матеріалу, однак призводить до зниження точності та потребує додаткової термічної обробки. Таким чином, жоден із підходів не забезпечує одночасно високої точності та довговічності для профільних пружин складної форми.

У роботі [6] представлено огляд сучасних технологій виготовлення композитних гвинтових пружин, включаючи намотування, формування та комбіновані методи. Показано, що вибір технології суттєво впливає на механічні характеристики та експлуатаційні властивості виробів. Проте зазначені методи орієнтовані переважно на осесиметричні конструкції і не враховують особливості формоутворення пружин із змінною кривизною профілю.

У [7] досліджено процес гнучкого згинання просторових елементів, де основною проблемою є пружне відновлення, що призводить до відхилення геометрії від заданої. Для компенсації цього ефекту пропонуються методи корекції інструменту або оптимізації параметрів процесу. Однак такі підходи потребують складного чисельного моделювання та ітераційного підбору параметрів, що ускладнює їх використання в умовах серійного виробництва.

У роботах, присвячених розрахунку та проектуванню пружин складної форми (наприклад, U-подібних), зазначається, що існуючі підходи часто базуються на методі підбору параметрів, що є трудомістким та не забезпечує гарантованої точності результатів [8]. Це свідчить про відсутність універсальних аналітичних моделей

для формування профільних пружин складної геометрії.

В [9], пропонується метод створення W-подібних пружин, що містить складений пуансон з поворотними частинами, але він розроблений для виготовлення профільних пружин специфічної форми і не може бути використаний для необхідних нам V-подібних пружин.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що існуючі методи формоутворення пружин мають такі основні недоліки:

- орієнтація переважно на гвинтові та осесиметричні пружини;
- відсутність ефективних методів керування локальною кривизною профілю;
- значний вплив пружного відновлення на точність;
- необхідність складного чисельного моделювання або експериментального підбору параметрів;
- підвищений рівень залишкових напружень у зонах концентраторів.

Це обґрунтовує необхідність розробки нового способу формоутворення V-подібних пружин, який забезпечує кероване формування профілю, зниження напружень, підвищення точності та повторюваності виготовлення.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розробка способу виготовлення V-подібної пружини з обґрунтуванням геометричних параметрів заготовки; дослідження процесу формоутворення для підвищення точності та технологічності виготовлення.

Виклад основного матеріалу

V-подібна пружина є складовим елементом W-подібної пружини двосторонньої пружної муфти та працює в умовах змінних динамічних навантажень. Особливістю її роботи є передача навантаження через прямолінійні ділянки при одночасному розвантаженні зон криволінійного переходу за рахунок встановлення циліндричних роликів.

У процесі роботи муфти навантаження передається від виступів півмуфт до пружини, викликаючи її пружну деформацію. При цьому найбільш відповідальними є прямолінійні ділянки довжиною l_1 , зона криволінійного переходу діаметром d_p , контактні ділянки з роликами.

Для забезпечення необхідної геометрії пружини довжина заготовки повинна враховувати як прямолінійні, так і криволінійні ділянки.

Розрахункова залежність має вигляд:

$$L = 2l_1 + 2\pi(d_p + \delta), \quad (1)$$

де: l_1 – довжина прямолінійних ділянок; d_p – діаметр криволінійної ділянки; δ – товщина заготовки.

Врахування товщини δ у формулі дозволяє компенсувати зміщення нейтрального шару під час пластичної деформації та забезпечує точність отриманого профілю.

Таким чином, запропонована залежність забезпечує узгодження геометрії заготовки з кінцевою формою пружини та виключає необхідність експериментального підбору довжини.

Запропонований спосіб базується на використанні нерухомої матриці та двох профільних пуансонів, які обертаються у протилежних напрямках (рис. 2).

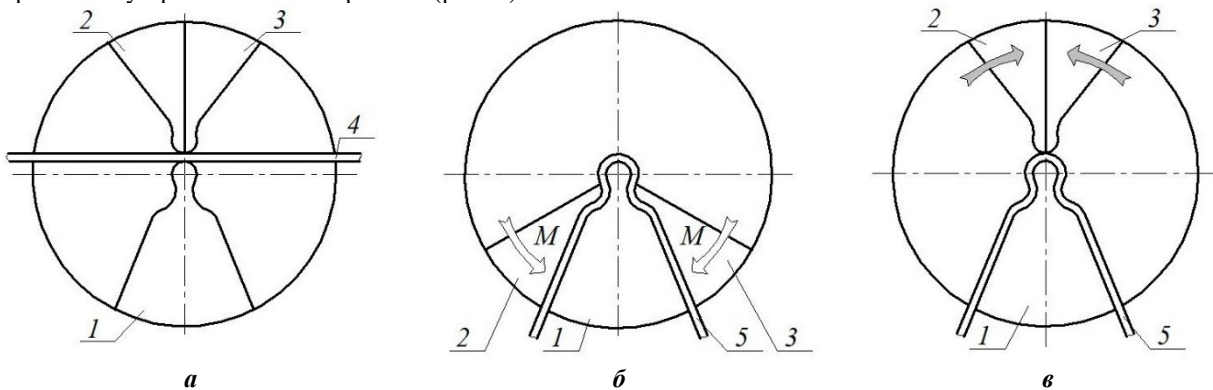


Рис. 2. Спосіб виготовлення V-подібної пружини муфти пружної: а) – заготовка закріплена на матриці; б) – формування V-подібного профілю пружини; в) – пружина готова до демонтажу

Технологічний процес включає наступні кроки:

1. Виготовлення заготовки у вигляді пластини 4 з пружинної сталі.
2. Попередню термічну обробку відомими способами, [10], для підвищення пластичності.
3. Закріплення заготовки на матриці 1 (рис. 2, а).
4. Одночасний поворот пуансонів 2 і 3 із прикладеним моментом М (рис. 2, б).
5. Формування V-подібного профілю пружини.
6. Відведення пуансонів 2 і 3 в початкове положення (рис. 2, в) і демонтаж виробу – V-подібної пружини 5.
7. Остаточну термообробку для надання пружних властивостей.

Процес формоутворення V-подібної пружини базується на пластичному згинанні заготовки, при якому у перерізі виникає нерівномірний розподіл деформацій. Математична модель процесу формоутворення

розроблена відповідно до класичної теорії згину балок Ейлера–Бернуллі [11], доповненої положеннями теорії пластичного згинання листових матеріалів, [12].

Припустимо, що матеріал заготовки ізотропний, для нього виконується гіпотеза плоских перерізів, а деформації (крім пластичної зони) відносно малі.

Розподіл деформацій по товщині тоді можна записати як:

$$\varepsilon(y) = \frac{y}{r + k\delta}, \quad (2)$$

де $\varepsilon(y)$ – відносна деформація волокна на відстані y від нейтрального шару; y – координата по товщині (від нейтральної осі); r – внутрішній радіус згину; k – коефіцієнт положення нейтрального шару ($k = 0.3 \dots 0.5$)

Максимальна деформація $\varepsilon_{\max}$ при цьому буде виникати при $y = \delta/2$, тобто:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\delta}{2(r + k\delta)}. \quad (3)$$

Залежність максимальної деформації заготовки від радіуса згину для випадку, коли $\delta = 2$ мм, $k = 0,5$, а $r = 0 \dots 5$ мм, можна представити у вигляді графіка, показаного на рис. 3.

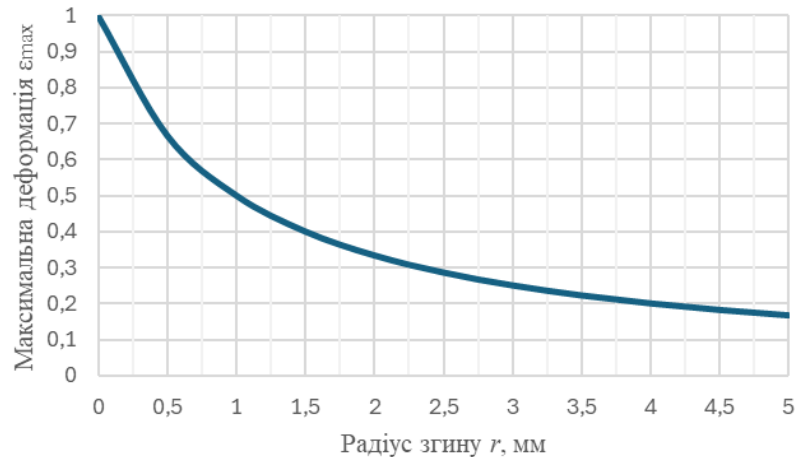


Рис. 3. Графік залежності максимальної деформації заготовки від радіуса згину

Очевидно, що при зменшенні радіуса згину деформації різко зростають, а при збільшенні процес стає більш «м'яким». Малий радіус згину є основною причиною локального перевищення межі текучості, можливого появи тріщин та нестабільності геометрії.

Ключовим фактором точності є також пружне розвантаження після згину. Після зняття навантаження частина деформацій відновлюється, що призводить до зміни кута:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\sigma_T}{E} \cdot \alpha, \quad (4)$$

де $\Delta\alpha$ — зміна кута після розвантаження; σ_T — межа текучості матеріалу заготовки; E — модуль Юнга; α — кут згину при навантаженні

Фізично це пояснюється тим, що внутрішні шари матеріалу залишаються частково пружними, а після розвантаження виникає «розкриття» кута. Графічно, залежність величини пружного розвантаження від кута згину можна побачити на рис. 4.

Як видно з графіка (рис. 4) залежність лінійна. Відомо, що для сталей $\sigma_T/E \approx 0,002 \dots 0,005$, тобто при $\alpha = 90^\circ$ похибка складатиме $2 \dots 5^\circ$. Пружне повернення є головним фактором, що обмежує точність виготовлення пружини.

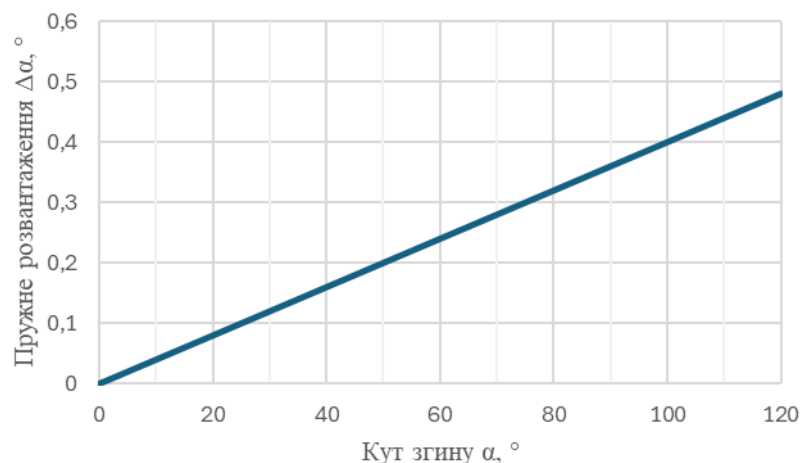


Рис. 4. Графік залежності величини пружного розвантаження від кута згину

У традиційній схемі згинання заготовки згин виконується через жорстку кромку, при цьому виникає концентрація деформацій. У запропонованому способі виконується круговий перехід, у який при монтажі пружини в муфту буде вставлятися ролик або втулка, що робить контакт розподіленим.

Еквівалентний радіус згину при цьому визначатиметься як:

$$r_{\text{екв}} = r + \frac{d_p}{2}. \quad (5)$$

Відповідно, максимальна деформація із (3) прийме вигляд :

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{\delta}{2(r + k\delta) + d_p}. \quad (6)$$

Залежність (6) максимальної деформації заготовки від радіуса згину зобразимо у вигляді графіка (рис. 5), задавши: $\delta = 2\text{ мм}$, $k = 0,5$, а $r = 0 \dots 5\text{ мм}$ і $d_p = 2 \dots 6\text{ мм}$.

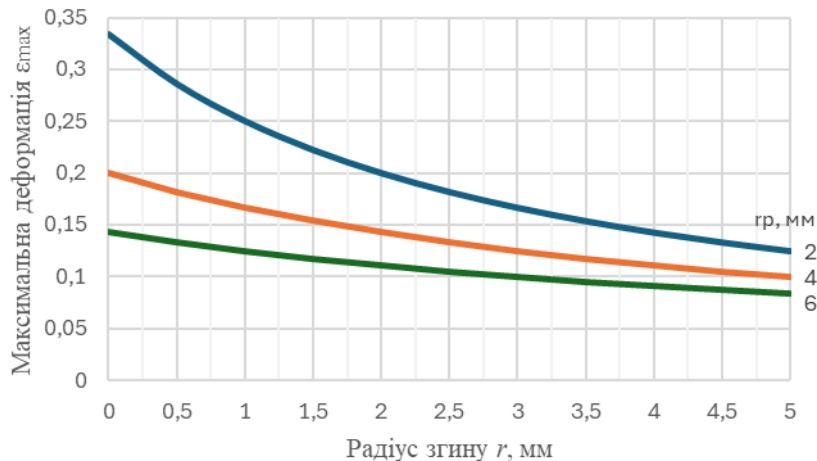


Рис. 5. Графік залежності максимальної деформації заготовки від радіуса згину та радіуса ролика

Бачимо, що зі збільшенням радіуса ролика гріл деформація, порівняно з рис. 3 зменшується. Це позитивно впливає на зменшення ймовірності тріщин, локального наклепу та геометричних відхилень при формуванні необхідного профілю пружини. Ролик фактично виконує роль регулятора напружено-деформованого стану та елемента стабілізації процесу формоутворення.

Для забезпечення працездатності процесу необхідно, щоб виконувалась умова відсутності руйнування:

$$\varepsilon_{\text{max}} \leq [\varepsilon]. \quad (7)$$

Підставляючи (3) в (6), отримаємо:

$$\frac{\delta}{2(r + k\delta)} \leq [\varepsilon]. \quad (8)$$

Звідси мінімальний радіус:

$$r_{\text{min}} \geq \frac{\delta}{2[\varepsilon]} - k\delta. \quad (9)$$

Для прийнятих раніше вихідних даних $r_{\text{min}} \geq (1 \div 3)\delta$. Тоді матеріал не повинен руйнуватись при згині, а деформація має залишатись допустимою, що в перспективі дає запас технологічності, зменшує брак, дозволяє використання міцніших матеріалів.

Для початку пластичної деформації умова текучості матиме вигляд:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{E\delta}{2(r + k\delta)} \geq [\sigma_T]. \quad (10)$$

Отримані аналітичні залежності дозволяють визначати граничні технологічні параметри процесу формоутворення без застосування експериментального підбору.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблено новий спосіб формоутворення V-подібних пружин, який відрізняється використанням двох поворотних пуансонів, що забезпечують формування криволінійних ділянок без локальної концентрації деформацій.

Отримано аналітичну залежність для визначення довжини заготовки, яка враховує геометрію пружини та вплив товщини матеріалу, що дозволяє зменшити похибку підбору довжини заготовки порівняно з емпіричними методами.

Проаналізовано напружено-деформований стан при згині, встановлено, що при зменшенні радіуса згину деформації зростають нелінійно, а введення ролика збільшує ефективний радіус згину та зменшує максимальні деформації. Показано, що використання роликів у зоні згину знижує ризик тріщиноутворення, зменшує локальний наклеп та стабілізує процес формоутворення. Встановлено вплив пружного розвантаження, яке може

призводити до похибки кута до 2–5° для сталей, що необхідно враховувати при проєктуванні інструменту.

Запропонований метод може бути використаний у виробництві пружних муфт дозволяє потенційно підвищити точність геометрії та довговічність елементів.

Література

14. Малащенко В. О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків : навч. посіб. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2006. – 196 с.
15. Малащенко В. О. Нові муфти механічних приводів машин : монографія. / В. О. Малащенко, В. М. Стрілець, О. Р. Стрілець, В. А. Федорук. – Рівне : НУВГП, 2019. – 198 с.
16. Попов А. Ф. Основи слюсарної справи : навч. посіб. / А. Ф. Попов, Т. В. Пахар, О. В. Паржницький, Г. Ю. Шулепіна – Чернівці : Букрек, 2020. – 224 с.
17. Пат. на корисну модель № 154151 України. МПК F16D3/52, F16D43/20. Муфта пружна двостороння / В. М. Стрілець, В. О. Малащенко, О. Р. Стрілець, В. Ю. Сергійчук; заявник і патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u 2023 02341; заяв. 17.05.2023; опубл. 11.10.2023, Бюл. № 41. – 5 с.
18. Prawoto Y. Fracture mechanics approach to splitting in low spring index cold coiling process / Y. Prawoto, S. Manville, T. Sakai, et al. // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2019. – Vol. 19. – pp. 738–751. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00653-7>.
19. Jun Ke. Design method, performance investigation and manufacturing process of composite helical springs: a review / Jun Ke, Zhen-yu Wu, Yi-sheng Liu, et al. // Composite Structures. – 2020. – Vol. 252. – Article 112747. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112747>.
20. Jianjun WU An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process / Jianjun WU, Zengkun ZHANG, // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – Vol. 34, Iss. 11. – pp. 267–276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.036>
21. Gao G. A closed-form design method for U-shaped springs in aeroelastic modeling of truss-girder suspension bridges / G. Gao, Du W., Sun Y., et al. // arXiv. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.05830>
22. Стрілець О. Р. Муфти з підковподібними радіальними пружинами та їх розрахунки / О. Р. Стрілець, К. О. Нечипорук, А. А. Степанюк // Вісник НУВГП. Технічні науки. Рівне : НУВГП. – 2024. – Вип. 1 (105). С. 56–65. – DOI: <https://doi.org/10.31713/vt1202427>
23. Пахаренко В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. / В. Л. Пахаренко, М. М. Марчук – Рівне : НУВГП, 2009. – 179 с.
24. Шваб'юк В.І. Опір матеріалів: Підручник. – К.: Знання, 2016. – 400 с
25. Kalpakjian S. Manufacturing Engineering and Technology. 8th Edition / S. Kalpakjian, S. Schmid, K. S. Vijay Sekar. – Pearson, 2023. – 1313 p.

References

1. Malashchenko V. O. Mufty pryvodiv. Konstruktsii ta pryklady rozrakhunkiv : navch. posib. – Lviv : NU «Lvivska politehnika», 2006. – 196 s.
2. Malashchenko V. O. Novi mufty mekhanichnykh pryvodiv mashyn : monohrafiia. / V. O. Malashchenko, V. M. Strilets, O. R. Strilets, V. A. Fedoruk. – Rivne : NUVHP, 2019. – 198 s.
3. Popov A. F. Osnovy slusarnoi spravy : navch. posib. / A. F. Popov, T. V. Pakhar, O. V. Parzhnyskyi, H. Yu. Shulepina – Chernivtsi : Bukrek, 2020. – 224 s.
4. Pat. na korysnu model № 154151 Ukrainy. MPK F16D3/52, F16D43/20. Mufta pruzhna dvostoronnia / V. M. Strilets, V. O. Malashchenko, O. R. Strilets, V. Yu. Serhiichuk; zaiavnyk i patentovlasnyk Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – № u 2023 02341; zaiav. 17.05.2023; opubl. 11.10.2023, Biul. № 41. – 5 s.
5. Prawoto Y. Fracture mechanics approach to splitting in low spring index cold coiling process / Y. Prawoto, S. Manville, T. Sakai, et al. // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2019. – Vol. 19. – pp. 738–751. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-019-00653-7>.
6. Jun Ke. Design method, performance investigation and manufacturing process of composite helical springs: a review / Jun Ke, Zhen-yu Wu, Yi-sheng Liu, et al. // Composite Structures. – 2020. – Vol. 252. – Article 112747. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112747>.
7. Jianjun WU An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process / Jianjun WU, Zengkun ZHANG, // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – Vol. 34, Iss. 11. – pp. 267–276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.036>
8. Gao G. A closed-form design method for U-shaped springs in aeroelastic modeling of truss-girder suspension bridges / G. Gao, Du W., Sun Y., et al. // arXiv. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.05830>
9. Strilets O. R. Mufty z pidkovopodibnymy radialnymy pruzhynamy ta yikh rozrakhunky / O. R. Strilets, K. O. Nechiporuk, A. A. Stepaniuk // Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky. Rivne : NUVHP. – 2024. – Vyp. 1 (105). – DOI: <https://doi.org/10.31713/vt1202427>
10. Pakhareno V. L. Materialoznavstvo ta tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv : navch. posib. / V. L. Pakhareno, M. M. Marchuk – Rivne : NUVHP, 2009. – 179 s.
11. Shvabiuk V.I. Opir materialiv: Pidruchnyk. – K.: Znannia, 2016. – 400 s.
12. Kalpakjian S. Manufacturing Engineering and Technology. 8th Edition / S. Kalpakjian, S. Schmid, K. S. Vijay Sekar. – Pearson, 2023. – 1313 p.