

В. В. Савуляк, канд. техн. наук, доц.; В. О. Білостечний

ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ З УРАХУВАННЯМ ТОПОЛОГІЇ, МАТЕРІАЛУ ТА СЕРІЙНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

У статті розглянуто актуальну для сучасного машинобудування проблему обґрунтованого вибору технології отримання заготовок деталей з урахуванням сукупності конструктивних, матеріальних, виробничих, економічних і логістичних чинників. Показано, що традиційний інтуїтивний підхід до вибору способу виготовлення заготовки є недостатньо ефективним в умовах ускладнення топології деталей, розширення номенклатури матеріалів і зростання вимог до стабільності якості та повторюваності процесів.

Запропоновано формалізований алгоритм вибору технології отримання заготовок, який поєднує три взаємопов'язані етапи: попередній логічний відбір допустимих технологічних альтернатив, багатокритеріальне кількісне оцінювання та верифікацію результатів за допомогою методу скінченних елементів. На етапі логічної селекції здійснюється послідовна фільтрація технологій з урахуванням властивостей матеріалу, серійності виробництва, топологічних особливостей деталі, а також виробничо-економічних і логістичних обмежень. Особливу увагу приділено аналізу впливу топологічних елементів (внутрішніх порожнин, піднутрень, тонкостінних зон, ребер жорсткості тощо) на принципову можливість формоутворення заготовки різними методами.

Для кількісного порівняння допустимих технологічних альтернатив застосовано багатокритеріальну модель на основі зваженої адитивної згортки нормалізованих показників, що дозволяє формально ранжувати варіанти за сукупністю технічних і економічних критеріїв. Система критеріїв включає показники міцності та жорсткості заготовки, технологічності процесу, собівартості, стабільності якості, коефіцієнта використання матеріалу та енергоємності виробництва, при цьому вагові коефіцієнти критеріїв адаптуються залежно від типу деталі.

Метод скінченних елементів використовується не лише як засіб перевірки, а як активний інструмент верифікації та ітераційної корекції технологічних рішень, що дозволяє оцінювати напружено-деформований стан, виявляти зони концентрації напружень і уточнювати конструкцію заготовки з урахуванням функціонального призначення поверхонь. Запропонований підхід відповідає сучасним тенденціям інтеграції методів багатокритеріального аналізу та чисельного моделювання й може бути використаний як універсальний інструмент підтримки прийняття рішень під час проектування технологічних процесів у машинобудуванні.

Ключові слова: заготовка, корпусна деталь, матеріал, топологія, серійність, багатокритеріальний вибір, FEM-аналіз.

Вступ

Доцільний та ефективний спосіб отримання заготовки є базовою потребою для планування технологічного процесу, оскільки саме він визначає рівень витрат на виготовлення деталі, обсяг подальшої обробки та її надійність у роботі [1 – 3]. Це особливо важливо для корпусних елементів підшипникових вузлів, де точність і жорсткість конструкції безпосередньо впливають на ефективність сприйняття навантажень [4, 5].

У сучасних умовах машинобудування інтуїтивний підхід до обрання способів отримання заготовок поступово втрачає актуальність через розмаїття матеріалів, ускладнення форм деталей і зростання вимог до повторюваності та передбачуваності процесу вибору. У зв'язку з цим постає необхідність використання формалізованих методів, які дозволяють системно враховувати геометричні, матеріальні, виробничі й економічні фактори та надаватимуть можливість удосконалювати форму деталей та заготовок [2, 6].

Таким чином, проблема вибору кращого способу отримання заготовки є багатофакторною і потребує чіткого методичного підходу, що дозволяє всебічно враховувати обмеження та особливості виробництва, матеріалу та конструкції.

Узагальнена методика вибору способу отримання заготовки

Розроблений у статті алгоритм базується на системному підході до технічного аналізу і включає комплексну оцінку конструкційних, матеріальних, технологічних, виробничих та економічних аспектів. Його універсальність дозволяє адаптувати метод до широкого спектру деталей і умов без прив'язки до конкретних прикладів.

Методика передбачає реалізацію трьох взаємопов'язаних етапів:

- Попередній логічний аналіз для виключення непридатних технологічних рішень;
- Кількісне багатокритеріальне оцінювання доступних варіантів;
- Верифікація за допомогою FEM-моделювання з можливістю зворотного коригування.

Цей підхід повністю відповідає сучасним вимогам інтегрованого проєктування, де технічні рішення оптимізуються в тісному зв'язку з економічними і виробничими факторами [1 – 3, 6].

На першому етапі – логічної селекції – здійснюється фільтрація технологій, що не відповідають базовим вимогам, сформованим за такими групами обмежень:

- характеристиками матеріалів,
- масштабами виробництва,
- геометричною складністю,
- наявною виробничою інфраструктурою,
- логістичними і економічними факторами.

Вибір матеріалу безпосередньо впливає на характеристики заготовки, зокрема її оброблюваність, міцність та сумісність із конкретними технологіями виготовлення [4, 7, 8]. Наприклад, матеріали з добрими ливарними властивостями переважно застосовуються у процесах лиття, тоді як пластичні під час нагрівання сплави краще підходять для обробки тиском. Такий підхід дозволяє враховувати не лише властивості матеріалу, але й технологічну доцільність його застосування.

Перед узагальненням впливу матеріалів на допустимі технології виготовлення заготовок у таблиці 1 зазначимо:

- матеріали з високою ливарною текучістю та невеликою схильністю до утворення усадкових дефектів є придатними для різних видів лиття;
- пластичні під час нагрівання матеріали є придатними до технологій деформування, як-от кування чи пресування;
- матеріали з вираженою анізотропією властивостей потребують додаткового контролю при адитивному виробництві;
- окремі матеріали груп можуть мати властивості, що суттєво відрізняються від характерних для групи, що означає наближений характер узагальнення наведеного в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив груп матеріалів на допустимі технології виготовлення заготовок

Матеріальна група	Доцільні технології	Особливості та обмеження
Сталі конструкційні, леговані	Кування, прокат, штампування, порошкова металургія, LPBF-друк	Висока міцність, складна топологія може бути обмеженням
Чавуни	Лиття всіх типів (піщане, кокільне, під тиском)	Непридатні до деформаційних методів
Алюмінієві сплави	Лиття під тиском, пресування, SLM-друк	Висока теплопровідність, обмежена жорсткість
Титанові сплави	Кування, адитивне виготовлення	Дорогі, складні в обробці
Мідь і сплави	Прокат, лиття, штампування	Низька твердість, схильні до наклепу
Полімери	Інжекційне лиття, термоформування, FDM	Обмеження за температурною стійкістю

Матеріальна група	Доцільні технології	Особливості та обмеження
Композити	Пресування, інфузія, намотування	Анізотропія властивостей, складність базування
Порошкові матеріали	Пресування, спікання, MIM, SLS	Необхідність контролю пористості
Кераміка, керамометали	Пресування, лиття шлікера, 3D-друк	Крихкість, складна мехобробка

Масштаб виробництва істотно впливає на економічну ефективність тієї чи іншої технології виготовлення заготовок. Вартість одиниці продукції формується з двох основних компонентів: змінних і постійних витрат. За зростання обсягів виробництва частка постійних витрат зменшується, що робить дорогі в впровадженні, але ефективні в серії технології доцільними.

Це пояснює, чому деякі методи, які неприйнятні для одиничного або дрібносерійного виготовлення, стають вигідними під час переходу до масового виробництва. Залежно від обсягів випуску, доцільними стають різні технологічні підходи.

Серійність виготовлення визначає економічну доцільність застосування тієї чи іншої технології. У загальному випадку питома собівартість одиниці продукції може бути наведена у вигляді [1, 2]:

$$C_{\text{од}} = C_{\text{змін}} + \frac{C_{\text{пост}}}{N}, \quad (1)$$

де $C_{\text{од}}$ – собівартість одиниці продукції; $C_{\text{змін}}$ – змінні витрати на виготовлення одиниці продукції; $C_{\text{пост}}$ – постійні витрати на виготовлення одиниці продукції; N – програма випуску продукції.

Отримане співвідношення показує, що із зростанням обсягу випуску істотно зменшується вплив постійних витрат у структурі собівартості одиниці продукції. Це означає, що економічна доцільність різних способів отримання заготовок безпосередньо визначається масштабом виробництва. Технологічні процеси, які є неприйнятними за малих серій через високу вартість оснащення, за збільшення обсягу випуску можуть ставати економічно вигідними. Саме ця закономірність лежить в основі узагальненого розподілу технологій за типами виробництва, наведеного в таблиці 2. При цьому серійність випуску продукції можна визначати, як за масою і кількістю виробів, так і за їх трудомісткістю обробки чи коефіцієнтом закріплення операцій (спеціалізацією виробничих процесів).

Таблиця 2

Зв'язок серійності випуску продукції з доцільними технологіями отримання заготовок

Серійність виробництва	Характерні вимоги до точності / топології	Рекомендовані технології отримання заготовки	Орієнтовні інвестиції в оснащення
Одиничне	Складна топологія, індивідуальні форми, високий рівень унікальності	Адитивне виробництво (SLS, LPBF, FDM), мех. обробка з прокату, лиття в піщані форми	Низькі
Дрібносерійне	Помірна складність форми, частково стандартизовані елементи	Лиття в кокіль, кування, комбіноване виготовлення (адитив + мех. обробка)	Низькі–середні
Серійне	Висока повторюваність форми, стабільна геометрія	Штампування, лиття під тиском, пресування, порошкове пресування	Середні
Масове	Висока точність, низька собівартість одиниці, проста топологія	Штампування, гаряче пресування, лиття під тиском, інжекційне лиття полімерів	Високі
Безперервне / потокове	Прості геометрії, стабільний матеріал і форма	Прокат, екструзія, лиття безперервне	Дуже високі

Цей аналіз показує: хоча серійність і визначає економічну ефективність, її недостатньо – форма деталі теж накладає обмеження на вибір технології. Навіть за повної економічної відповідності певної технології заданому типу виробництва її практична реалізація може бути неможливою через особливості просторової форми деталі. Тому наступним обов'язковим етапом логічного відбору є врахування топологічних обмежень, які визначають принципову можливість формоутворення заданої геометрії.

Топологія деталі є геометричним фільтром технологічних рішень. Саме вона визначає, чи можливо отримати заготовку без надмірного ускладнення:

- внутрішніх порожнин;
- піднутрень;
- різких переходів товщин;
- фланців;
- ребер жорсткості;
- тонкостінних елементів.

Топологічні фактори мають дискретний характер: або елемент може бути відтворений конкретною технологією, або принципово не може.

Таблиця 3

**Вплив топологічних елементів на придатність застосування технологій
отримання заготовок[3, 5]**

Тип топології деталі	Рекомендовані технології отримання заготовки	Обмеження / особливості технології	Оптимальна серійність	Типові матеріали
Проста геометрія (паралелепіпед, диск, вал)	Прокат, кування, штампування, механічна обробка з заготовки	Мінімальні втрати матеріалу, проста обробка	Середня–масова	Сталь, мідь
Середня складність (ребристі, фланцеві, комбіновані поверхні)	Кування, лиття в кокіль, пресування, комбіноване виготовлення (адитивне + мех. обробка)	Вимагає точного базування та термообробки	Дрібносерійна–серійна	Сталь, алюмінієві сплави
Складна форма (внутрішні порожнини, канали, виступи)	Лиття (піщане, під тиском), адитивне виготовлення (SLS, LPBF), ливарне моделювання	Висока вартість оснащення для лиття	Дрібносерійна	Алюміній, чавун, титан
Порожниста структура або решітчаста топологія	Адитивне виготовлення (SLM, EBM), лиття з виплавлюваних моделей	Неможливе кування; потребує контролю пористості	Одинична–дрібносерійна	Титан, алюміній
Тонкостінні оболонки	Пресування, штампування, лиття під тиском, формування листів	Обмеження по товщині (<3 мм), вимоги до жорсткості	Серійна–масова	Сталь, алюміній, полімери
Анізотропна або комбінована структура	Пресування, намотування, інфузія смол	Анізотропія властивостей, складне базування	Одинична–дрібносерійна	Композити
Високоточні поверхні (опорні, посадкові)	Лиття + мех. обробка, кування + токарна обробка	Вимагає припусків під механічну обробку	Серійна–масова	Сталь, чавун
Нетипова / біонічна топологія	Адитивне виготовлення (LPBF, binderjetting)	Висока собівартість, довгий цикл виготовлення	Одинична	Титан, полімери, порошкові матеріали

Отримані узагальнення свідчать про те, що матеріальні та топологічні обмеження у більшості випадків істотно звужують множину допустимих способів отримання заготовок, залишаючи переважно класичні технологічні процеси, такі як лиття, кування або обробка з

прокату. Водночас у реальних виробничих умовах дедалі ширше застосовуються нетипові та комбіновані технологічні рішення, які дозволяють частково обійти жорсткі геометричні або матеріальні обмеження. Саме тому наступним етапом логічного відбору є аналіз нетипових та комбінованих технологій отримання заготовок, їхніх можливостей та обмежень.

Окрім класичних технологій отримання заготовок (лиття, кування, прокат), у сучасному машинобудівному виробництві дедалі ширше застосовуються нетипові та комбіновані технологічні рішення, які виникли як відповідь на зростання складності геометрії деталей, потребу у скороченні виробничих циклів та зменшенні витрат на технологічну підготовку виробництва [6, 7].

До таких технологій належать:

- лазерна та плазмова різка листового й профільного прокату з подальшим зварюванням;
- комбіновані ливарно-зварні заготовки;
- технології інтенсивної пластичної деформації (ротаційне кування, розкочування, рівноканальне пресування);
- адитивне виробництво (3D-друк металами).

Нетипові технології дозволяють:

- суттєво спростити оснастку або повністю від неї відмовитися;
- зменшити коефіцієнт використання матеріалу;
- отримувати складні внутрішні порожнини та піднутрення без роз'ємних форм;
- скоротити тривалість технологічного циклу.

Водночас ці технології мають суттєві обмеження, які не дозволяють розглядати їх як універсальну заміну класичних методів:

- формування високого рівня залишкових напружень;
- анізотропія механічних властивостей;
- підвищена чутливість до режимів формоутворення;
- нестабільність геометричної точності при серійному виробництві;
- обмежена продуктивність порівняно з литтям або штампуванням.

Технології 3D-друку (адитивного виробництва) поступово інтегруються в машинобудівну практику, особливо там, де традиційні методи не дозволяють реалізувати складні геометрії. Вони особливо ефективні для виготовлення експериментальних деталей, внутрішньо-порожнистих конструкцій та обмежених серій функціональних виробів, хоча масове виробництво поки не є їхньою сильною стороною.

Таким чином, нетипові та комбіновані технології відіграють роль гнучкого інструменту локальної оптимізації, однак у більшості випадків доповнюють класичні процеси, а не витісняють їх.

Окрім фізико-механічної та технологічної придатності матеріалу, істотний вплив на вибір способу отримання заготовки має економічна доцільність його застосування, яка визначається вартістю, доступністю промислових партій та стабільністю постачання. Навіть конструктивно й технологічно оптимальний матеріал може бути фактично непридатним для серійного виробництва через високу ціну, дефіцит або критичну імпортозалежність.

Для формалізації цього етапу в алгоритмі застосовується рейтингове оцінювання матеріалів, яке ґрунтується не на абсолютних цінах, а на відносних балах вартості, доступності та ризику постачання. Такий підхід дозволяє коректно порівнювати альтернативи навіть за нестабільної ринкової кон'юнктури.

Дані наведені у таблицях 4 і 6 були сформовані за допомогою методу аналітичних ієрархій [13], який використовувався також у працях [15, 16] для порівняльної оцінки технологічних альтернатив.

Таблиця 4

Рейтингова оцінка машинобудівних матеріалів в Україні [8]

Клас матеріалу	Вартість, C_i (відн.)	Технологічна придатність, T_i	Складність обробки, O_i	Доступність промислових партій, D_i	Імпортозалежність, I_i	Інтегральний рейтинг $R_i = \sum (w_i \cdot X_i)$
Сталь	1,00	0,90	0,80	0,95	0,10	0,89
Чавун	0,85	0,80	0,60	0,90	0,20	0,80
Алюмінієві сплави	1,20	0,85	0,70	0,70	0,60	0,78
Титанові сплави	3,00	0,60	0,40	0,40	0,90	0,61
Полімери (ABS, PA6)	0,50	0,70	0,50	0,95	0,30	0,77
Композити (CFRP, GFRP)	2,00	0,55	0,30	0,50	0,80	0,58
Порошкові матеріали / кераміка	1,50	0,65	0,50	0,60	0,70	0,66

Таблиця 4 формує матеріальний економічний фільтр алгоритму. Матеріали з низьким рейтинговим балом автоматично можуть вважатися недоцільними для серійного виробництва незалежно від їхніх механічних переваг.

Незважаючи на те, що рейтингова оцінка матеріалів дозволяє відсіяти економічно та логістично недоцільні матеріальні альтернативи, навіть після цього технологічно обґрунтовані рішення можуть залишатися нереалізованими у конкретних виробничих умовах. Саме тому наступним і завершальним етапом логічного відбору є інтегральний аналіз виробничих, економічних та логістичних обмежень.

На цьому етапі алгоритму здійснюється остаточна перевірка реальної реалізованості допустимих технологій у межах конкретного підприємства. Цей етап є критичним, оскільки саме тут відсіюються варіанти, які є допустимими з точки зору фізики, геометрії та економіки матеріалу, але неможливі або ризиковані з виробничо-організаційної точки зору.

Для цього всі три групи чинників – виробничі, економічні та логістичні – об'єднуються в єдину інтегральну систему оцінювання, наведену в таблиці 5.

Таблиця 5

Інтегральні виробничо-економічні та логістичні обмеження, які впливають на обрання способу отримання заготовок

Група чинників	Конкретний чинник	Вплив на вибір технології
Виробничі	Наявність основного обладнання	Обмежує фізичну можливість реалізації процесу
	Стан верстатного парку	Визначає досяжну точність і стабільність
	Оснастка	Впливає на доцільність серійного запуску
	Рівень автоматизації	Формує продуктивність
	Кваліфікація персоналу	Обмежує застосування складних процесів
Економічні	Капітальні витрати	Обмежують доцільність запуску
	Енергоємність	Формує експлуатаційні витрати
	Собівартість заготовки	Є базовим критерієм оптимізації
	Рівень браку	Знижує ефективність
	Термін окупності	Обмежує впровадження дорогих рішень
Логістичні	Доступність промислових партій	Визначає ритмічність виробництва

Група чинників	Конкретний чинник	Вплив на вибір технології
	Імпортозалежність	Формує ризики зупинки
	Транспортні витрати	Впливають на собівартість
	Тривалість постачання	Визначає стабільність
	Надійність постачальників	Впливає на безперервність

Лише ті технологічні альтернативи, які проходять усі ці рівні відбору, допускаються до етапу **багатокритеріальної кількісної оцінки**.

Після формування множини допустимих технологічних альтернатив на основі попереднього відбору виконується їх багатокритеріальне кількісне ранжування, метою якого є вибір оптимального варіанту за сукупністю техніко-економічних показників.

На відміну від логічного відбору, де технології лише допускаються або відсіюються, на цьому етапі здійснюється порівняльна оптимізація допустимих рішень. Для цього застосовується метод зваженої адитивної згортки критеріїв, який широко використовується в інженерних задачах вибору [1 – 3, 6].

Інтегральний показник ефективності технологічної альтернативи визначається за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^m w_i S_i, \quad (2)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт відповідного критерію; S_i – нормалізоване значення i -го критерію; m – кількість критеріїв.

У ряді сучасних досліджень обґрунтовується ефективність поєднання методів багатоаспектного аналізу з чисельними симуляціями.

Так, наприклад, у роботі Dongare et al. (2025) показано, що комбіноване використання MCDM, методу Тагучі та FEM дозволяє значно точніше підбирати оптимальні технологічні параметри як для матеріалів, так і для конструкцій. Такий підхід можна адаптувати і до вибору способу отримання заготовки[16].

Система критеріїв формується з урахуванням конструктивного призначення деталі, умов навантаження, вимог до точності та економічних обмежень. До базового універсального набору критеріїв доцільно включати:

- S_1 – міцність заготовки (відношення допустимих напружень до розрахункових);
- S_2 – жорсткість (максимальні допустимі переміщення та деформації);
- S_3 – технологічність (стабільність формоутворення, чутливість до дефектів);
- S_4 – собівартість заготовки;
- S_5 – стабільність якості при серійному виробництві;
- S_6 – коефіцієнт використання матеріалу;
- S_7 – енергоємність технологічного процесу.

Склад критеріїв може змінюватися залежно від типу деталі та поставлених задач, однак принцип агрегування нормалізованих показників із ваговими коефіцієнтами залишається універсальним.

Оскільки окремі критерії мають різну фізичну розмірність, перед об'єднанням їх приводять до безрозмірного інтервалу $[0 \dots 1]$:

- для критеріїв типу «чим більше – тим краще»:

$$S_i = \frac{X_i}{X_i^{\max}}, \quad (3)$$

- для критеріїв типу «чим менше – тим краще»:

$$S_i = \frac{X_i^{\min}}{X_i}, \quad (4)$$

Це дозволяє забезпечити коректність подальшого агрегування.

Вагові коефіцієнти w_i визначаються експертним шляхом, методом аналітичних ієрархій або парних порівнянь. У загальному випадку вони задовольняють умові:

$$\sum w_i = 1. \quad (5)$$

Орієнтовний розподіл вагових критеріїв для деталей різних типів показаний в таблиці 6.

Таблиця 6

Орієнтовний перелік вагових коефіцієнтів, які відповідають критеріям S_i

Тип деталі	W1 (міцність)	W2 (жорсткість)	W3(технологічність)	W4 (собівартість)	W5 (стабільність якості)	W6 (використання матеріалу)	W7 (енергоємність)
Корпусні силові деталі (корпуси підшипників, редукторів, станин тощо)	0,22	0,20	0,12	0,16	0,12	0,10	0,08
Вали та осі (трансмісійні, опорні, приводні)	0,24	0,18	0,10	0,16	0,10	0,12	0,10
Зубчасті колеса та елементи передач	0,26	0,18	0,12	0,14	0,14	0,10	0,06
Тонкостінні оболонки та кожухи (кожухи, резервуари, корпуси з тонкими стінками)	0,18	0,24	0,12	0,16	0,08	0,12	0,10
Прецизійні приладові деталі (корпуси та елементи приладів, датчиків, вимірювальних систем)	0,18	0,20	0,16	0,12	0,18	0,08	0,08

Використовуючи нормалізовані значення критеріїв і їх вагу, розраховується інтегральний показник ефективності для кожного з варіантів. Цей коефіцієнт дозволяє не лише порівняти можливі підходи між собою, але й обґрунтовано обрати один або кілька варіантів для подальшої оцінки методом кінцевих елементів (FEM). В свою чергу FEM-аналіз застосовується для [9, 10]:

- перевірки умов міцності за еквівалентними напруженнями;
- оцінки жорсткості за максимальними переміщеннями;
- виявлення зон концентрації напружень;
- аналізу впливу топологічних елементів на напружено-деформований стан;
- перевірки допустимості спрощення конструкції.

Подібна інтеграція FEM і MCDM описана у сучасних публікаціях як ефективний інструмент підтримки рішень у машинобудуванні. Sherif & Saloni (2025) у систематичному огляді підкреслюють важливість гібридних моделей прийняття рішень для процесного вибору, а Salmi et al. (2024) демонструють практичне застосування комбінованого підходу при порівнянні адитивних і традиційних процесів [14, 15].

Перевірка здійснюється за критеріями працездатності, які можуть відрізнятися та суттєво залежати від службового призначення деталі та конкретних умов. Наприклад, опорні та посадочні поверхні визначаються умовами міцності, контактної витривалості та жорсткості, тоді як для ущільнювальних поверхонь визначальними є мікрогеометрія та відсутність локальних деформацій. Для направляючих поверхонь першочерговими є критерії зносостійкості та стабільності зазорів. Орієнтовні критерії працездатності для основних

типів поверхонь наведено в таблиці 7. Такий підхід дозволяє коректно формувати граничні умови для FEM-аналізу та обґрунтовано задавати показники якості поверхонь на етапі проєктування.

Таблиця 7

Орієнтовні критерії працездатності для основних типів поверхонь придатні для FEM-аналізу

Тип поверхні за призначенням	Основна функція	FEM-контрольовані показники працездатності
Опорні (посадочні під підшипники, втулки)	Передача радіальних / осьових навантажень, базування	- Розподіл еквівалентних напружень у зоні посадки - Максимальні дотичні напруження в перехідних радіусах - Радіальні та осьові переміщення посадочної поверхні - Локальні концентрації напружень у зоні галтелей і уступів - Розрахунковий запас міцності в зоні посадки
Направляючі поверхні	Забезпечення прямолінійності/паралельності руху	- Прогини та перекося напрямляючих під навантаженням - Розподіл нормальних напружень уздовж контактної довжини - Нерівномірність контактного тиску по довжині направляючої - Локальні концентрації напружень у місцях кріплення та опор
Ущільнювальні поверхні (кільцеві пояски, фаски)	Герметизація, обмеження витоків	- Радіальні/осьові переміщення ущільнювальної поверхні - Нерівномірність контактного тиску по ущільнювальному контуру - Локальні напруження в місцях переходів (канавки, фаски) - Зона можливого розкриття зазору (втрата контакту)
Силкові поверхні (фланці, опорні площадки, ребра)	Сприйняття зовнішніх сил і моментів	- Поле еквівалентних напружень у фланці/ребрах - Максимальні нормальні та дотичні напруження в небезпечних перерізах - Прогини фланця, кутові перекося опорних площадок - Запас міцності в перетинах з отворами та в місцях різкої зміни перерізу
Контактні пари тертя (поверхні зчеплення, шпонкові/шліцьові зони)	Передача крутного моменту/зусилля через контакт	- Контактний тиск у зоні спраження - Розподіл дотичних напружень у контакті - Локальні концентрації напружень біля шпонкових/шліцьових пазів - Запас міцності у коренях зубців / пазів
Посадочні під пресові з'єднання	Забезпечення натягу, нерухомість з'єднання	- Розподіл контактного тиску по довжині посадки - Радіальні напруження в маточині й у ступиці - Максимальні еквівалентні напруження від натягу - Радіальні деформації, що впливають на натяг
Технологічні базові поверхні (установчі площини, бази)	Базування при обробці та складанні	- Прогини і перекося базової площини під заданим навантаженням - Розподіл напружень у зоні опор і кріплення - Зміщення опорних точок відносно номінальної площини - Чутливість базової поверхні до локальних зосереджених навантажень

У разі невиконання будь-якої з умов працездатності виконується ітераційне коригування одного або кількох геометричних параметрів деталі або матеріалу заготовки. Після кожного коригування здійснюється повторний FEM-аналіз, і цикл повторюється до досягнення одночасного виконання всіх умов працездатності поверхні.

Таким чином, FEM-аналіз у запропонованій методиці виступає не як допоміжна перевірка, а як активний інструмент формування остаточного технологічного рішення, що:

- безпосередньо впливає на вибір матеріалу;
- може змінювати пріоритети технологічних альтернатив;
- ініціює корекцію конструкції деталі.

Висновки

1. У роботі розроблено формалізований алгоритм вибору технології отримання заготовок деталей, який поєднує логічний відбір допустимих технологій, багатокритеріальну кількісну оцінку альтернатив та FEM-верифікацію міцності й жорсткості з ітераційним зворотним

зв'язком.

2. Показано, що матеріальні, топологічні та серійні обмеження формують первинну множину допустимих технологій, яка суттєво звужується після врахування економічних, виробничих і логістичних факторів.

3. Запропоновано багатокритеріальну модель оцінювання технологічних альтернатив з використанням зваженої адитивної згортки критеріїв, що дозволяє формально ранжувати варіанти за сукупністю технічних і економічних показників.

4. Запропонована модель відповідає сучасним тенденціям інтеграції методів MCDM та FEM у виборі технологій, що узгоджується з результатами останніх досліджень Sherif & Salonitis (2025) і Salmi et al. (2024) [14, 15].

5. Обґрунтовано доцільність застосування FEM-аналізу як активного інструмента верифікації та корекції технологічних рішень з урахуванням критеріїв працездатності функціональних поверхонь.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Perzyk M., Meftah O. K. Selection of manufacturing process in mechanical design. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Vol. 76, № 1–3. P. 198–202. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00348-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00348-8).
2. Ghaleb M. A., Siddiqui A. H., Khan Z. A. Assessment and comparison of various MCDM approaches in the selection of manufacturing process. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Article ID 4039253. 17 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/4039253>.
3. Formentini G., Boix Rodríguez N., Favi C. Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: A systematic literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 120. P. 4307–4334. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08837-6>.
4. Ravi B., Srinivasan M. Computer-aided design and analysis of feeding systems for castings. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1996. Vol. 12. P. 193–206. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01179431>.
5. Er M. J., Dias R. Casting process selection: a rule-based expert system approach. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 103, №1. P. 68–76. URL: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00443-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00443-0).
6. Proposal and evaluation of a selection procedure for cast parts / E. C. Dos Santos et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 93. P. 2297–2309. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0537-2>.
7. Additive vs conventional manufacturing of metal components: Selection of manufacturing process using the AHP method / D. Schuhmann et al. *Processes*. 2022. Vol. 10, №8. Article 1617. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10081617>.
8. Mançanares C. G., Foggia J. A., Seliger G. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 80. P. 1007–1014. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7092-4>.
9. Finite element analysis of cast components / D. Schaeffer et al. *International Journal of Cast Metals Research*. 2013. Vol. 26, №4. P. 219–224. URL: <https://doi.org/10.1179/1743133613Y.0000000061>.
10. Shah U. P., Shah J. R. Finite element analysis of bearing housing using ANSYS. *International Journal for Scientific Research and Development*. 2014. Vol. 2, №3. P. 1614–1617.
11. Tang Z., Sun J. The contact analysis for deep groove ball bearing based on ANSYS. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 23. P. 423–428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.249>.
12. ISO 286-1:2010. Geometrical products specifications (GPS) – ISO system of limits and fits – Part 1: Bases of tolerances, deviations and fits. Geneva: ISO, 2010. 46 p.
13. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, №1. P. 83–98. URL: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.
14. Sherif Z., Salonitis K. A systematic review of decision tools for process selection and performance improvement in manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025. Vol. 141. P. 1113–1141. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-16806-y>.
15. Salmi A., Vecchi G., Atzeni E. Hybrid Multi-Criteria Decision Making for Additive or Conventional Process Selection in the Preliminary Design Phase. *Designs*. 2024. Vol. 8 (6). P. 110. URL: <https://www.mdpi.com/2411-9660/8/6/110>.
16. Integrating MCDM and Taguchi Method with Finite Element Analysis for Material Selection in Rigid Flange Couplings / M. M. Dongare et al. *Cureus Journal of Engineering*, 2025. URL: <https://www.cureusjournals.com/articles/3722-integrating-multi-criteria-decision-making-and-the-taguchi-method-for-high-performance-material-selection-in-rigid-flange-coupling-systems.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2025.

Стаття пройшла рецензування 26.12.2025.

Савуляк Віктор Валерійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: vvsav81@gmail.com.

Білосточний Володимир Олександрович – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Вінницький національний технічний університет.