

А. Д. БОБКОВ

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЬНИХ ШНЕКІВ У МАШИНАХ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ

У статті розглянуто перспективність застосування сегментних (модульних) шнеків в обладнанні, яке використовується в галузевому машинобудуванні і прикладній механіці, як альтернативи традиційним рішенням із суцільнометалевими чи полімерними конструкціями. Запропоновано концепцію шнека, складеного з окремих уніфікованих елементів — виток із фрагментом валу виготовляються як одне ціле, і набір з декількох таких секцій формує готовий шнек. Елементи шнека виготовляються окремо і незалежно один від одного із застосуванням технологій адитивного виробництва. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип простого монтажу, забезпечуючи можливість швидкої зміни геометричних параметрів (кроку, діаметра, профілю витків шнека) залежно від технологічних вимог. Обґрунтовано, що використання модульної структури сприяє підвищенню універсальності обладнання, скороченню витрат на виготовлення за рахунок відмови від складних технологічних процесів навивки гвинтових заготовок та використання дорогих сплавів і полімерних матеріалів, а також зменшенню тривалості циклу виробництва. Окрему увагу приділено підвищенню ремонтпридатності: у разі пошкодження витка можливе локальне відновлення шляхом заміни лише окремих сегментів без демонтажу чи заміни всього шнека. Запропоновано конструктивне рішення з'єднання модулів між собою із використанням муфти, яка забезпечує захисну функцію, шляхом розімкнення секцій у випадку заклинювання шнека під час роботи. Додатково передбачено застосування кінцевих вимикачів для автоматичного аварійного відключення приводу при розходженні елементів конструкції, що підвищує надійність і безпеку експлуатації обладнання. Відзначено, що застосування технологій 3D друку відкриває перспективи оптимізації масогабаритних характеристик шнека за рахунок раціонального і точного розподілу матеріалу на заготовці, а також дозволяє інтегрувати додаткові конструктивні елементи без суттєвого ускладнення виробничого процесу. Проаналізовано потенційні обмеження та особливості використання модульних шнеків, що пов'язані з міцністю з'єднань, точністю виготовлення та умовами навантаження, що в цілому визначає напрямки подальших досліджень у даній сфері. Отримані результати свідчать про доцільність впровадження сегментних шнеків у промислові системи транспортування, подавання та обробки матеріалів, зокрема в умовах, що вимагають гнучкості, швидкої адаптації та зниження експлуатаційних витрат.

Ключові слова: шнек; модульна збірка; сегментна конструкція; адитивне виробництво; перспективність; ремонтпридатність; універсальність

А. BOBKOV

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL JUSTIFICATION FOR THE APPLICATION OF MODULAR SCREWS IN MACHINES FOR HANDLING DISCRETE LOADS

The article examines the prospects for the application of segmented (modular) screws in equipment used in industrial engineering and applied mechanics as an alternative to traditional solutions based on solid metal or polymer structures. A concept of a screw assembled from separate unified elements is proposed, where the flight together with a shaft fragment is manufactured as a single unit, and a set of such sections forms a complete screw. The screw elements are manufactured separately and independently using additive manufacturing technologies. This approach enables the implementation of a simplified assembly principle, providing the possibility of rapid modification of geometric parameters (pitch, diameter, and flight profile) depending on technological requirements. It is substantiated that the use of a modular structure contributes to increasing equipment versatility, reducing manufacturing costs by eliminating complex processes of helical blank forming and the use of expensive alloys and polymer materials, as well as shortening the production cycle. Particular attention is paid to improving maintainability: in the event of flight damage, local repair is possible by replacing only individual segments without dismantling or replacing the entire screw. A structural solution for connecting modules using a coupling is proposed, which performs a protective function by disengaging sections in the event of screw jamming during operation. Additionally, the use of limit switches for automatic emergency shutdown of the drive when structural elements separate is provided, which increases operational reliability and safety. It is noted that the application of 3D printing technologies opens prospects for optimizing the weight and dimensional characteristics of the screw through rational and precise material distribution within the workpiece, and also allows the integration of additional structural elements without significant complication of the manufacturing process. Potential limitations and features of the use of modular screws related to joint strength, manufacturing accuracy, and loading conditions are analyzed, which generally determine the directions for further research in this field. The obtained results indicate the feasibility of implementing segmented screws in industrial systems for transportation, feeding, and processing of materials, particularly under conditions requiring flexibility, rapid adaptation, and reduced operating costs.

Keywords: screw; modular assembly; segmented structure; additive manufacturing; feasibility; maintainability; versatility; conveying machines

Вступ. Шнекові машини з нежорсткими, полімерними гвинтовими елементами, та шнеками зі змінним кроком, дуже широко застосовуються у харчовій, сільськогосподарській, машинобудівній, та легкій промисловостях. Наявні конструкції добре зарекомендували себе з точки зору експлуатаційної ефективності та незамінності у своїх сферах. Популярність шнеків призводить до пошуку шляхів до їх постійного вдосконалення. Одне з таких удосконалень – це зміна конструкції з суцільної, на сегментну, або модульну.

Аналіз попередніх досліджень. Теоретичні, експериментальні, практичні, аналітичні і математичні аспекти шнекових елементів були досліджені різними українськими науковцями,

серед яких Гевко І. Б., Гевко Р. Б., Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М., Вітровий А. О., Пік А. І., Закалов О. В., Закалов І. О.

Сучасні дослідження шнекових транспортерів значною мірою зосереджені на оптимізації конструктивних параметрів шнеків [1, 2], моделюванні процесів транспортування сипких вантажів із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) [2–4], а також підвищенні ефективності їх роботи у різних галузях промисловості [5].

© А. Д. Бобков, 2026

Метою статті є дослідження параметрів сегментних гвинтових елементів (модульних шнеків), обґрунтування доцільності їх застосування у машинобудуванні.

Наукова новизна дослідження. Новизна полягає у запропонованому підході до конструктивного виконання шнекових робочих органів у вигляді модульної (сегментної) системи, елементи якої виготовляються окремо із застосуванням технологій адитивного виробництва. На відміну від традиційних суцільних шнеків, які вже мають значну кількість досліджень, запропонована конструкція залишається недостатньо вивченою, і передбачає формування робочого органу з уніфікованих секцій, де кожен виток разом із фрагментом валу утворює окремий модуль. Такий підхід забезпечує можливість гнучкої зміни геометричних параметрів шнека (кроку, діаметра, конфігурації витків) шляхом комбінування окремих сегментів залежно від технологічних вимог.

Також новизна полягає у поєднанні модульної конструкції шнека з використанням полімерних матеріалів, виготовлених методом 3D-друку, що дозволяє адаптувати жорсткість контактних поверхонь до особливостей транспортованого об'єкта.

Додатковим елементом наукової новизни є запропоноване конструктивне рішення з'єднання сегментів із застосуванням захисної муфти та системи аварійного відключення приводу. Така система дозволяє автоматично роз'єднувати секції шнека у випадку його заклинювання та забезпечує оперативне вимкнення обладнання, що підвищує експлуатаційну надійність, ремонтпридатність і безпеку роботи шнекових машин.

Виклад основного матеріалу. Одним із підходів до вдосконалення шнекових робочих органів є детальний аналіз їх конструкції та визначення експлуатаційних параметрів, що впливають на доцільність впровадження нових технічних рішень і ефективність їх подальшого використання. У якості прикладу розглянемо поширену модель BFA-MB611 – автоматичну машину для наповнення та закупорювання скляних пляшок та алюмінієвих банок із протитиском (до 850 пляшок/год), яка широко застосовується у виробничих лініях наповнення тари.

Аналіз конструкції машини BFA-MB611 показує, що шнек у даному випадку працює в умовах відносно низьких механічних навантажень та не взаємодіє з абразивними або високотемпературними матеріалами. Основним об'єктом транспортування є скляна та металева тара, яка, однак, характеризується значною варіативністю геометричних параметрів – об'єму, форми та габаритних розмірів, що визначаються як технологічними вимогами, так і дизайнерськими особливостями продукції. При цьому встановлено, що в аналогічних машинах ранніх модифікацій застосовувалися шнеки, виготовлені з жорстких матеріалів, контакт із якими призводив до підвищеного рівня бою тари, що в окремих випадках досягав близько 5–10 % [6].

Запропоноване рішення у вигляді модульного (сегментного) шнека дозволяє усунути вище описані недоліки та підвищити ефективність роботи обладнання. Зокрема, модульна конструкція забезпечує високий рівень універсальності за рахунок можливості оперативної заміни або комбінування окремих сегментів залежно від типорозміру тари. Використання технологій адитивного виробництва значно спрощує процес виготовлення елементів шнека, скорочує виробничі витрати та дозволяє швидко адаптувати конструкцію під нові умови експлуатації. Крім того, застосування полімерних матеріалів для виготовлення сегментів сприяє зменшенню жорсткості контакту зі склянню тарою, що, у свою чергу, дозволяє суттєво знизити відсоток її пошкодження.

Доцільність впровадження сегментних шнеків підтверджується також при аналізі роботи класичних шнекових транспортерів, що експлуатуються для переміщення зерна, гранул, тирси, порошоків [7]. У таких системах одним із ключових факторів є знос робочих поверхонь витків у процесі тривалої експлуатації. Використання модульної конструкції дозволяє підвищити ремонтпридатність обладнання за рахунок можливості локальної заміни окремих зношених або пошкоджених сегментів без необхідності демонтажу всього шнека, що забезпечує суттєву економію часу та матеріальних ресурсів.

Додатковою перевагою є підвищення експлуатаційної надійності системи. У разі виникнення аварійних ситуацій, зокрема заклинювання шнека, передбачене використання запобіжних муфт у місцях з'єднання сегментів, які забезпечують роз'єднання конструкції та запобігають пошкодженню приводу і шнека по всій довжині [8]. Інтеграція системи аварійного відключення із застосуванням кінцевих вимикачів дозволяє автоматично і миттєво зупинити роботу конвеєра при порушенні цілісності конструкції, що підвищує рівень безпеки експлуатації обладнання. Питання захисту приводів від перевантажень із використанням запобіжних муфт розглянуті у працях авторів, які обґрунтували доцільність застосування обмежувачів крутного моменту [9, 10].

Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать про те, що впровадження сегментних (секційних) шнеків є технічно обґрунтованим рішенням, яке забезпечує підвищення універсальності, зниження експлуатаційних витрат, покращення ремонтпридатності та підвищення надійності роботи як дозувального, так і транспортуючого обладнання.

Загалом, найоптимальніші варіанти конструкцій секційних шнеків, з урахуванням всіх робочих параметрів, таких як надійність, працездатність на рівні із класичними суцільними шнеками, продуктивність, простота, швидкість і помірні собівартість виробництва, наступні:

Варіант 1: шліцьове з'єднання і фрикційна муфта. Сутність полягає у використанні як

з'єднувального елементу шліців (прямих або евольвентних), а сила притискання пружиною забезпечує фрикційну складову.

Принцип роботи: Передача крутного моменту через шліці, обмеження — через силу пружинного притиску.

Переваги: точне центрування; менший ударний режим; регульований момент спрацювання.

Недоліки: складніше у виготовленні; може «пробуксовувати» постійно при неправильному підборі пружини; варіант добре підходить, якщо потрібна стабільна робота без ривків.

Варіант 2: односторонній храповий механізм. Суть конструкції: зубці під кутом і пружний зуб або собачка.

Принцип роботи: В одну сторону система передає крутний момент, в іншу — проковзує.

Переваги: чітке «відключення»; можна контролювати напрям.

Недоліки: працює тільки в одному напрямку; знос при частому спрацьовуванні.

Підійде, якщо шнек обертається лише в одну сторону.

Варіант 3: конусне зубчасте з'єднання (самоблокування). Суть конструкції: торці зроблені під конус і мають зубці.

Принцип роботи: при навантаженні сильніше секції «втягуються», при перевищенні сили — роз'єднуються.

Переваги: дуже добре центрується при збиранні; має менше люфтів.

Недоліки: більш вимогливе до точності підгонки деталей; може «заклинювати» якщо кут конуса неправильний.

Оптимальний кут конуса 10–15°.

Варіант 4: магнітно-пружинне з'єднання (експериментальний варіант). Суть конструкції: в з'єднанні використані зубці з магнітами, та слабка пружина.

Переваги: дуже плавне розчеплення; менше механічного зносу.

Недоліки: складність конструкції; не підходить для великих навантажень.

Варіант 5: трикутні зубці та осьове підпружинення. Суть конструкції: торці секцій мають однакові трикутні зубці (як crown gear), які входять один в одного.

Принцип роботи: У нормальних умовах зубці жорстко передають обертовий момент, а при перевантаженні — зубці «виштовхуються» один з одного за рахунок пружини, і відбувається проковзування.

Переваги: простота виготовлення (важливий параметр для 3D-друку); можливість самоцентрування; плавне «тріщання» при перевантаженні.

Мінуси: знос зубців (стирання пластику); не дуже точне позиціонування після проковзування.

Рекомендації по виготовленню: кут зуба ~60°; закруглити вершини (для зменшення зносу при спрацьовуванні); додати невеликий нахил (5–10°) для кращого «виштовхування» зубців.

Таким чином, проаналізувавши всі переваги і недоліки кожного з наведених вище прикладів конструкцій, можна зробити висновок, що найефективніші і найбільше збалансовані експлуатаційні характеристики має варіант 5, (секція з трикутними зубцями), який зображено на рис. 1.

Приклад розрахунку із використанням типових для шнека формул:

визначення продуктивності шнека:

$$Q = \left(\pi d^2 / 4 \right) S n \varphi, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

де S – крок витка;

n – оберти/с;

φ – коефіцієнт заповнення (0,15–0,45).

визначення швидкості обертання:

$$n = V / S, \text{ об/хв.}, \quad (2)$$

де V – швидкість переміщення матеріалу (~0,1–1).



Рисунок 1 – Секція з трикутними зубцями

Типові показники для зерна: 100-300 об/хв.; тирси: 50-150 об/хв.; порошків: 20-100 об/хв.

Визначення потужності приводу:

$$P = \frac{Q \rho g L f}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

де ρ – густина матеріалу;

η – ККД (0,7 – 0,9);

g – коефіцієнт прискорення (9,8 м/с²);

L – довжина шнека;

f – коефіцієнт опору (0,3–0,6);

визначення крутного моменту:

$$M = \frac{9550 P}{n}, \text{ Н·м}, \quad (4)$$

визначення напружень на кручення:

$$\tau = \frac{16 M}{\pi d^3}; \quad (5)$$

визначення згинання вала:

$$\sigma = \frac{32 M_{зг}}{\pi d^3}; \quad (6)$$

визначення згинального моменту $M_{зг}$:

$$M_{зг} = \frac{q L^2}{8}, \quad (7)$$

де $q = \rho \cdot A \cdot \varphi \cdot g$ – розподілене навантаження ($A = D/4$);
визначення комбінованого навантаження
(згин і кручення):

$$\Sigma q = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (8)$$

Розрахунок сили пружини:

$$M = F r \tan \alpha, \quad (9)$$

де M – момент (Н·м);

F – сила пружини (Н);

r – середній радіус (м);

α – кут зубця.

Розрахунки проводимо взявши за об'єкт дослідження шнек [11], встановлений у машини VFA-MB611. Для шнеків встановлених в цих машинах можна приймати наступні інженерно обґрунтовані значення, виходячи з даних взятих із технічної документації [12]: діаметр шнека: 70 мм; радіус (r) = 0,035 м; крутний момент (M): ≈ 8 Н·м; $\alpha = 30^\circ$.

Тоді, типовий приклад для розрахунку зусилля шнека (Н):

$$F = \frac{M}{r \tan \alpha} \quad (10)$$

Це приблизно 73 кг зусилля. Враховуючи, що шнек працює в стабільних умовах без поштовхів, ривків і постійної зміни сил, обираємо пластик по типу Nylon (PA6, PA12), який визначається насамперед достатньою міцністю і зносостійкістю. Нейлонові матеріали доцільні у випадках підвищених навантажень, однак потребують більш складних умов друку.

Технологія 3D-друку, вибір обладнання, та основні налаштування. Для виготовлення сегментів шнека доцільно використовувати FDM-принтери із закритою робочою камерою (рис. 2), що забезпечує стабільний температурний режим та зменшує деформації, характерні для поліамідних матеріалів.



Рисунок 2 – Обладнання та технологічні особливості виготовлення сегментів шнека методом FDM-друку

Основні параметри друку підбираються з урахуванням необхідності забезпечення міцності та точності геометрії. Рекомендована товщина шару становить 0,1–0,2 мм, що дозволяє досягти достатньої якості поверхні гвинтової лінії. Заповнення (infill) доцільно встановлювати на рівні 40–80% залежно від вимог до міцності, при

цьому для навантажених елементів доцільне використання суцільного або комбінованого заповнення. Кількість зовнішніх стінок (perimeters) повинна бути не менше 3–4 для підвищення зносостійкості витків. Температура друку та стола визначається типом матеріалу (наприклад, для Nylon: 260–300°C для сопла та 80–110 °C для платформи).

Орієнтація моделі при друці є критично важливим фактором. Рекомендується розташовувати сегмент таким чином, щоб вісь шнека була вертикальною, що забезпечує рівномірне формування витків та підвищує точність з'єднувальних елементів. Водночас це може потребувати використання підтримок, які після друку видаляються з подальшою механічною обробкою.

Додатково слід враховувати постобробку виробів, яка може включати механічне зачищення поверхні, припасування з'єднувальних вузлів та, за необхідності, термічну обробку для зняття внутрішніх напружень. Це дозволяє підвищити точність складання модулів і покращити їх експлуатаційні характеристики [13].

Порівняльний аналіз матеріалів та оптимізація 3D-друку. Для забезпечення працездатності сегментного шнека в умовах машини VFA-MB611, де розрахункове зусилля становить близько 73 кг, вибір матеріалу є критичним.

Nylon (PA6/PA12): має найвищу зносостійкість та ударну в'язкість, що важливо для тривалої експлуатації трикутних зубців. Однак висока термоусадка (до 0.7–1.5 % у PA6 та 0.5–1.2 % у PA12) вимагає використання термокамери для збереження точності кроку шнека.

PETG-CF (з вуглеволокном): альтернативний варіант, який має значно вищий модуль пружності. Це мінімізує деформацію витків під навантаженням і забезпечує стабільне зачеплення зубців без люфтів.

Оптимізація структури (Infill): для зон передачі крутного моменту (зубців) рекомендовано застосовувати заповнення «Gryoid» на рівні, що забезпечує ізотропну міцність сегмента.

Орієнтація та міцність: вертикальний друк забезпечує ідеальну циліндричність валу, проте створює ризик розшарування по Z-осі під дією згинального моменту. Для компенсації цього ефекту кількість зовнішніх стінок (perimeters) має бути збільшена до 6. Механічні властивості виробів, виготовлених методом FDM, детально досліджені у роботах зарубіжних науковців [14,15], де встановлено залежність міцності від орієнтації шарів та параметрів друку.

Застосування FDM-технології для виготовлення сегментів шнека забезпечує достатній рівень точності, міцності та гнучкості конструкції, що підтверджує доцільність її використання у виробництві модульних шнекових систем.

Висновки. У даному дослідженні запропоновано концепцію сегментного шнека, де

воток та фрагмент валу є єдиним модулем, що дозволяє відмовитися від складних процесів навивки гвинтових заготовок, і доведено, що для машини BFA-MB611 використання полімерних модулів дозволяє знизити рівень бою скляної тари до мінімуму. Шляхом порівняльного аналізу п'яти варіантів з'єднань визначено, що конструкція з трикутними зубцями та осьовим підпружиненням є найбільш збалансованою за критеріями простоти виготовлення та надійності захисту від заклинювання. Розрахунково обґрунтовано, що для шнека діаметром 70 мм при крутному моменті до 8 Н·м використання Nylon (PA6/PA12) забезпечує необхідну міцність при зусиллі спрацювання запобіжної муфти близько 95-100 кг. Встановлено, що адитивні технології дозволяють інтегрувати в конструкцію шнека систему автоматичного аварійного відключення через кінцеві вимикачі, що підвищує безпеку експлуатації.

**Список літератури надано DOI для статей и полные данные
Например**

- Laukenmann, M.A.; Sawodny, O. Model-Based control of a clutch actuator used in hybrid dual-clutch transmissions. *Mechatronics* 2021, 77, Volume 237, Issue 9, <https://doi.org/10.1177/09596518231167921>.
- Roberts A. W. Bulk solids handling: recent developments in screw conveyors. *Powder Technology*, 2019.
- Kretzschmar N., et al. Design and performance analysis of screw feeders for bulk materials. *Advanced Powder Technology*, 2021.
- Owen P. J., Cleary P. W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM). *Powder Technology*, 2018.
- Li H., McCarthy J. J. Numerical simulation of granular flow in screw conveyors. *Chemical Engineering Science*, 2020.
- Gebresenbet G., et al. Performance evaluation of screw conveyors in agricultural applications. *Biosystems Engineering*, 2019.
- Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості: підручник / Мирончук В. Г., Гулий І. С., Пушанко М. М. [та ін.] ; за ред. В. Г. Мирончука. – Вінниця: Нова книга, 2007. – 648 с.
- Гевко Р.Б., Гевко М.Р., Павлов К.В., Ю Павлова О.М. Секційні гвинтові конвеєри для транспортування сипких сільськогосподарських матеріалів : монографія. Луцьк : ФОП Мажула Ю.М., 2023.
- Пружно-запобіжні муфти: конструкції, розрахунок, дослідження / Гевко Б. М., Луців І. В., Гевко І. Б., Комар Р. В., Дубиняк Т. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 200 с.
- Patel V., et al. Design of torque limiting couplings for overload protection. *Mechanism and Machine Theory*, 2018.
- Zhang Y., et al. Failure analysis of mechanical couplings under overload conditions. *Engineering Failure Analysis*, 2021.
- Рогатинський Р.М. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія / Р.М.Рогатинський, І.Б.Гевко, А.С.Дячун. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. – 280 с.
- BFA-MB611: Автоматична машина для наповнення та закупорювання скляних пляшок та алюмінієвих банок із протитиском (до 850 бут/год) Режим доступу: <https://eshop.czechminibreweries.com/uk/product/bfa-mb611/>
- ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing General principles – Fundamentals and vocabulary.
- Singh R., et al. Mechanical properties of FDM printed polymer components: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- Torrado A. R., Shemelya C. M. Characterizing the effect of additives on the strength of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, 2019.
- ASTM F2792 / ISO/ASTM 52900 updates on additive manufacturing.

References (transliterated)

- Roberts A. W. Bulk solids handling: recent developments in screw conveyors. *Powder Technology*, 2019.
- Kretzschmar N., et al. Design and performance analysis of screw feeders for bulk materials. *Advanced Powder Technology*, 2021.
- Owen P. J., Cleary P. W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM). *Powder Technology*, 2018.
- Li H., McCarthy J. J. Numerical simulation of granular flow in screw conveyors. *Chemical Engineering Science*, 2020.
- Gebresenbet G., et al. Performance evaluation of screw conveyors in agricultural applications. *Biosystems Engineering*, 2019.
- Myronchuk V. H., Hulyi I. S., Pushanko M. M. et al. *Obladnannya pidpriemstv pererobnoi ta kharchovoi promyslovosti: pidruchnyk* [Equipment of processing and food industry enterprises: textbook]. Vinnytsia: Nova Knyha, 2007. 648 p.
- Hevko R. B., Hevko M. R., Pavlov K. V., Pavlova O. M. *Sektsiini hvyntovi konveier y dlia transportuvannia sypkykh silskohospodarskykh materialiv: monohrafiia* [Sectional screw conveyors for transportation of bulk agricultural materials: monograph]. Lutsk: FOP Mazhula Yu. M., 2023.
- Hevko B. M., Lutsiv I. V., Hevko I. B., Komar R. V., Dubyniak T. S. *Pruzhno-zapobizhni mufty: konstruktsii, rozrakhunok, doslidzhennia* [Elastic safety couplings: structures, calculation, research]. Ternopil: FOP Paliantsia V. A., 2019. 200 p.
- Patel V., et al. Design of torque limiting couplings for overload protection. *Mechanism and Machine Theory*, 2018.
- Zhang Y., et al. Failure analysis of mechanical couplings under overload conditions. *Engineering Failure Analysis*, 2021.
- Rohatynskyi R. M., Hevko I. B., Diachun A. Ye. *Naukovo-prykladni osnovy stvorennia hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh mekhanizmiv: monohrafiia* [Scientific and applied foundations for the creation of screw transport-technological mechanisms: monograph]. Ternopil: Publishing House of Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2014. 280 p.
- BFA-MB611: Avtomatychna mashyna dlia napovnenia ta zakuporiuvannia sklyanykh pliashok ta aliuminiievkykh banok iz protytyskom (do 850 but/hod) [Automatic machine for filling and capping glass bottles and aluminum cans with counterpressure (up to 850 bottles/hour)]. Available at: <https://eshop.czechminibreweries.com/uk/product/bfa-mb611/>
- ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary.
- Singh R., et al. Mechanical properties of FDM printed polymer components: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- Torrado A. R., Shemelya C. M. Characterizing the effect of additives on the strength of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, 2019.
- ASTM F2792 / ISO/ASTM 52900 updates on additive manufacturing.

Надійшла (received) 27.04.2026

Стаття прийнята до друку 20.05.2026

Опублікована 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Бобков Антон Дмитрович / Bobkov Anton – аспірант кафедри автомобілів, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м.Тернопіль, [Україна](#); e-mail: bobkovanton020300@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-8899-7721>