

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ВАКУУМНОГО ЗАХВАТУ
МАНІПУЛЯТОРА РОБОТА ПРИ ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ
СКЛАДАННЯ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Василь Галамай
(Прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
«28» лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу студенту

ГАЛАМАЙ Василь Петрович

1. Тема роботи: «Дослідження параметрів роботи вакуумного захвату маніпулятора робота при технологічному процесі складання»

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., професор
Затверджена наказом по університету №140/К-с від 28.02.2025

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 1.12.2025 року

3. Вихідні дані до робіт: довідкова література, каталоги, методики використання технологій зварювання, вимоги до зварних з'єднань, інструкції з охорони праці.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Огляд інформаційних джерел

4.2. Основний розділ досліджень

4.3. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.4. Визначення ефективності використання робіт

Висновки і пропозиції

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	Власовець В.М., д.т.н., завідувач кафедри машинобудування			
5	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Вступ	28.02.25-25.04.25	Виконано
2	Огляд інформаційних джерел	28.04.25-27.06.25	Виконано
3	Основний розділ досліджень	30.06.25-29.08.25	Виконано
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	01.09.25-26.09.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	03.11.24-14.11.25	Виконано
6	Оформлення графічної частини	17.11.25-28.11.25	Виконано

Студент _____ Василь ГАЛАМАЙ
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.791.019:620.179:621.867

Дослідження параметрів роботи вакуумного захвату маніпулятора робота при технологічному процесі складання. Галамай Василь Петрович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

80 с. текст. част., 15 рис., 98 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано системний огляд наукових джерел та нормативних документів щодо пневматичних захватів універсальних роботів, зосереджений на вакуумних присосках для складальних і палетайзингових операцій. Проаналізовано класифікацію пневматичних захватів, властивості матеріалів присосок, вплив геометрії та шорсткості кромки на герметичність, утримувальну силу та допустимі прискорення маніпулятора, а також деградацію експлуатаційних характеристик у реальних виробничих умовах.

Розвинуто підхід до інженерного обґрунтування параметрів вакуумних присосок з урахуванням технології їх виготовлення, шорсткості та дефектності. Побудовано розрахункові моделі утримувальної здатності й часу формування вакууму, а також застосовано методи машинного навчання для регресійного моделювання шорсткості кромки та виділення технологічних режимів із мінімальною дефектністю. На цій основі сформовано рекомендації щодо вибору матеріалу, геометрії та технологічних параметрів виробництва присосок.

Розроблено комплекс організаційно-технічних заходів з охорони праці та безпеки роботизованих складальних осередків з вакуумними захватами. Проаналізовано вимоги міжнародних стандартів машинобезпеки та робототехніки, оцінено ризики падіння вантажу і надзвичайних ситуацій, запропоновано підходи до моніторингу стану присосок, керованого обслуговування та забезпечення безпечної роботи універсальних роботів у складальних процесах.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Типологія та фізичні принципи пневматичних і споріднених захватів: стан досліджень і обмеження	11
1.2 Особливості конструкції та використання вакуумних присосок у складі захватних пристроїв	19
1.3. Основні дефекти вакуумних присосок при виготовленні та експлуатації	26
2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
2.1 Основні технології виробництва вакуумних присосок для вакуумних захватів роботів	34
2.2. Вплив шорсткості виробу та шорсткості присоски на роботу вакуумних присосок для вакуумних захватів роботів	42
2.3. Прогнозування шорсткості робочої поверхні вакуумних присосок в залежності від передумов процесу виготовлення	49
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	56
3.1. Охорона праці при використанні універсальних роботів на складальних операціях з використанням вакуумних присосок	56
3.2 Безпека у надзвичайних умовах при використанні універсальних роботів на складальних операціях з використанням вакуумних присосок	62
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування та переробної промисловості супроводжується переходом до гнучких роботизованих складальних ліній, які мають забезпечувати стабільну якість виробів за умов високої номенклатурної мінливості, жорстких обмежень за часом циклу та зростання вимог до виробничої безпеки. Універсальні промислові роботи дедалі частіше виконують не лише операції переміщення та позиціювання, а й функції точного базування, подачі заготовок до кондукторів, палетайзингу та міжопераційного транспортування плоских і листових деталей. У цьому контексті захватний пристрій виступає ключовим елементом, що визначає реальну продуктивність, надійність і безпечність роботизованого осередку, оскільки саме він формує силову взаємодію з виробом і задає обмеження на кінематику маніпулятора.

Для складальних операцій особливо поширеними є пневматичні захвати, зокрема вакуумні системи на основі присосок, які поєднують високу швидкодію, конструктивну простоту та добру інтегрованість з промисловими пневмосистемами і системами керування. Вакуумні присоски забезпечують технологічну гнучкість при маніпулюванні листовими заготовками, деталями з великою площею контакту, упаковками та виробами складної форми. Водночас їх ефективність істотно залежить від матеріалу, геометрії та шорсткості робочої кромки присоски, стану поверхні виробу, режимів роботи пневмосистеми, а також деградації експлуатаційних властивостей у часі. На практиці саме параметри пневматичного захвату визначають не лише силу утримання і допустимі прискорення, а й структуру допоміжного часу циклу через інерційність пневмосистеми, тривалість формування вакууму та алгоритми підтвердження захоплення.

У контексті роботизованих складальних операцій особливого значення набуває інтеграція знань про технологію виготовлення присосок, властивості еластомерних матеріалів і механізми формування дефектів в єдину систему інженерного обґрунтування вибору захвату. Вибір матеріалу повинен враховувати робочу температуру, наявність зварювальних аерозолів, мастил і пилу, шорсткість

та геометрію листів, допустимі прискорення маніпулятора і вартість простоїв. Вибір технології виготовлення визначає розкид шорсткості та дефектності кромки у серійному виробництві і стабільність характеристик у часі. Для технологій лиття рідкої силіконової гуми пріоритетними є контроль зазору форми і видалення облоя, для поліуретанових присосок вирішальними стають режими дегазації та отвердіння, а для термопластичних еластомерів критичними залишаються стан поверхні прес-форми і баланс температури форми та розплаву. Сукупність цих факторів формує технічну основу для обґрунтованого підбору вакуумних присосок та параметрів їх виробництва, спрямованого на забезпечення стабільної продуктивності і безвідмовності роботизованих захватів.

Складність задачі посилюється необхідністю врахування деградації експлуатаційних властивостей присосок. У реальних виробничих умовах спостерігаються зношування ущільнювальної кромки, мікротріщини і проколи, залишкова деформація, зміна еластичності та старіння матеріалу, що безпосередньо впливає на герметичність прилягання, швидкість формування вакууму і утримувальну здатність. Це змушує знижувати прискорення робота, збільшувати витримки у циклі та, відповідно, зменшувати продуктивність навіть без явних аварійних відмов. Відмінності у впливі різних дефектів на продуктивність захвату визначають пріоритети контролю якості, які не можуть бути встановлені виключно на основі інтуїтивного або емпіричного підходу.

Важливою складовою сучасного підходу до обґрунтування параметрів пневматичних захватів є застосування методів машинного навчання для аналізу та оптимізації технологічних процесів виробництва вакуумних присосок. Використання регресійних моделей і методів інтелектуального аналізу даних дозволяє перейти від суто емпіричного підбору режимів до формалізованої процедури, у якій оптимальні значення температури, часу витримки, швидкості охолодження та інших параметрів визначаються на основі математичної моделі шорсткості кромки і пов'язаних з нею показників дефектності. Такий підхід створює підґрунтя для проєктування технологічних режимів виробництва присосок

із гарантованою якістю поверхні, що прямо впливає на герметичність, утримувальну здатність і продуктивність роботи вакуумних захватів універсального робота на складальних операціях.

Охорона праці при використанні універсальних роботів із вакуумними присосками базується на інтегрованому підході, який поєднує стандартизоване оцінювання ризиків, технічну реалізацію функцій функціональної безпеки, високу якість і експлуатаційну стійкість вакуумних присосок, а також організаційні заходи. Міжнародні стандарти з машинобезпеки та робототехніки, зокрема ISO 12100, ISO 10218, ISO/TS 15066, ISO 4414 і ISO 13849, задають методологічну рамку для проєктування безпечних роботизованих осередків і побудови архітектури систем керування, здатних забезпечити передбачуваний перехід у безпечний стан у надзвичайних ситуаціях. У цих умовах якість вакуумних присосок та їх здатність зберігати утримувальну здатність протягом усього ресурсу стають визначальним фактором реального рівня ризику падіння вантажу і фактичної продуктивності палетайзингу.

Безпека у надзвичайних умовах при використанні універсальних роботів на складальних операціях з вакуумними присосками є функцією цілісного поєднання конструктивних, технологічних, системних та організаційних рішень. Вона спирається на вимоги міжнародних стандартів, враховує фізичні закономірності роботи вакуумних систем, деградацію присосок і вплив шорсткості, а також пов'язує продуктивність, якість і експлуатаційну стійкість в єдину систему управління ризиками. Саме такий підхід дозволяє перейти від реактивного усунення відмов до керованого управління ресурсом захватів та параметрами їх роботи, що є ключовою умовою надійної і ефективної експлуатації універсальних роботів у складальних процесах.

У цьому контексті дослідження, спрямовані на обґрунтування параметрів пневматичних захватів універсального робота на складальних операціях з урахуванням матеріалу та технології виготовлення вакуумних присосок, їх шорсткості і дефектності, режимів роботи пневмосистеми, а також вимог безпеки у

нормальних та надзвичайних умовах, є актуальними як з точки зору підвищення технічного рівня виробництва, так і в контексті забезпечення промислової безпеки та стійкості роботизованих систем.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні параметрів пневматичних захватів універсального робота на складальних операціях з використанням вакуумних присосок з урахуванням впливу матеріалу, технології виготовлення, шорсткості та деградації експлуатаційних властивостей на утримувальну здатність, продуктивність циклу та безпеку функціонування роботизованих осередків.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

1. виконати системний аналіз конструкцій пневматичних захватів і типів вакуумних присосок, їх придатності до маніпулювання плоскими та листовими деталями в умовах роботизованих складальних операцій;
2. дослідити вплив матеріалу та технологій виготовлення вакуумних присосок на шорсткість, дефектність кромки та стабільність герметичності в процесі експлуатації;
3. застосувати методи машинного навчання для формалізованого вибору технологічних режимів виробництва присосок за критеріями шорсткості;
4. розробити рекомендації щодо заходів забезпечення безпеки у надзвичайних умовах відповідно до вимог міжнародних стандартів.

Об'єктом дослідження є роботизовані складальні осередки з універсальними промисловими роботами, оснащеними пневматичними захватами з вакуумними присосками, що виконують операції захоплення, транспортування, орієнтації, позиціонування та палетайзингу плоских і листових деталей.

Предметом дослідження є закономірності впливу параметрів пневмосистеми та захватних елементів, зокрема геометрії, матеріалу, шорсткості і дефектності вакуумних присосок, а також параметрів їх виготовлення та деградації на утримувальну здатність, часові характеристики циклу, надійність палетайзингу і безпеку функціонування роботизованого осередку в нормальних та надзвичайних режимах.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному поєднанні моделей розрахунку утримувальної сили і часових характеристик вакуумування з аналізом технологій виготовлення вакуумних присосок, механізмів їх деградації та застосуванням методів машинного навчання для виділення фізично інтерпретованих режимів виробництва, що забезпечують мінімальну дефектність і стабільну експлуатаційну стійкість. Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні обґрунтованих рекомендацій щодо вибору типу пневматичного захвату і параметрів вакуумних присосок для різних умов складальних операцій, а також у розробленні підходів до регламентування контролю стану присосок і заходів підвищення безпеки та продуктивності роботизованих систем.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Типологія та фізичні принципи пневматичних і споріднених захватів: стан досліджень і обмеження

У сучасних роботизованих складальних комірках захватний пристрій перестав бути другорядним «кінцевим ефектором» і фактично став технологічним вузлом, який задає межі швидкодії, точності базування та допустимих динамічних режимів маніпулятора. У науковій і прикладній літературі це проявляється зміщенням фокуса від описової класифікації до причинно-наслідкових зв'язків «принцип створення утримувальної сили – керованість контакту – часові затримки пневмосистеми – стабільність циклу» [1–4]. Дослідники виділяють групи захватів за фізичним механізмом утримання та взаємодією з об'єктом: вакуумні (VGD, vacuum grippers device), струменеві (JGD, jet grippers device), комбіновані (CPGD), а також електроадгезійні та «м'які» пристрої як альтернативні класи, що зростають у нішах делікатних виробів або безконтактного маніпулювання.

Критично важливо, що більшість інженерних джерел, які описують VGD, трактують вакуумний захват як квазістатичну задачу « $\Delta p \cdot A$ », тоді як для реального складання визначальними стають динамічні збурення, а також часовий профіль формування вакууму, який включає інерційність ежектора або насоса, об'єм магістралей, витоки та алгоритми підтвердження захоплення [5–8]. Відповідно, порівняння типів VGD у роботах різних авторів часто страждає від методологічної неоднорідності: у частині публікацій продуктивність оцінюють за паспортною витратою вакуумного генератора, у частині за часом «присмоктування» при заданому об'ємі, а у частині за інтегральним OEE-ефектом через відмови та повторні захоплення. Така різноманітність метрик ускладнює пряме перенесення результатів у практику проектування універсального робота, де час циклу

визначається сумою мікрооперацій, а ризик «одного зриву» еквівалентний хвилинам простою та повторної синхронізації оснастки.

Струменеві захвати (JGD) у літературі позиціонуються як рішення для безконтактного маніпулювання тонкими, крихкими або забрудненими поверхнями. У їх основі лежить створення підйомної сили через зону зниженого тиску, сформовану високошвидкісним повітряним струменем (Бернуллі-подібні або коандівські конфігурації), що дозволяє зменшити ризик поверхневих дефектів та частково нівелювати вимоги до герметичності контакту [9–12]. Водночас критичний аналіз показує, що значна частина досліджень JGD виконується на лабораторних зразках із ідеалізованими умовами подачі повітря, тоді як у промисловому циклі домінує компроміс між енерговитратами, акустичним навантаженням, чутливістю до турбулентних збурень та стабільністю зазору. Через це JGD часто демонструють сильну залежність від геометрії об'єкта та його прогину, що знижує універсальність у складальних операціях, де номенклатура змінюється, а жорсткість листа або панелі не є сталою.



Рисунок 1.1 Захват робота пневматичний

Комбіновані захвати (CPGD) у публікаціях описують як спробу інженерно «защити» резервування: поєднати вакуумні присоски з механічним упором або пневмопритиском, або додати струменевий режим для підхоплення та стабілізації позиції перед герметизацією. У документі прямо вказано потребу враховувати специфіку такого комбінування та його вплив на виробничі цикли, включно з енергетичною ефективністю та надійністю. Критичною прогалиною тут залишається брак узгоджених моделей, які б одночасно враховували: часову діаграму пневмоподій, динаміку маніпулятора, «вікна» стабілізації тисків, сенсорне підтвердження та ймовірність відмов залежно від стану контактних елементів. Унаслідок цього CPGD часто описують якісно, а кількісно оптимізують лише окремі підсистеми (наприклад, вибір ежектора або геометрії присоски), що не гарантує глобального оптимуму за тактом і безвідмовністю.

Окремо варто підкреслити, що сучасні огляди дедалі частіше трактують захват як підсистему «robotics + fluid power + sensing», де конструкція визначається не лише механікою, а й доступними методами вимірювання вакууму, витрати та стану контакту. У файлі наголошено на застосуванні аналітичних моделей і CFD для опису вакуумних та струменевих ефекторів, що відображає загальну тенденцію: перехід від «каталогового підбору» до моделювання і валідації. Проблема полягає в тому, що CFD-моделі часто потребують точних граничних умов (шорсткість, мікропротоки, зазори, компресибельність), які у промислових умовах швидко дрейфують через знос і забруднення. Тому чисто числове моделювання без інструментів ідентифікації параметрів у процесі експлуатації має обмежену прогностичну цінність для універсального робота, який працює тисячами повторюваних циклів.

Фізичний принцип		Імпактний механічний				Пневматичний	Магнітний	
тип захвату Захоплений об'єкт		Паралельний захват	радіальний захват	кутовий захват	3-точковий захват	присосний захват	постійний магніт	електро магніт
Маса	від 0,2 до 1 кг							
	від 1 до 10 кг							
	від 10 до 50 кг							
	важче 50 кг							
Розміри	від 20 до 50 мм							
	від 50 до 300 мм							
	від 300 мм до 1 м							
	більше 1 м							
Внутрішні поверхні захвату								
Поверхня	полірована							
	шорстка							
	пориста							
	чутлива							
Круглі деталі	диск							
	короткий циліндр							
	валу, штока							
Призматичні деталі	блок частина							
	плоский/короткий							
	плоский/довгий							
Синтетичні матеріали								
Текстиль								
Фольга								
Скло								
Кераміка								
Листовий метал								

Рисунок 1.1 Типи захватів та їх призначення (темний колір – придатний, світлий - ні)

Дослідження щодо продуктивності пневматичних захватів умовно діляться на два напрями. Перший зосереджений на силових критеріях: достатності

утримувальної сили, стабільності контакту, запасах за прискореннями і моментами, а також на допустимих деформаціях об'єкта. Другий фокусується на часових характеристиках: затримках формування вакууму, наповнення/скидання камер, інерційності клапанів, фільтрів та магістралей, а також на логіці контролю стану «захоплено/не захоплено». Для складальних операцій саме другий блок часто є «прихованим» джерелом втрат продуктивності, бо навіть стабільний силовий запас не гарантує короткого такту, якщо алгоритм потребує витримок для підтвердження тиску або повторних спроб при витоках [5–8].

Вакуумні захвати (VGD) мають ключову системну особливість: їх ефективність визначається не лише геометрією присоски, а й сукупністю «герметичність кромки – витоки – ефективна подача вакуум-джерела – об'єм лінії – заданий поріг Δp ». У поданому документі прямо підкреслено, що під час проєктування вакуумного захвату потрібно враховувати силу всмоктування, параметри присоски та аспекти вакууму як системи, а не одиничного елемента. У критичному зрізі це означає: однаковий «номінальний» діаметр присоски може давати принципово різні результати в реальному циклі залежно від стану кромки, шорсткості деталі, пилу, мастил і температурних впливів. У промислових осередках з листовими деталями ці фактори посилюються тим, що листи мають великі площі, гострі кромки, схильність до пружних прогинів і «парусності», а це генерує додаткові пікові навантаження при розгонах і гальмуваннях. Відповідно, у сучасних роботах усе частіше вводять коефіцієнти зниження ефективної площі ущільнення, моделі мікропротоків та ймовірнісні оцінки відмов захоплення [6–8, 13–16].

З позицій критики методів порівняння продуктивності різних типів пневмозахватів слід відзначити, що механічні в експериментальних роботах майже завжди демонструють кращу повторюваність базування і меншу залежність від стану поверхні. Проте їхня «перевага» часто описується без урахування ризику локального пошкодження тонколистових виробів, а також без адекватного

врахування змінної жорсткості деталей при варіативній номенклатурі. Натомість вакуумні системи дають технологічну гнучкість і часто є безальтернативними для великоплощинних об'єктів, але за це «платять» підвищеною чутливістю до деградації еластомерів, що в реальному виробництві трансформується у повільне зростання допоміжного часу, збільшення кількості повторних захоплень і зниження допустимих прискорень маніпулятора.

Ключовою прогалиною в більшості робіт щодо вакуумних присосок залишається недостатньо детальне поєднання трибології та реології еластомеру з динамікою пневмосистеми. Часто знос кромки описують як «зменшення герметичності», але рідко переходять до інженерно корисних параметрів на кшталт: зростання еквівалентної провідності витoku, зміна часу досягнення порогового вакууму, статистика падіння тиску під навантаженням, вплив циклічних деформацій на *compression set* та на температуру в зоні контакту [13–18]. У результаті рекомендації з вибору матеріалу присоски часто лишаються на рівні «силікон для температури, NBR для масел, PU для зносостійкості», без кількісної оцінки, як саме ці властивості впливають на такт і відмовність у конкретному режимі руху робота.

Для струменевих захватів проблема методології порівняння ще гостріша: частина робіт оцінює лише підйомну силу або витрату повітря, не враховуючи, що у складальних операціях важливі також паразитні моменти, збурення орієнтації об'єкта, чутливість до змін зазору та взаємодія струменя з пилом або аерозолями. Через це пряме порівняння «VGD проти JGD» без єдиної метрики енергетичної ціни за одиницю гарантованої якості маніпуляції є некоректним. Рациональніше порівнювати технології за профілем ризику для конкретної операції: чи домінує ризик пошкодження поверхні, чи домінує ризик зриву вантажу, чи визначальною є точність базування, чи визначальною є швидкість та допустимі прискорення.

Дослідження, присвячені експлуатаційній деградації вакуумних присосок, переконливо показують системний характер старіння: мікротріщини, проколи, знос ущільнювальної кромки, залишкова деформація, зміна еластичності, термоокиснювальне старіння та хімічна деградація при контакті з мастилами або очищувальними агентами [13–19]. Водночас «слабким місцем» багатьох публікацій є те, що деградацію аналізують як наслідок експлуатації, але рідко простежують ланцюг до параметрів виготовлення присоски. На практиці ж саме технологія формування (пресування, інжекційне формування гум, LSR-лиття, реакційне лиття PU, лиття TPE), стан прес-форми і післяобробка визначають початкову шорсткість кромки, мікродефектність і однорідність структури, тобто початковий рівень витоків і запас ресурсу [20–26]. Тому виробничо корисні дослідження мають не лише фіксувати «відмову присоски», а й встановлювати, які параметри процесу формують типові кластери якості, що далі транслуються у профіль надійності палетайзингу. У поданому документі наявна орієнтація на такі системні підходи через обговорення моделювання та параметризації процесів, а також через акцент на ролі конструкції і режимів у забезпеченні стабільної роботи захвата.

Критичною тенденцією останніх років є перехід від «суто фізичної» оптимізації до комбінованих схем, де фізичні моделі доповнюються статистичними методами групування режимів і виявлення технологічних вікон стабільної якості. Для присосок це особливо релевантно, оскільки якість ущільнення є результатом взаємодії кількох факторів: мікрорельєфу кромки, внутрішніх дефектів, температурного стану еластомеру, ступеня зшивання, чистоти поверхні деталі та структури вакуумної лінії. Відповідно, кластеризація технологічних режимів виготовлення або параметрів експлуатації може забезпечити інтерпретовані групи, де одна група відповідає низьким дефектам і стабільному часу вакуумування, інша група відповідає режимам підвищеного ризику витоків і відмов. Недолік таких підходів полягає в тому, що без прямого зв'язку з експлуатаційними метриками (час

виходу на вакуум, частота повторних захоплень, частка зривів при пікових прискореннях, ресурс у циклах) кластеризація може залишатися «внутрішньотехнологічною» вправою і не давати інженерної користі для налаштування робота та регламентів технічного обслуговування.

Окремим блоком, який потребує критично уважного врахування у тематиці універсальних роботів, є безпека пневмосистем і захватів у нормальних та надзвичайних режимах, особливо при транспортуванні листового металу. Листові вантажі небезпечні комбінацією маси, великої площі, гострих кромek і потенційного прогину. Втрата вакууму у русі здатна швидко перейти у некероване падіння, а ризик ураження посилюється тим, що лист може змінювати аеродинамічну поведінку під час руху. Норматив ISO формує рамку, в межах якої ці ризики повинні управлятися системно: оцінювання ризиків і принципи проєктування безпечних машин (ISO 12100), вимоги до пневматичних систем і запобігання небезпечним енергіям (ISO 4414), функціональна безпека систем керування (ISO 13849-1), а також безпека промислових роботів і роботизованих систем (ISO 10218-1 та ISO 10218-2, актуальні редакції 2025 року).

Критична проблема практичної імплементації стандартів у контексті пневматичних захватів полягає у «розриві масштабу»: стандарти задають вимоги до архітектури безпеки, діагностики і переходу у безпечний стан, але не дають готових інженерних параметрів для конкретної присоски, поверхні та циклу. Тому література, яка поєднує стандартизацію з кількісними розрахунками залишкової сили утримання при аварійній втраті тиску, з вибором зворотних клапанів, резервуванням контурів, діагностикою витоків і стратегіями контрольованого гальмування маніпулятора, має найвищу прикладну цінність [27–33]. Саме в такому інтегрованому підході «якість присоски – швидкодія пневмосистеми – сенсорний контроль – функціональна безпека» і формується сучасний науково-інженерний

тренд, який найбільш адекватно відповідає задачі обґрунтування параметрів захватів універсального робота на складальних операціях.

1.2 Особливості конструкції та використання вакуумних присосок у складі захватних пристроїв

Вакуумні присоски є ключовими елементами пневматичних захватів універсальних роботів у складальних процесах, де домінують операції переміщення листових заготовок, панелей, корпусних деталей та пакувальних компонентів з відносно гладкими поверхнями. Практична цінність вакуумного захвату полягає в поєднанні простоти кінематичної інтеграції з маніпулятором, швидкодії створення розрідження та відсутності механічного затиску, який може деформувати тонкостінні або декоративні елементи. Однак стабільність утримання та повторюваність циклів безпосередньо визначаються конструкцією присоски, властивостями еластомеру та станом контактної кромки, оскільки саме зона ущільнення формує реальну площу контакту і задає витоки, що обмежують досяжний перепад тиску. У сучасних роботизованих системах вакуумні захвати розглядають не лише як «кінцевий орган», а як підсистему з вираженою динамікою деформації, енергетичними втратами та чутливістю до шорсткості й забруднення поверхонь, тому їх параметри доцільно встановлювати на основі поєднання розрахунків та експериментально підтверджених запасів стійкості [51, 56].

Конструктивно вакуумна присоска включає корпус (або основу з приєднувальною різьбою чи швидкокорознімним фітінгом), еластичну робочу частину з ущільнювальною кромкою, а в багатьох виконаннях також компенсуючі елементи, що підвищують пристосовуваність до відхилень геометрії. Для листового металу поширені плоскі присоски з тонкою кромкою, а також гофровані (сильфонні) присоски, здатні компенсувати непаралельність та коливання висоти, формуючи більш м'який контакт і зменшуючи ударні навантаження при торканні.

Важливим конструктивним вузлом є ущільнювальна кромка, яка у деформованому стані створює кільцеву зону контакту і, у поєднанні з перепадом тиску, забезпечує нормальну силу притискання. З погляду механіки контакту, реальна площа контакту є функцією шорсткості та контактного тиску, а перехід від «майже суцільного» контакту до мережі мікроканалів, різко збільшує витoki і, відповідно, час досягнення заданого вакууму [58, 57]. Це пояснює, чому для однієї й тієї самої присоски зміна стану кромки після експлуатації здатна змінити не лише міцність утримання, але й продуктивність, оскільки вакуумні захвати зазвичай лімітуються часом стабілізації розрідження та умовами безпечного прискорення маніпулятора.

Пневматична частина вакуумного захвата включає джерело вакууму (ежектор або насос), вакуумопроводи, фільтри, зворотні клапани та датчики вакууму (вакуум-реле), які формують логіку «захоплено-переноситься-відпущено». Для високопродуктивного складання перевага часто надається ежекторам, оскільки вони забезпечують швидке створення розрідження без рухомих частин і легко інтегруються в розподілену архітектуру маніпулятора, але енергетична ефективність такого підходу є низькою, а втрати при витокah зростають непропорційно при деградації ущільнення [56]. За наявності витоків система фактично працює у режимі постійного «підживлення» розрідження, що підвищує споживання стисненого повітря та нагрів потоку, а також збільшує чутливість до коливань тиску в пневмережі. У складальних лініях, де критичні як продуктивність, так і безвідмовність, конструкцію захвата доповнюють фільтрацією на вході присоски, обмеженням витрат та локальними резервуарами малого об'єму, які згладжують короточасні витoki при вібрації або мікровідриві кромки [53, 54]. У цій логіці параметри присоски і пневмосистеми повинні розглядатися узгоджено: збільшення діаметра присоски підвищує теоретичну силу утримання, але водночас збільшує керований об'єм, погіршуючи швидкодію досягнення вакууму; застосування гофрованої присоски підвищує компенсаційну

здатність, але додає деформаційну піддатливість, що впливає на динамічну стійкість при прискореннях та моментах [56, 55].

Деградація експлуатаційних властивостей вакуумних присосок є сукупністю механічних, фізико-хімічних та термомеханічних процесів, які змінюють геометрію кромки, твердість, еластичність та здатність матеріалу повторювати мікрорельєф поверхні деталі. Механічний знос кромки зазвичай пов'язаний з абразивною дією окалини, металевого пилю, шліфувальних частинок і мікрозадирів на листі; він призводить до зростання мікрошорсткості та появи локальних ризиків, що працюють як зародки тріщин. Паралельно відбувається релаксація напружень і накопичення залишкової деформації (compression set), унаслідок чого кромка гірше відновлює форму після циклів і втрачає здатність створювати достатній контактний тиск при тому самому перепаді тиску [60]. Для еластомерів суттєвими є також старіння під дією озону, ультрафіолету, мастил та охолоджувальних рідин, які викликають або додаткове зшивання і підвищення твердості, або набухання та зниження міцності, змінюючи, зокрема, коефіцієнт тертя у парі «гумовий матеріал-прокат» [60, 59]. У результаті деградації присоска стає менш «приспосовуваною» до мікронерівностей та легше формує канали витoku, що прямо пов'язано з сучасними моделями витікання через ущільнення на шорстких поверхнях [57].

Відмінність впливу експлуатаційних дефектів на продуктивність проявляється у тому, що різні дефекти змінюють різні ланки «вакуум-утримання-допустима динаміка-час циклу». Зростання шорсткості кромки та її полірування абразивом зазвичай не створюють миттєвої відмови, але збільшують витoki і час досягнення заданого вакууму; це веде до подовження фази захоплення та підвищення частоти повторних «підсмоктувань» при мікровідриві. Порізи, надриви або тріщини кромки часто мають дискретний характер: навіть один локальний дефект здатний створити домінуючий канал витoku, що різко знижує перепад тиску і спричиняє або негайні пропуски захоплення, або раптові зриви деталі під час

транспортування. Залишкова деформація та втомне «просідання» сільфонних секцій змінюють кінематику контакту: присоска гірше компенсує непаралельність, зростають ударні навантаження при торканні, а це збільшує вимоги до часу підведення і до програмних затримок стабілізації. Хімічне старіння і підвищення твердості зменшують реальну площу контакту і підсилюють чутливість до шорсткості деталі, що змушує знижувати допустимі прискорення або збільшувати кількість присосок для збереження запасу стійкості [60, 56]. Забруднення мастилом чи емульсією окремо знижує коефіцієнт тертя і переводить проблему з «утримати перепад тиску» у «утримати тангенційні навантаження без зсуву», тобто впливає на продуктивність через обмеження швидкості та прискорення руху робота.

Порівняння продуктивності нових і присосок після експлуатації доцільно виконувати не лише за середнім часом циклу, але й за частотою коротких збоїв, які в реальному такті лінії накопичуються у значні простої. Нові присоски, за умови правильно підібраної геометрії кромки та матеріалу, забезпечують короткий час досягнення цільового вакууму і високу повторюваність захоплення при допустимих прискореннях маніпулятора. Після експлуатації типово спостерігається подовження часу захоплення через витoki, зростання потреби у програмній паузі для стабілізації, а також збільшення частки повторних спроб через неповне прилягання кромки або випадкове «підсмоктування» при вібрації. В роботах з моделювання вакуумних захватів підкреслюється, що невизначеність параметрів ущільнення і передачі зусиль на межі «присоска-деталь» часто компенсується надмірними запасами і консервативними траєкторіями, що прямо знижує продуктивність, тоді як уточнення параметрів дозволяє підвищити енергоефективність та скоротити час циклу без втрати стійкості [56]. Це узгоджується з практикою експлуатації: деградація присоски фактично змушує систему перейти від оптимізованого режиму до «обережного», де робот працює повільніше, а вакуумна підсистема споживає більше повітря.

Для кількісного пояснення впливу зростання шорсткості кромки на ефективну роботу присоски розглянемо типовий складальний процес транспортування сталевго листа з робочої позиції укладання на палету. Нехай переміщується оцинкований лист розміром $800 \times 600 \times 1,0$ мм масою $m = \rho \cdot L \cdot B \cdot t$, де $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, $L = 0,8 \text{ м}$, $B = 0,6 \text{ м}$, $t = 0,001 \text{ м}$, звідки $m \approx 3,77 \text{ кг}$. Захват виконано чотирма присосками діаметром $d = 50 \text{ мм}$, сумарна геометрична площа $A_{\Sigma} = 4 \cdot (\pi \cdot (d/2)^2) \approx 0,00785 \text{ м}^2$. Для пневматичного ежектора задано цільовий перепад тиску $\Delta p = 60 \text{ кПа}$ відносно атмосфери, а система керування допускає початок руху після досягнення заданого рівня вакууму, що оцінюється за часом заповнення об'єму. Час досягнення вакууму можна наближено описати як $t_v = (V/Q_{\text{еф}}) \cdot \ln(p_1/p_2)$, де V є ефективний об'єм порожнини присосок і магістралі, $Q_{\text{еф}}$ є ефективна витрата відкачування, $p_1 \approx 101 \text{ кПа}$, p_2 є тиск, що відповідає заданому вакууму [59, 53]. У присутності витоків $Q_{\text{еф}}$ зменшується, а сама величина доступного перепаду тиску також падає, оскільки частина «потужності вакууму» витрачається на компенсацію витоків. Фізично ці витки формуються мережею мікроканалів у зоні контакту, і їх поява та зростання є наслідком зменшення реальної площі контакту при збільшенні шорсткості та зниженні контактного тиску, що добре описується сучасними контактними моделями та теоріями витікання через ущільнення [58, 57].

Щоб пов'язати шорсткість кромки з продуктивністю, введемо безрозмірний коефіцієнт ущільнення η , який відображає зниження ефективного перепаду тиску та витрати відкачування через витки: $\Delta p_{\text{еф}} = \eta \cdot \Delta p$, $Q_{\text{еф}} = Q_{\text{п}} / (1 + \beta \cdot R_a)$, де R_a є параметр шорсткості кромки, $Q_{\text{п}}$ є номінальна витрата ежектора або вакуумного каналу на даний контур, β є узагальнений коефіцієнт чутливості до шорсткості, що акумулює вплив мікрорельєфу та реальної площі контакту. Така параметризація не суперечить фізичній суті процесу, оскільки збільшення шорсткості зменшує площу

контакту і збільшує ймовірність перколяції не контактних каналів, що підсилює витоки і знижує доступний перепад тиску [57]. Нехай для нової присоски $Ra_0 = 0,8$ мкм, а після експлуатації через абразивний знос та мікротріщини $Ra_1 = 3,2$ мкм; прийmemo $\beta = 0,25$ 1/мкм, тоді $\eta_0 = 1/(1 + \beta \cdot Ra_0) \approx 0,833$, $\eta_1 = 1/(1 + \beta \cdot Ra_1) \approx 0,556$. Тоді утримувальна нормальна сила чотирьох присосок дорівнює $F_n = \Delta p \cdot A \Sigma \eta$, звідки для нової присоски $F_{n0} \approx 60\,000 \cdot 0,00785 \cdot 0,833 \approx 393$ Н, а для зношеної $F_{n1} \approx 60\,000 \cdot 0,00785 \cdot 0,556 \approx 262$ Н. Зменшення F_n впливає на стійкість захоплення двома шляхами: зменшує запас проти відриву у зонах локального згину листа та знижує допустимі тангенційні навантаження за рахунок тертя, оскільки $F_{tr} \approx \mu \cdot F_n$, де μ є коефіцієнт тертя у парі «еластомер-оцинкована сталь» і суттєво залежить від забруднення та стану поверхні [60].

Оцінімо вплив на час захоплення через вакуумний перехідний процес. Приймемо $V = 0,5$ л як ефективний об'єм порожнин чотирьох присосок з ділянкою магістралі та фітингами, а номінальну витрату $Q_p = 70$ л/хв, тобто $Q_p \approx 1,17$ л/с. Нехай сигнал «готовність» формується при $p_2 = 45$ кПа (приблизно 56 кПа розрідження відносно атмосфери). Тоді базовий час без урахування витоків $t_0 = (V/Q_p) \cdot \ln(p_1/p_2) \approx (0,5/1,17) \cdot \ln(101/45) \approx 0,346$ с. З урахуванням впливу шорсткості $t_{v0} = t_0 \cdot (1 + \beta \cdot Ra_0) \approx 0,416$ с для нової присоски і $t_{v1} = t_0 \cdot (1 + \beta \cdot Ra_1) \approx 0,624$ с для зношеної. Таким чином, лише через збільшення шорсткості кромки фаза захоплення подовжується приблизно на 0,21 с, що у високотактному складанні є суттєвим, оскільки повторюється у кожному циклі. Якщо базовий цикл палетайзингу передбачає підведення, захоплення, переміщення на 1,2 м, укладання та відвід, то збільшення часу захоплення прямо зменшує кількість циклів за годину навіть без урахування збоїв.

Додатковий канал впливу деградації на продуктивність пов'язаний з необхідністю обмежувати динаміку руху для уникнення мікровідриву кромки та «пульсацій» витоків. Для листового металу критичними є моменти при розгоні та

гальмуванні, коли лист деформується як пружна пластина і створює локальні підйомні зусилля на крайових присосках; у нових присосок межа оборотної деформації та стабільного ущільнення ширша, тоді як зношена або затверділа кромка легше переходить у режим часткового відриву, що знижує $\Delta p_{\text{реф}}$ і викликає коливання вакууму [56, 60]. Припустимо, що для нових присосок робот може працювати з максимальним прискоренням розгону $a_0 = 3,0 \text{ м/с}^2$ при максимальній швидкості переміщення $v = 2,0 \text{ м/с}$ на ділянці $1,2 \text{ м}$, тоді час переміщення за трапецієподібним законом швидкості становить приблизно $1,265 \text{ с}$. Для зношених присосок, щоб зберегти стабільність ущільнення та зменшити пікові моменти, прискорення знижують до $a_1 = 1,8 \text{ м/с}^2$, і час переміщення зростає до приблизно $1,633 \text{ с}$. Якщо у циклі є принаймні два порівнянні переміщення, сумарне збільшення лише на траєкторії становить близько $0,74 \text{ с}$, а з урахуванням подовження захоплення через вакуум додатково близько $0,21 \text{ с}$. Отже, ефективний цикл може збільшитися майже на 1 с , що при початковому такті порядку 6 с відповідає зниженню продуктивності на понад 10 відсотків. Найбільш небезпечним є те, що деградація присоски збільшує не тільки середній час, але й розкид часу циклу через випадкові мікровідриви, повторні спроби захоплення та аварійні зупинки при спрацюванні вакуум-реле, що прямо впливає на надійність палетайзингу та стабільність якості складання [53, 56].

З практичної точки зору керування деградацією повинно спиратися на контрольовані критерії стану, які відображають механізм втрати продуктивності. Для абразивного зносу доцільним є моніторинг часу досягнення заданого вакууму і швидкості його падіння при перекритому контурі, що є непрямым індикатором витоків, а також періодична візуальна оцінка кромки на наявність порізів і тріщин. Для старіння та затвердіння еластомеру інформативними є зміни твердості та еластичності, оскільки вони визначають здатність кромки «обтікати» мікрорельєф і тим самим запобігати збільшенню каналів витоку [60, 57]. Для забруднення

мастилами важливо відстежувати випадки зсуву деталі та зростання програмних обмежень прискорення, оскільки навіть при достатньому вакуумі зниження коефіцієнта тертя переводить систему у режим ковзання, що погіршує точність укладання і збільшує кількість коригувальних рухів. У проєктуванні захвату ці явища враховують вибором геометрії присоски, кількості контурів, локальними клапанами, а також структурним резервуванням, коли відмова однієї присоски не призводить до негайного падіння деталі через перерозподіл навантаження і швидке перекриття витоку [55, 56].

1.3. Основні дефекти вакуумних присосок при виготовленні та експлуатації

Вакуумні присоски у складі пневматичних захватів універсальних роботів є ключовим елементом, що забезпечує силову взаємодію із деталлю, герметичність контакту та допустимі прискорення маніпулятора у складальних операціях. Експлуатаційна надійність роботизованого осередку у кінцевому підсумку визначається не лише характеристиками вакуумного генератора, а й дефектами присоски, які формуються як на стадії виготовлення, так і в процесі тривалої роботи. Виробничі дефекти задають початковий рівень герметичності, шорсткості кромки та однорідності еластомерної структури, тоді як експлуатаційні дефекти змінюють ці параметри у часі та безпосередньо впливають на утримувальну силу, швидкість формування вакууму і частоту відмов захоплення [61–64]. Тому дослідження параметрів роботи вакуумного захвату у реальних циклах складання неможливо відокремити від аналізу механізмів деградації його експлуатаційних властивостей та ідентифікації типових дефектів.

З позицій технології виготовлення вакуумні присоски зазвичай формують методами пресування та інжекційного формування гумових сумішей, лиття рідкого силіконового каучуку (LSR), реакційного лиття поліуретанів або лиття термопластичних еластомерів [62–65]. У кожному з цих процесів поєднання

температурних режимів, тиску, якості прес-форми, системи вентиляції та видалення облоя визначає мікрорельєф робочої кромки, наявність внутрішніх порожнин, ступінь зшивання еластомеру й однорідність твердості. Недостатня дегазація, нерівномірний прогрів форми або надмірне наповнення суміші можуть призвести до утворення мікропухирців, усадочних раковин та зон зниженої щільності біля кромки, які надалі проявляються як канали витоку вакууму [63, 65, 67]. Додатковим джерелом дефектів є залишковий облой, пов'язаний із зазорами на площині рознімання прес-форми, який при некоректному видаленні формуює задирки і хвилястість на ущільнювальній кромці [66, 67]. Для вакуумної присоски це означає, що навіть за правильної номінальної геометрії діаметра та профілю гофри фактична площа герметичного контакту виявляється меншою, а мікрощілини між кромкою і деталлю створюють стійкі шляхи для витоку.

Суттєвий вплив на початкову шорсткість робочої поверхні має стан полірованих порожнин прес-форми. Дослідження впливу шорсткості форми на течію гумових та термопластичних еластомерів показують, що підвищена шорсткість стінок сприяє формуванню макро- і мікронерівностей на поверхні виробу та неоднорідному заповненню тонкостінних зон [66, 70]. Для присосок це особливо критично в області кромки, де мікрорельєф поверхні безпосередньо перетворюється на мікрорельєф ущільнення. Ситуація ускладнюється тим, що механічна або агресивна термічна післяобробка з метою видалення облоя здатна додатково збільшити шорсткість, створити мікротріщини і надрізи, які пізніше еволюціонують у експлуатаційні дефекти [67]. Як наслідок, неконтрольовані виробничі дефекти перетворюють присоску із герметизувального елемента на елемент з підвищеною проникністю для повітря, що зменшує енергетичну ефективність вакуумної системи і знижує запас утримувальної сили.

У процесі експлуатації вакуумні присоски піддаються дії циклічних деформацій стиску та зсуву, контакту з шорсткими й забрудненими поверхнями,

змін температури, дії мастил, охолоджувальних рідин та зварювальних аерозолів у роботизованих осередках, де поєднуються складання і зварювання. Еластомерні матеріали за таких умов зазнають сукупності деградаційних механізмів, серед яких механічна втома, абразивне зношування кромки, термоокислювальне старіння, релаксація напружень і накопичення залишкової деформації [61–63, 68]. Механічна втома проявляється поступовим утворенням мікротріщин у зоні максимального згину гофри та біля кромки, які у подальшому зростають у видимі тріщини, що орієнтуються вздовж лінії контакту. Абразивне зношування пов'язане із повторним ковзанням присоски по шерехатих металевих поверхнях та вбудовуванням твердих частинок, що діють як мікрорізці; це призводить до заокруглення гострого профілю кромки і появи локальних вибоїн, які порушують безперервність ущільнювального кільця [68]. Термоокислювальне старіння під впливом підвищених температур і кисню змінює модуль пружності, збільшує твердість і зменшує еластичність матеріалу, внаслідок чого кромка гірше адаптується до мікронерівностей деталі й формує більші мікрощілини [62].

Основні експлуатаційні дефекти вакуумних присосок доцільно розглядати з огляду на їх вплив на продуктивність та безвідмовність роботи роботизованого осередку. Мікротріщини у зоні кромки спочатку проявляються як повільне збільшення витоків та прискорене падіння вакууму під навантаженням, що змушує підвищувати час витримки до досягнення порогового тиску і знижувати допустимі прискорення. Проколи та наскрізні пори малих розмірів, пов'язані, наприклад, із випадковими ударами об гострі кромки деталі або включенням твердих частинок, призводять до різкого зростання провідності витoku і необхідності повторного захоплення, тобто до суттєвої втрати продуктивності вже на ранніх стадіях дефектності. Залишкова деформація гофри та кромки, яка накопичується за багато циклів, зменшує висоту пружної деформації та здатність компенсації нерівностей поверхні, тому контактування стає чутливим до відхилень геометрії та прогину

листа, що збільшує частку нестабільних захоплень [61, 68]. Хімічна деградація у вигляді набухання в мастилах або охолоджувальних рідинах змінює розміри та жорсткість присоски, а відкладення продуктів корозії і пилу на робочій поверхні формують додаткові мікрошари з низькою адгезією, які сприяють ковзанню деталі при імпульсних навантаженнях.

Відмінність впливу конкретних дефектів на продуктивність роботи присоски полягає у характері і часовій структурі відмов. Наприклад, рівномірне абразивне зношування кромки та зростання її шорсткості зазвичай призводять до повільного, статистично передбачуваного збільшення часу виходу на робочий вакуум і до поступового зниження запасу утримувальної сили, що відображається на графіках як плавне зміщення розподілів часу циклу та прискорень [63, 68]. Натомість поодинокий прокол або глибока тріщина формують різкий перехід від нормальної роботи до раптової відмови з падінням деталі, тобто змінюють профіль ризику з «повільного деградування» на «раптовий обрив», що критично для безпеки. Залишкова деформація не обов'язково одразу викликає відмову, однак створює прихований дефект, коли присоска нормально працює з гладкими сухими листами, але втрачає герметичність при мінімальних забрудненнях або відхиленнях геометрії. Термоокислювальне старіння збільшує жорсткість і, відповідно, підвищує контактні напруження на гострих кромках, що з одного боку може підвищувати локальну герметичність, а з іншого прискорює розвиток тріщин і врешті скорочує ресурс [62, 68]. Таким чином, для різних дефектів характерні різні траєкторії впливу на продуктивність: від повільного плавного погіршення до різких стрибків відмов.

Порівняння продуктивності нових та експлуатованих присосок доцільно здійснювати за комплексом показників, серед яких час досягнення робочого вакууму, утримувальна сила при заданому розрідженні, допустимі прискорення маніпулятора, частота повторних захоплень та відсоток відмов за зміну. У нових

присосок робоча кромка має мінімальну шорсткість і чітко окреслений профіль, що забезпечує високу герметичність і невеликий витрата повітря для підтримання заданого тиску [64, 65]. Це дозволяє досягати робочого вакууму за частки секунди, реалізовувати високі прискорення при розгоні і гальмуванні та мінімізувати допоміжний час. Після тривалої експлуатації навіть за відсутності явних проколів або тріщин спостерігається зростання часу наростання вакууму, зниження фактичної утримувальної сили, підвищення чутливості до забруднень і відхилень геометрії, що змушує зменшувати прискорення, вводити додаткові витримки та частіше перевіряти стан захоплення. У підсумку продуктивність може знизитися на декілька десятків відсотків порівняно з початковим станом, навіть без формальної відмови, яка фіксується як аварійне падіння деталі [61, 64, 68].

Для кількісного обґрунтування впливу збільшення шорсткості поверхні присоски на ефективність її роботи розглянемо інженерний приклад, що моделює роботу вакуумного захвату у роботизованій складальній операції. Нехай універсальний робот маніпулює сталеву листову заготовкою масою $m = 3,0$ кг, яку потрібно перемістити з палети у кондуктор зі зміною орієнтації. Використовується одна кругла присоска діаметром $d = 50$ мм з робочим розрідженням $\Delta p = 60$ кПа. Площа контакту в ідеальному випадку визначається як $A = \pi(d/2)^2$. При $d = 0,05$ м отримаємо $A \approx \pi \cdot 0,025^2 \approx 0,00196$ м². Тоді максимальна утримувальна сила без урахування витоків дорівнює $F_0 = \Delta p \cdot A \approx 60000 \cdot 0,00196 \approx 118$ Н. На практиці через мікронерівності, шорсткість та дефекти кромки фактична ефективна сила менша. Введемо коефіцієнт герметизації η , який характеризує частку ефективно використаної площі ущільнення. Для нової присоски з шорсткістю кромки $Ra1 \approx 0,8$ мкм приймемо залежність $\eta = 1 / (1 + \beta \cdot Ra)$, де β є емпіричним коефіцієнтом чутливості, наприклад $\beta = 0,2$ мкм⁻¹ [63, 66]. Тоді $\eta_1 = 1 / (1 + 0,2 \cdot 0,8) \approx 1 / 1,16 \approx 0,86$. Для зношеної присоски, у якої через

абразивне зношування і мікротріщини шорсткість зросла до $Ra_2 \approx 3,0$ мкм, отримаємо $\eta_2 = 1 / (1 + 0,2 \cdot 3,0) = 1 / 1,6 \approx 0,63$.

Фактичні утримувальні сили для нового та зношеного стану становитимуть $F_1 = F_0 \cdot \eta_1$ та $F_2 = F_0 \cdot \eta_2$. Підставивши числові значення, отримаємо $F_1 \approx 118 \cdot 0,86 \approx 102$ Н, $F_2 \approx 118 \cdot 0,63 \approx 74$ Н. Для оцінювання допустимих прискорень маніпулятора використаємо вираз $F \geq K \cdot m \cdot (g + a)$, де K є коефіцієнтом запасу за утримувальною силою, g є прискоренням вільного падіння, a є вертикальною складовою прискорення руху деталі [61, 64]. Прийнемо $K = 2$ для урахування динамічних ефектів і невизначеностей. Звідси максимальне допустиме прискорення a_{max} можна знайти як $a_{\text{max}} = F / (K \cdot m) - g$. Для нової присоски $a1_{\text{max}} \approx 102 / (2 \cdot 3) - 9,81 \approx 102 / 6 - 9,81 \approx 17,0 - 9,81 \approx 7,2$ м/с². Для зношеної присоски $a2_{\text{max}} \approx 74 / 6 - 9,81 \approx 12,3 - 9,81 \approx 2,5$ м/с². Отже, збільшення шорсткості кромки з близько 0,8 до 3,0 мкм призводить до зменшення допустимого прискорення більш ніж утричі. Якщо робот у проєкті був налаштований на прискорення 4–5 м/с² для забезпечення заданого такту, то нова присоска забезпечує необхідний запас, тоді як зношена присоска змушує або знижувати прискорення нижче 2,5 м/с², або працювати у зоні підвищеного ризику зриву при пікових навантаженнях.

Шорсткість кромки впливає не лише на максимально допустиме прискорення, а й на час виходу системи на робочий вакуум. Для спрощеної оцінки динаміки вакуумування прийнемо модель, у якій час $t_{\text{вак}}$ досягнення тиску p_2 з початкового p_1 у вакуумній лінії з приведеним об'ємом V при ефективній подачі $Q_{\text{еф}}$ визначається як $t_{\text{вак}} = (V / Q_{\text{еф}}) \cdot \ln(p_1 / p_2)$ [64]. Ефективна подача $Q_{\text{еф}}$ зменшується через витоки пропорційно коефіцієнту герметизації η , тобто $Q_{\text{еф}} = Q \cdot \eta$, де Q є паспортною подачею вакуумного генератора. Нехай $V = 0,5$ л з урахуванням об'єму присоски, шлангів та внутрішніх порожнин, $Q = 1,2$ л/с, $p_1 = 101$ кПа, $p_2 = 41$ кПа. Логарифмічний множник $\ln(p_1 / p_2) \approx \ln(101 / 41) \approx 0,90$. Для

нової присоски $Q_{\text{еф}1} = 1,2 \cdot 0,86 \approx 1,03$ л/с, тоді $t_{\text{вак},1} \approx (0,5 / 1,03) \cdot 0,90 \approx 0,44$ с. Для зношеної присоски $Q_{\text{еф}2} = 1,2 \cdot 0,63 \approx 0,76$ л/с, $t_{\text{вак},2} \approx (0,5 / 0,76) \cdot 0,90 \approx 0,60$ с. Отже, різниця становить близько 0,16 с на одну подію вакуумування. Якщо у типового циклу складання на одну деталь припадає дві вакуумні події, захоплення та відпускання з повторним набором вакууму, то додатковий час лише через зростання шорсткості становить приблизно 0,32 с на цикл.

Припустимо, що тривалість інших операцій робота, включно з переміщенням та підтвердженням позиціонування, становить $T_0 \approx 5,0$ с. Тоді сумарний такт для нової присоски буде $T_1 = T_0 + 2 \cdot t_{\text{вак},1} \approx 5,0 + 0,88 \approx 5,88$ с, а для зношеної присоски $T_2 = T_0 + 2 \cdot t_{\text{вак},2} \approx 5,0 + 1,20 \approx 6,20$ с. Відносна втрата продуктивності за рахунок лише збільшення часу вакуумування становитиме $(T_2 - T_1) / T_1 \approx 0,32 / 5,88 \approx 5\text{--}6$ відсотків. Якщо додатково врахувати потребу у зниженні прискорень з приблизно 4–5 до близько $2,5 \text{ м/с}^2$, фактична тривалість траєкторних сегментів також зростатиме, і реальна втрата продуктивності може досягати 10–15 відсотків без урахування аварійних зривів. Таким чином, збільшення шорсткості кромки, яке на рівні геометричного опису виглядає як зростання R_a на декілька мікрометрів, у кінцевому підсумку трансформується у обмеження прискорень, збільшення часу вакуумування і зниження виходу деталей на годину.

Наведений приклад показує, що навіть при відсутності очевидних макродефектів, таких як видимі тріщини або проколи, збільшення шорсткості й мікродефектності кромки через експлуатацію суттєво впливає на експлуатаційну здатність присоски. Відмінність впливу різних дефектів тут проявляється також у можливості їх ранньої діагностики: плавне збільшення шорсткості та витоків можна виявляти за зміною часу виходу на вакуум і за статистикою повторних захоплень, тоді як локальні проколи потребують окремих тестів герметичності. Залишкова деформація гофри, навпаки, більшою мірою виявляється через зміну контактного контуру при роботі з нерівними поверхнями, а термоокислювальне старіння через

зміну твердості та компресійних властивостей, що впливає на адаптацію до прогину листа [61–63, 68]. Саме тому регламент контролю стану присосок у роботизованих складальних операціях доцільно будувати не лише на візуальному огляді, а й на вимірюванні часу вакуумування, випробуванні на утримувальну силу та періодичному моніторингу шорсткості й профілю кромки.

РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Основні технології виробництва вакуумних присосок для вакуумних захватів роботів

Вакуумні присоски у складі пневматичних захватів промислових роботів є відповідальними елементами, що перетворюють розрідження у вакуумній лінії на утримувальну силу, забезпечують герметичний контакт з деталлю та визначають допустимі прискорення маніпулятора і реальний такт складальних операцій. Експлуатаційні характеристики присосок, зокрема герметичність кромки, швидкість формування вакууму, стабільність утримувальної сили і ресурс, є прямим наслідком обраної технології виготовлення, параметрів процесу та властивостей матеріалу. Тому аналіз основних технологій виробництва вакуумних присосок для роботизованих захватів повинен охоплювати як особливості формування еластомерних і термопластичних елементів, так і типові дефекти, що виникають на стадії виробництва і згодом трансформуються в експлуатаційні відмови [61–63].

Матеріали для виготовлення вакуумних присосок можна умовно поділити на кілька основних груп. До класичних гумових матеріалів належать нітрильні каучуки (NBR), етилен-пропіленові каучуки (EPDM), хлоропренові та натуральні гуми; вони характеризуються порівняно невисокою вартістю, задовільною міцністю та широким діапазоном твердості, проте обмеженою термостійкістю і чутливістю до мастил та хімічних агентів [62]. Силіконові еластомери, зокрема висококонденсовані (HCR) та рідкі силіконові гуми (LSR), відрізняються високою термостійкістю, еластичністю при низьких температурах, хорошою стійкістю до зварювальних аерозолів і старіння, що робить їх придатними для роботизованих осередків з нагрівом і агресивним середовищем [61, 65]. Поліуретанові еластомери забезпечують підвищену зносостійкість, стійкість до порізів і високі динамічні характеристики, тому їх доцільно застосовувати для захвату шорстких або

абразивних деталей, однак вони чутливі до режимів отвердіння і дегазації [64]. Термопластичні еластomers (TPE, TPV) поєднують можливість перероблення методами лиття під тиском з еластичністю, але потребують точного контролю температури та шорсткості форми для забезпечення герметичної кромки [63, 66].

Серед технологій виготовлення вакуумних присосок для гумових еластомерів традиційними є компресійне формування, трансферне формування та лиття під тиском. Компресійне формування полягає в закладанні дозованої заготовки сирової гуми у відкриту прес-форму з подальшим закриттям, прикладанням тиску та нагріванням до температури вулканізації. Типові значення температур форми для NBR і EPDM становлять 150–190 °C, тиск 5–15 МПа, а час витримки 3–8 хв залежно від товщини стінки присоски [62, 63]. Основною перевагою є відносна простота оснащення і можливість виготовлення присосок з товстими стінками та складними гофрованими профілями, однак є недоліки у вигляді нерівномірності температурного поля, варіативності ступеня зшивання по периметру кромки та підвищеної імовірності утворення облоя. Трансферне формування частково зменшує ці проблеми за рахунок попереднього продавлювання гумової суміші через ливникову систему у порожнину форми, що покращує заповнення тонких зон, але потребує складнішого проектування каналів.

Лиття гуми під тиском є розвитком трансферної технології, де сира гумова суміш вприскується у замкнену форму за допомогою гвинтового або поршневого агрегату, що дозволяє зменшити час циклу, підвищити повторюваність маси та розмірів, а також краще контролювати параметри процесу [63, 66]. Типові температури циліндра становлять 80–120 °C, температури форми 160–200 °C, тиск вприскування 50–150 МПа, час заповнення 0,5–2 с, час витримки 1–3 хв залежно від товщини виробу. Ця технологія забезпечує високу продуктивність серійного виробництва присосок для роботизованих ліній, однак чутлива до вентиляції порожнини, стану ливникової системи та шорсткості форми. Недостатня вентиляція

призводить до повітряних пасток, зварних ліній потоку та внутрішніх пустот біля кромки; надмірна шорсткість стінок форми формує підвищену шорсткість поверхні присоски, що погіршує герметичність [66, 69].

Для силіконових еластомерів ключовою технологією є лиття рідкої силіконової гуми LSR у замкнені форми з холодними каналами. Процес передбачає точне змішування двох компонентів у співвідношенні, як правило, 1:1 за масою, дозування виконавчим агрегатом, впорскування суміші у гарячу форму з температурою 150–220 °C і порівняно коротку витримку до завершення зшивання [65]. В'язкість LSR є низькою, тому тиск впорскування зазвичай нижчий, ніж у термопластів, 20–80 МПа, але вимоги до герметичності форми та точності виготовлення форм значно вищі. Час циклу для тонкостінних присосок може становити 30–120 с, при цьому важливо забезпечити кероване охолодження до температури безпечного виймання, як правило 60–80 °C. Перевагою є висока точність відтворення мікрорельєфу форми, що дозволяє формувати кромку з малою шорсткістю та прогнозованою геометрією, а також стабільні механічні властивості в широкому температурному діапазоні. Недоліки пов'язані з ризиком утворення тонкого облоя при мінімальних зазорах і складністю його видалення без пошкодження кромки [65, 69].

Виробництво поліуретанових вакуумних присосок базується на технологіях реакційного лиття або заливання у форми. Компоненти А і В змішуються у визначеному стехіометричному співвідношенні, дегазуються, після чого заливка проводиться у попередньо нагріту форму. Температура компонентів зазвичай становить 20–50 °C, температура форми 40–80 °C, час гелеутворення 1–5 хв, час повного отвердіння 30–120 хв залежно від системи [64]. Ключовим параметром є ефективність дегазації суміші; недостатня дегазація призводить до внутрішньої пористості, яка у зоні кромки формує канали витоку. Крім того, важливу роль відіграє теплова історія виробу, оскільки надмірно висока температура форми або

нерівномірний тепловий режим викликають внутрішні напруження, усадочні дефекти та варіативність твердості по перетину, що у подальшому може зумовити нерівномірну деформацію при захопленні деталі [64, 68].

Для термопластичних еластомерів характерне класичне лиття під тиском з коротким часом циклу. Температура розплаву зазвичай становить 180–230 °С, температура форми 20–50 °С, тиск вприскування 60–120 МПа, час заповнення 0,3–1,0 с, повний цикл 20–60 с залежно від маси та геометрії присоски [63, 66]. Висока повторюваність розмірів і можливість перероблення відходів є перевагами, однак ця технологія особливо чутлива до стану поверхні форми, системи охолодження та перехідних процесів; недоліки у цих зонах призводять до хвилястості, слідів потоку, локальних раковин і неоднорідної шорсткості на робочій кромці. Сучасні підходи до підвищення якості поверхні передбачають використання полірування з заданою шорсткістю, текстурування поверхонь, а також керування температурою форми і фронтом потоку для запобігання утворенню зварних ліній та дефектів поверхні [66].

Окремий напрям у розвитку технологій виробництва присосок становлять адитивні технології для еластомерних і гумоподібних матеріалів, які дозволяють виготовляти спеціалізовані присоски зі складною внутрішньою геометрією, каналами оптимізованої жорсткості або змінною товщиною стінки гофри [68]. Методи, засновані на екструзійному друці термопластичних еластомерів і на використанні фотополімерів з еластомерними властивостями, ще поступаються традиційним технологіям за чистотою поверхні та повторюваністю механічних властивостей, проте відкривають можливість швидкої розробки та тестування нових геометрій. Для таких технологій критичними є параметри температурного профілю, швидкість друку, охолодження нитки та постобробка, оскільки від них залежить рівень внутрішньої пористості, адгезія шарів і стабільність модуля пружності [68].

Типові виробничі дефекти вакуумних присосок пов'язують з недосконалістю процесів заповнення форми, вулканізації або отвердіння, а також з нерівномірністю теплових режимів. Для компресійного формування характерні усадочні порожнини, внутрішня неоднорідність щільності, локальні зони недовулканізування або перепровулканізування, що проявляються як поява м'яких або надто жорстких ділянок у зоні кромки [62–63]. Для лиття гуми під тиском і технологій LSR ключовими дефектами є повітряні пастки, зварні лінії потоку у місцях злиття фронтів, тонкі перемички облоя по контуру кромки. У поліуретанових присосках основну небезпеку становлять внутрішні пори та включення, пов'язані з неефективною дегазацією, а також тріщини і викривлення від нерівномірної усадки [64, 69]. Для TPE і TPV сам характер перероблення сприяє утворенню слідів потоку, поверхневих хвиль, матових зон із підвищеною шорсткістю, особливо при невеликому поєднанні температури форми і тиску вприскування [66].

Важливо розрізняти вплив виробничих дефектів, які присутні вже у нових присосках, та експлуатаційних дефектів, які формуються в процесі роботи, на продуктивність вакуумного захвату. Виробничі дефекти, такі як внутрішні пори та повітряні пастки на кромці, відразу зменшують ефективну площу герметичного контакту і збільшують витік, знижуючи утримувальну силу при даному розрідженні та збільшуючи час виходу на робочий вакуум. Експлуатаційні дефекти, зокрема абразивне зношування кромки, мікротріщини, проколи, залишкова деформація гофри та хімічне старіння, змінюють поведінку присоски у часі, спричиняючи або поступове зростання часу циклу, або різкі відмови за типом падіння деталі [61, 68]. Наприклад, внутрішні пори у зоні кромки вже з першого циклу знижують коефіцієнт герметизації, але мають відносно стабільний ефект, тоді як абразивне зношування повільно збільшує шорсткість і витік, і лише після досягнення критичного рівня починає суттєво впливати на продуктивність. Прокол або

наскрізна тріщина, навпаки, можуть виникнути раптово і практично миттєво перевести присоску з працездатного стану в аварійний.

Для кількісної ілюстрації взаємозв'язку технології виготовлення, матеріалу та експлуатаційної продуктивності розглянемо приклад інженерного підбору вакуумних присосок для роботизованого захвату сталевих листів у складальній операції. Нехай робот повинен маніпулювати листовими деталями розміром 1200×800 мм, товщиною 2 мм, виготовленими зі сталі густиною $\rho \approx 7850$ кг/м³. Об'єм одного листа $V_{\text{л}} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 0,002 = 0,00192$ м³, маса $m \approx 0,00192 \cdot 7850 \approx 15,1$ кг. Приймається конфігурація захвату з чотирма присосками, розташованими по кутах прямокутника, що забезпечує стійке утримання листа. Вакуумна система забезпечує розрідження $\Delta p = 60$ кПа. Необхідно підібрати діаметр присосок і матеріал з урахуванням вимог до прискорень та стійкості до зношування.

Максимальна утримувальна сила однієї присоски у ідеальному випадку $F_0 = \Delta p \cdot A$, де $A = \pi(d/2)^2$ є площа контакту, d є діаметр присоски. З урахуванням реальних витоків введемо коефіцієнт герметизації η , який враховує як виробничі, так і експлуатаційні дефекти. За початкових умов для високоякісної силіконової присоски, виготовленої методом LSR лиття з ретельно полірованою формою, можна прийняти $\eta \approx 0,9$; для поліуретанової присоски, виготовленої методом реакційного лиття, з дещо вищою ймовірністю пористості, $\eta \approx 0,8$ [63–65]. Загальна утримувальна сила захвату становить $F = 4 \cdot F_0 \cdot \eta$. Для забезпечення безпечної роботи приймемо коефіцієнт запасу $K = 2$ і максимальне вертикальне прискорення $a_{\text{макс}}$. Тоді умова утримання записується як $F \geq K \cdot m \cdot (g + a)$, звідки $a \leq F / (K \cdot m) - g$.

Припустимо, що робот повинен працювати з вертикальною складовою прискорення не менше $a_{\text{потр}} = 3$ м/с² для досягнення заданого такту. Підставимо числові значення для силіконових присосок. Виразимо F_0 через d : $F_0 = \Delta p \cdot \pi(d/2)^2 = 60000 \cdot \pi \cdot d^2 / 4$. Тоді $F = 4 \cdot F_0 \cdot \eta = 4 \cdot 60000 \cdot \pi \cdot d^2 / 4 \cdot 0,9 = 60000 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot$

d^2 . Для виконання умови $F \geq K \cdot m \cdot (g + a_{\text{потр}})$ маємо $60000 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot d^2 \geq 2 \cdot 15,1 \cdot (9,81 + 3,0)$. Обчислимо праву частину: $2 \cdot 15,1 \approx 30,2$; $9,81 + 3,0 \approx 12,81$; добуток $30,2 \cdot 12,81 \approx 386$, приблизно 387 Н. Ліва частина дорівнює $60000 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot d^2 \approx 60000 \cdot 2,994 \cdot d^2 \approx 179640 \cdot d^2$. Отже, $179640 \cdot d^2 \geq 387$, звідки $d^2 \geq 387 / 179640 \approx 0,00215$, а $d \geq \sqrt{0,00215} \approx 0,046$ м, тобто 46 мм. Найближче стандартне значення діаметра присоски становитиме 50 мм, що забезпечує необхідний запас.

Для поліуретанової присоски з $\eta \approx 0,8$ розрахунок дає $F = 60000 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot d^2 \approx 150720 \cdot d^2$. Умова $150720 \cdot d^2 \geq 387$ приводить до $d^2 \geq 0,00257$, $d \approx 0,0507$ м, тобто необхідний діаметр вже переходить у номінал 55 мм. Таким чином, при однаковому розрідженні сили утримання для поліуретану і силікону відрізняються через різну ефективну герметичність. Водночас поліуретан забезпечує кращу стійкість до абразивного зношування при захваті шорстких листів, тобто повільніше втрачає η в експлуатації [64, 68]. Для гладких сухих листів при жорстких вимогах до мінімізації маси і габаритів захвату більш раціональним є силікон, який дозволяє застосувати менший діаметр при збереженні потрібних прискорень. Для листів із підвищеною шорсткістю або невеликими задирками переважним стає поліуретан, який забезпечує нижчу швидкість деградації кромки, навіть ціною початково більшого діаметра.

Далі доцільно оцінити вплив виробничих і експлуатаційних дефектів на продуктивність у межах цього прикладу. Вважатимемо, що для силіконової присоски, виготовленої з відхиленнями у режимах LSR лиття, коефіцієнт герметизації знижений до $\eta_{\text{вит}} \approx 0,75$ через наявність тонкого облоя і микропор у зоні кромки. Перерахунок дає $F_{\text{вит}} \approx 60000 \cdot \pi \cdot 0,75 \cdot d^2 \approx 141372 \cdot d^2$. Для $d = 0,05$ м отримаємо $F_{\text{вит}} \approx 141372 \cdot 0,0025 \approx 353$ Н. Підставивши у формулу для допустимого прискорення, маємо $a_{\text{макс}} \approx F_{\text{вит}} / (K \cdot m) - g \approx 353 / (2 \cdot 15,1) - 9,81 \approx 353 / 30,2 - 9,81 \approx 11,7 - 9,81 \approx 1,9$ м/с². Це менше від вимоги 3 м/с², тобто через виробничі дефекти силіконова присоска виявляється недостатньо ефективною за

заданих умов. Для поліуретанової присоски з тією самою геометрією, але з припущенням, що завдяки ретельній дегазації і отвердінню η на початку експлуатації становить 0,8, а внаслідок абразивного зношування через певний час знижується до 0,7, допустиме прискорення поступово зменшується, але плавно, що дозволяє завчасно виявити деградацію за зміною часу циклу і режимів роботи [64, 68].

Цей приклад показує, що вплив різних типів дефектів на продуктивність присоски має принципово різний характер. Виробничі дефекти, як у випадку силіконової присоски з початково заниженим η , одразу обмежують доступний діапазон прискорень і потенційно виводять систему за межі допустимої зони безпеки, навіть якщо зовнішніх ознак деградації ще немає. Експлуатаційні дефекти, пов'язані з поступовим зношуванням поліуретанової кромки, знижують продуктивність поступово, даючи можливість реалізувати діагностику на основі зміни часу виходу на вакуум, частоти повторних захоплень або спектру прискорень. Проколи та наскрізні тріщини мають ще інший профіль впливу, вони практично не змінюють характеристики до моменту виникнення, але після появи приводять до різкої відмови, що змушує негайно зупиняти осередок.

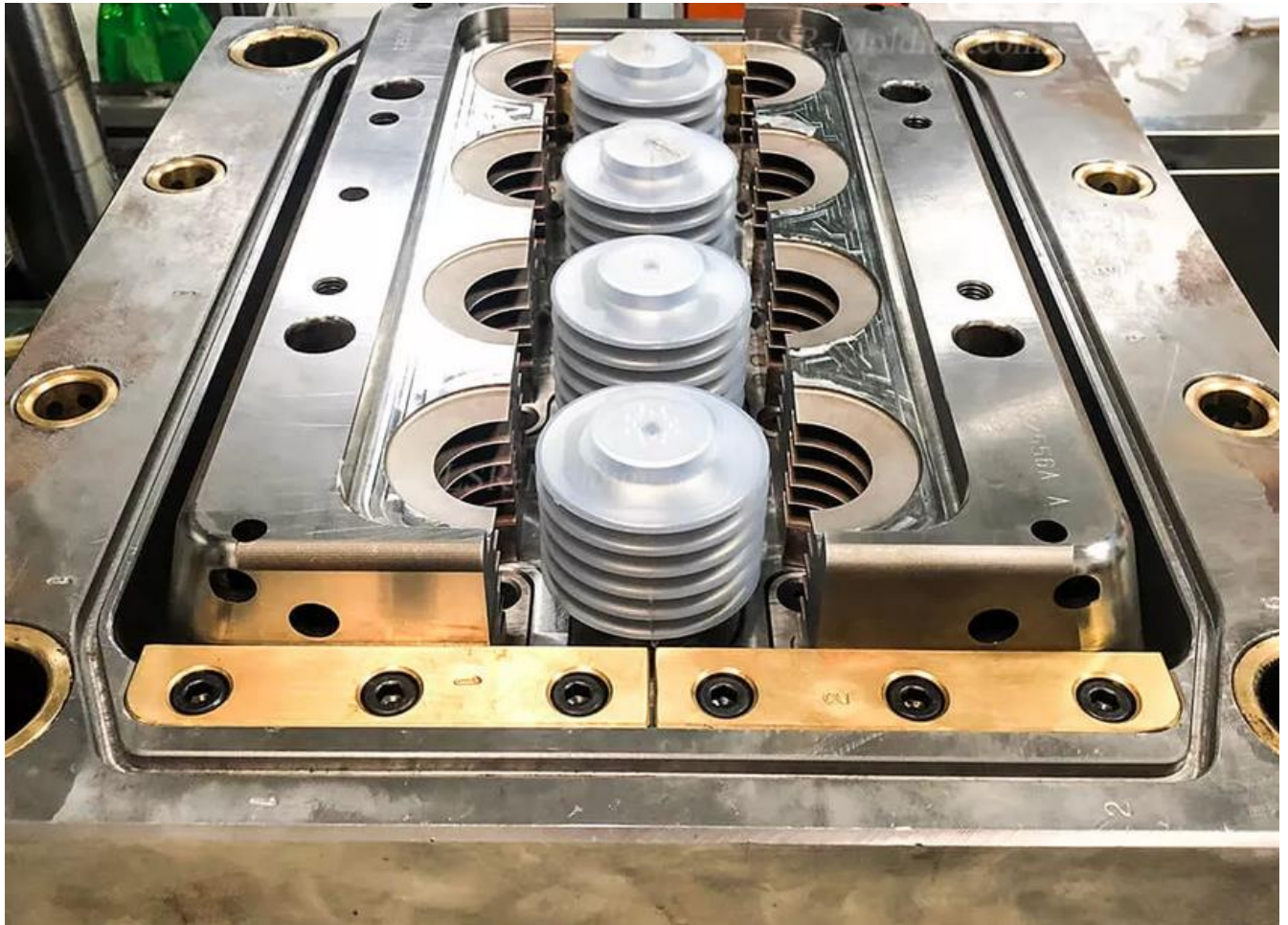


Рисунок 1.1 LSR лиття силіконових вакуумних присосок

2.2 Вплив шорсткості виробу та шорсткості присоски на роботу вакуумних присосок для вакуумних захватів роботів

Ефективність роботи вакуумних присосок у складі роботизованих захватів визначається не лише рівнем розрідження у вакуумній лінії і геометрією присоски, а й мікрогеометрією поверхонь, що контактують. Шорсткість поверхні виробу та шорсткість ущільнювальної кромки присоски разом формують систему мікрощілин і мікроконтактів, які задають величину витоків, реальну площу герметичного контакту, швидкість виходу на робочий вакуум і запас утримувальної сили [71–73]. У роботизованих складальних та палетайзингових осередках, де цикли повторюються тисячі разів за зміну і використовуються високі прискорення

маніпулятора, навіть невелике зростання шорсткості присоски або зміна стану поверхні виробу здатні суттєво вплинути на продуктивність і безвідмовність роботи.

Параметри шорсткості поверхні виробу формуються на стадії виготовлення і подальшої експлуатації. Для листових і штампованих деталей характерними є шорсткості, що задаються технологіями різання, штампування, прокатки, шліфування, дробоструминної обробки, нанесення покриттів або корозійного зношування. Середньоарифметичне відхилення профілю R_a , висота нерівностей профілю R_z , а також параметри хвилястості визначають амплітуду мікронерівностей, які присоска повинна компенсувати за рахунок пружної деформації кромки [71]. У разі шліфованих або полірованих поверхонь R_a зазвичай становить 0,4–1,6 мкм; для холоднокатаних листів 1,6–3,2 мкм; для оброблених дробоструминно поверхонь 3,2–12,5 мкм і вище. На додаток до мікронерівностей значний вплив мають локальні задирки, оксидні плівки, залишки мастил та забруднення, які змінюють характер контакту.

Шорсткість присоски формується мікрорельєфом поверхні прес-форми, режимами формування еластомерної або термопластичної оболонки, а також післяобробкою кромки під час видалення облоя та очищення. Для гумових і силіконових присосок початкову шорсткість можна забезпечити на рівні $R_a \approx 0,4$ –1,0 мкм за умови полірування порожнини форми і застосування контрольованих методів видалення облоя [72–75]. Підвищена шорсткість форми, неконтрольоване механічне зачищення кромки, наявність мікропухирців і усадочних раковин у зоні кромки призводять до появи локальних вибоїн, загострених виступів і мікротріщин, які збільшують ефективну шорсткість ущільнювальної поверхні. Термопластичні еластomers є особливо чутливими до параметрів лиття під тиском: неповний баланс температури форми і розплаву, недостатня вентиляція або невіддале розташування

ливників формують сліди потоку, зварні лінії і матові зони підвищеної шорсткості [63, 76–77].

Фізична сутність впливу шорсткості на роботу вакуумної присоски полягає в формуванні сітки мікроконтактів на вершинних ділянках нерівностей і мікрощілин між ними, через які відбувається витік повітря. При достатньо малій сумарній шорсткості поверхонь еластомерна кромка здатна пружно деформуватися, заповнюючи западини і формуючи майже безперервне кільце контакту. При зростанні шорсткості або за наявності жорстких виступів і забруднень частина западин залишається незаповненою, перетворюючись на повздовжні канали витоку. Для опису цього ефекту зручно використовувати поняття ефективного коефіцієнта герметизації η , який характеризує, яку частку номінальної площі контакту можна вважати герметичною. У найпростішій інженерній постановці можна пов'язати η з комбінованою шорсткістю поверхні виробу $R_{ав}$ і присоски $R_{ап}$ через спадну функцію, наприклад $\eta = 1/(1 + \beta \cdot R_{акомб})$, де $R_{акомб}$ є узагальнений параметр шорсткості, а β є емпіричний коефіцієнт чутливості [71, 73, 78].

Для комбінованої шорсткості доцільно використовувати коренеквадратичну суму $R_{акомб} = \sqrt{R_{аб}^2 + R_{ап}^2}$, оскільки нерівності двох поверхонь, що накладаються, фактично сумуються за енергією мікронерівностей. Чим більше $R_{акомб}$, тим більша висота мікрощілин і тим більшу роботу повинна виконати кромка присоски, щоб компенсувати її пружною деформацією. Для м'яких силіконових матеріалів з твердістю близько 40 Shore A зазвичай допускаються більші $R_{акомб}$, ніж для жорсткіших поліуретанів або ТРЕ, але зростає чутливість до залишкової деформації і швидкість зношування [72, 74]. Таким чином, параметри шорсткості безпосередньо впливають на величину утримувальної сили $F = \Delta p \cdot A \cdot \eta$ та на динаміку евакуації повітря, оскільки витрати через мікрощілини зростають із збільшенням $R_{акомб}$.

Підбір присосок з урахуванням стану поверхні виробу повинен враховувати не лише номінальний параметр R_a , а й характер нерівностей, наявність задирок, покриттів, мастил і забруднень. Для сухих холоднокатаних листів із $R_a \approx 1,6\text{--}3,2$ мкм зазвичай достатньо присосок з плоскою або слабогоризонтальною кромкою з силікону або ТРЕ середньої твердості, які забезпечують достатню адаптацію до мікронерівностей і стабільну шорсткість кромки при серійному виробництві [61, 70]. Для дробоструминно оброблених або гарячекатаних поверхонь з $R_a 6\text{--}12,5$ мкм доцільно застосовувати м'якші силіконові або поліуретанові присоски з гофрованою (bellows) геометрією, ширшою кромкою і збільшеним діаметром, що дозволяє компенсувати більші нерівності за рахунок значної деформації кромки. Для поверхонь з мастилами або тонкими покриттями потрібні матеріали з кращою стійкістю до набухання і зниженням коефіцієнта тертя, щоб уникнути ковзання при динамічних навантаженнях [61, 64].

Виробничі дефекти, що формуються у процесі виготовлення присосок, впливають на шорсткість кромки по-різному. Мікропухирці, повітряні пастки і усадочні раковини в зоні кромки при виході на поверхню формують локальні вибоїни, які збільшують R_a і створюють концентровані канали витоку. Тонкий облой, що утворюється на площині рознімання форми, при неякісному видаленні залишає задирки та хвилястість, які перетворюють профіль кромки з плавної лінзоподібної чи прямокутної форми на форму із зубцями, що збільшує висоту мікрощілин і зменшує η [63, 76–77]. Підвищена шорсткість поверхні форми, особливо при недосконалому поліруванні або зносі, безпосередньо переноситься на присоску, збільшуючи базову шорсткість R_{ap} навіть для нових виробів. На відміну від цих локальних дефектів, внутрішні пори в товщі матеріалу, які не виходять на поверхню, безпосередньо не змінюють шорсткість, але створюють потенційні зони розвитку тріщин і втомних дефектів, що в експлуатації приводять до раптових наскрізних витоків [64, 68].

Експлуатаційні дефекти також мають різний вплив на шорсткість і продуктивність. Абразивне зношування кромки при контакті з шорсткими поверхнями збільшує R_a і згладжує гострі елементи профілю, однак одночасно створює вибоїни та подряпини, що збільшують висоту мікрощілин. Термоокислювальне старіння, характерне для зон поблизу джерел тепла або зварювальних аерозолів, збільшує твердість і зменшує здатність кромки до деформації, що робить її менш здатною компенсувати нерівності поверхні виробу, навіть якщо номінальний R_{ap} майже не змінився [72, 74]. Проколи і наскрізні тріщини створюють локальні зони з дуже великою ефективною шорсткістю, де мікрощілина фактично перетворюється на макроканал витоку; при цьому інтегральний R_a може не відображати масштаб проблеми. Набухання в мастилах або хімічна деградація матеріалу змінюють геометрію і жорсткість кромки, створюючи нерівномірні зони притискання, де частина кромки контактує жорстко, а частина залишається у підвішеному стані над мікронерівностями, що знижує η [61, 68].

Для кількісної оцінки впливу шорсткості розглянемо інженерний приклад підбору присосок для роботизованого захвату листових деталей з різним станом поверхні. Нехай універсальний робот транспортує два типи сталевих листів однакової геометрії $800 \times 600 \times 2$ мм. Об'єм листа $V_l = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,002 = 0,00096$ м³, маса $m \approx 0,00096 \cdot 7850 \approx 7,5$ кг. Тип А є холоднокатаним листом після легкого шліфування з $R_{av,A} \approx 1,6$ мкм, тип В є дробоструминно обробленим листом з $R_{av,B} \approx 6,3$ мкм. Передбачається використання чотирьох присосок, розташованих у вершинах прямокутника, з вакуумним розрідженням $\Delta p = 60$ кПа. Потрібно вибрати матеріал і діаметр присосок та оцінити вплив шорсткості на допустимі прискорення маніпулятора.

Для типу А розглянемо силіконову присоску, виготовлену LSR литтям, з початковою шорсткістю кромки $R_{ap,Si} \approx 0,8$ мкм. Комбінована шорсткість

$R_{\text{акомб},A} = \sqrt{R_{ab,A}^2 + R_{ap,Si}^2} = \sqrt{2,56 + 0,64} = 1,79 \text{ мкм}$. Для типу В застосування тієї

ж присоски дає $R_{\text{акомб},A} = \sqrt{R_{ab,B}^2 + R_{ap,Si}^2} = \sqrt{39,69 + 0,64} = 6,35 \text{ мкм}$ Введемо

для подальших оцінок емпіричну залежність $\eta = 1/(1 + \beta \cdot R_{\text{акомб}})$, де $\beta \approx 0,15 \text{ мкм}^{-1}$. Для типу А отримаємо $\eta_A \approx 1/(1 + 0,15 \cdot 1,79) \approx 1/(1 + 0,269) \approx 0,788$, для типу В $\eta_B \approx 1/(1 + 0,15 \cdot 6,35) \approx 1/(1 + 0,953) \approx 0,512$. Це означає, що при переході від шліфованого до дробоструминного листа при незмінній присосці ефективна герметична площа контакту зменшується приблизно у півтора раза.

Нехай обраний діаметр присоски $d = 40 \text{ мм}$. Площа контакту $A = \pi(d/2)^2 = \pi \cdot 0,02^2 \approx 0,001257 \text{ м}^2$. Номінальна утримувальна сила однієї присоски без урахування витоків $F_0 = \Delta p \cdot A \approx 60000 \cdot 0,001257 \approx 75,4 \text{ Н}$. З урахуванням η для типу А утримувальна сила однієї присоски $F_A = F_0 \cdot \eta_A \approx 75,4 \cdot 0,788 \approx 59,4 \text{ Н}$, для типу В $F_B \approx 75,4 \cdot 0,512 \approx 38,6 \text{ Н}$. Загальна утримувальна сила захвату для чотирьох присосок становить $F_{\Sigma A} \approx 4 \cdot 59,4 \approx 237,6 \text{ Н}$ для типу А та $F_{\Sigma B} \approx 4 \cdot 38,6 \approx 154,4 \text{ Н}$ для типу В. Для безпечної роботи введемо коефіцієнт запасу $K = 2$ і максимальне вертикальне прискорення a . Умова утримання записується як $F_{\Sigma} \geq K \cdot m \cdot (g + a)$. Для типу А маємо $237,6 \geq 2 \cdot 7,5 \cdot (9,81 + a)$, тобто $237,6 \geq 15 \cdot (9,81 + a)$. Звідси $9,81 + a \leq 237,6 / 15 \approx 15,84$, $a_{\text{max},A} \approx 15,84 - 9,81 \approx 6,03 \text{ м/с}^2$. Для типу В $154,4 \geq 15 \cdot (9,81 + a)$, $9,81 + a \leq 154,4 / 15 \approx 10,29$, $a_{\text{max},B} \approx 10,29 - 9,81 \approx 0,48 \text{ м/с}^2$. Таким чином, при переході до шорсткого листа допустиме прискорення практично знижується майже до нуля, що на практиці означає необхідність або значного збільшення діаметра та кількості присосок, або вибору іншого матеріалу і геометрії.

Розглянемо альтернативу для типу В у вигляді поліуретанової гофрованої присоски з м'якішою кромкою та збільшеним діаметром $d = 50 \text{ мм}$, виробленої з ретельним контролем дегазації, що дає $R_{ap,PU} \approx 1,5 \text{ мкм}$. Комбінована шорсткість $R_{\text{акомб},B,PU} = \sqrt{(6,3^2 + 1,5^2)} \approx \sqrt{(39,69 + 2,25)} \approx \sqrt{41,94} \approx 6,48 \text{ мкм}$. Через жорсткіший матеріал приймемо $\beta \approx 0,12 \text{ мкм}^{-1}$, тоді $\eta_{B,PU} \approx 1/(1 + 0,12 \cdot 6,48) \approx 1/(1 + 0,778) \approx$

0,562. Площа нової присоски $A_{PU} = \pi \cdot 0,025^2 \approx 0,001963 \text{ м}^2$, $F_{0,PU} \approx 60000 \cdot 0,001963 \approx 117,8 \text{ Н}$. Утримувальна сила однієї присоски $F_{B,PU} \approx 117,8 \cdot 0,562 \approx 66,2 \text{ Н}$, загальна сила $F_{\Sigma B,PU} \approx 4 \cdot 66,2 \approx 264,8 \text{ Н}$. Умова утримання дає $264,8 \geq 15 \cdot (9,81 + a)$, $9,81 + a \leq 264,8 / 15 \approx 17,65$, $a_{\max,B,PU} \approx 17,65 - 9,81 \approx 7,84 \text{ м/с}^2$. Отже, заміна матеріалу, геометрії і діаметра присоски дозволила не лише компенсувати негативний вплив шорсткої поверхні виробу, а і збільшити допустиме прискорення порівняно з базовим випадком для гладкого листа.

Важливо також врахувати вплив шорсткості на час виходу на робочий вакуум. Нехай приведений об'єм вакуумної лінії з урахуванням шлангів і порожнин усіх присосок становить $V = 0,8 \text{ л}$. Паспортна подача вакуумного генератора $Q = 1,5 \text{ л/с}$. Час досягнення тиску p_2 з початкового p_1 визначимо як $t_{\text{так}} = (V / Q_{\text{еф}}) \cdot \ln(p_1 / p_2)$, де $Q_{\text{еф}} = Q \cdot \eta$ [78]. При $p_1 = 101 \text{ кПа}$, $p_2 = 41 \text{ кПа}$ логарифмічний множник $\ln(101/41) \approx 0,90$. Для типу А з $\eta_A \approx 0,788$ маємо $Q_{\text{еф},A} \approx 1,5 \cdot 0,788 \approx 1,18 \text{ л/с}$, $t_{\text{так},A} \approx (0,8 / 1,18) \cdot 0,90 \approx 0,61 \text{ с}$. Для типу В з силіконовими присосками $Q_{\text{еф},B} \approx 1,5 \cdot 0,512 \approx 0,77 \text{ л/с}$, $t_{\text{так},B} \approx (0,8 / 0,77) \cdot 0,90 \approx 0,94 \text{ с}$. При використанні поліуретанових присосок для типу В маємо $Q_{\text{еф},B,PU} \approx 1,5 \cdot 0,562 \approx 0,84 \text{ л/с}$, $t_{\text{так},B,PU} \approx (0,8 / 0,84) \cdot 0,90 \approx 0,86 \text{ с}$. Таким чином, для шорсткого листа заміна типу присоски дозволяє зменшити час вакуумування приблизно на 0,08 с порівняно з невідповідною силіконовою присоскою, а головне, забезпечити істотно вищі допустимі прискорення, що безпосередньо впливає на продуктивність.

Наведений приклад ілюструє, що підбір присосок залежно від шорсткості поверхні повинен враховувати сукупний вплив матеріалу, геометрії, технології виготовлення та дефектності на комбіновану шорсткість і коефіцієнт герметизації. Для гладких поверхонь, де $R_{\text{акомб}}$ невелика, критичними стають виробничі дефекти, які різко знижують η навіть при хороших матеріальних властивостях. Для шорстких поверхонь домінуючими стають властивості матеріалу і геометрія, що визначають здатність кромки адаптуватися до високих нерівностей. Експлуатаційні

дефекти, такі як абразивне зношування, збільшують R_{ap} і $R_{акомб}$, тим самим зменшуючи η та допустимі прискорення, тоді як проколи і тріщини створюють локальні канали витоку, які можуть призвести до миттєвої відмови навіть за незначної середньої шорсткості. Термоокислювальне старіння змінює модуль пружності і характер контакту, що особливо важливо при переході від гладких до шорстких поверхонь виробу, оскільки жорсткіша кромка гірше адаптується до рельєфу, збільшуючи $R_{акомб}$ без зміни номінального R_{ap} [72, 74, 79].

2.3 Прогнозування шорсткості робочої поверхні вакуумних присосок в залежності від передумов процесу виготовлення

У межах дослідження шорсткості робочої кромки вакуумних присосок для пневматичних захватів реалізовано програмний модуль прогнозування параметра R_a на основі методів Supervised Learning. Вихідні дані формуються у вигляді таблиці, де кожен рядок відповідає окремому технологічному циклу виготовлення присоски, а стовпці містять значення ключових параметрів процесу формування еластомерної оболонки, зокрема максимальної температури у формі, температури форми і матеріалу, часу витримки, швидкості охолодження, тиску впорскування, а також виміряне значення шорсткості ущільнювальної кромки R_a .

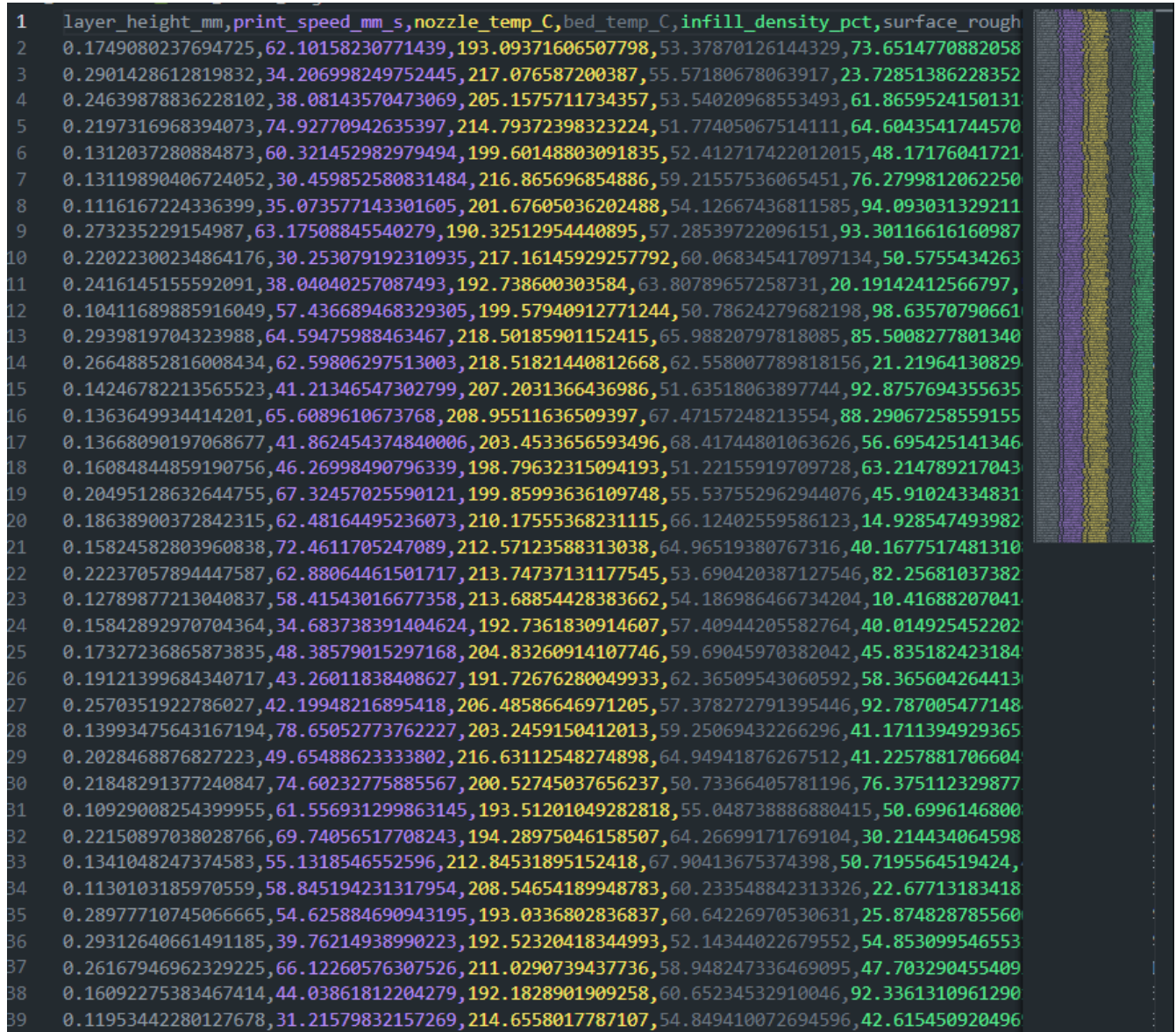


Рисунок 2.1 Дані для розрахунку шорсткості поверхні від режимів технологічного процесу

Після завантаження цього масиву даних, виконали перевірку на повноту та попередній описовий аналіз, включно з обчисленням основних статистичних характеристик та пошуком пропусків, що дозволяє оцінити репрезентативність експериментальної вибірки перед побудовою моделей.

На етапі візуального аналізу будували низку діаграм розсіювання «параметр процесу – шорсткість», що дало змогу виявити нелінійні залежності та потенційні

зони насичення, наприклад вплив збільшення максимальної температури або зміни швидкості охолодження на Ra кромки. Додатково обчислювали матриця кореляцій між усіма технологічними параметрами та цільовим показником шорсткості, що дозволило попередньо оцінити, які фактори є найбільш чутливими з точки зору формування мікрорельєфу. Це важливо з точки зору подальшого тлумачення, оскільки виявлені кореляції між, наприклад, енергонасиченістю процесу та Ra безпосередньо пов'язуються з механізмами зшивання полімерної матриці та утворення поверхневих дефектів на кромці присоски.

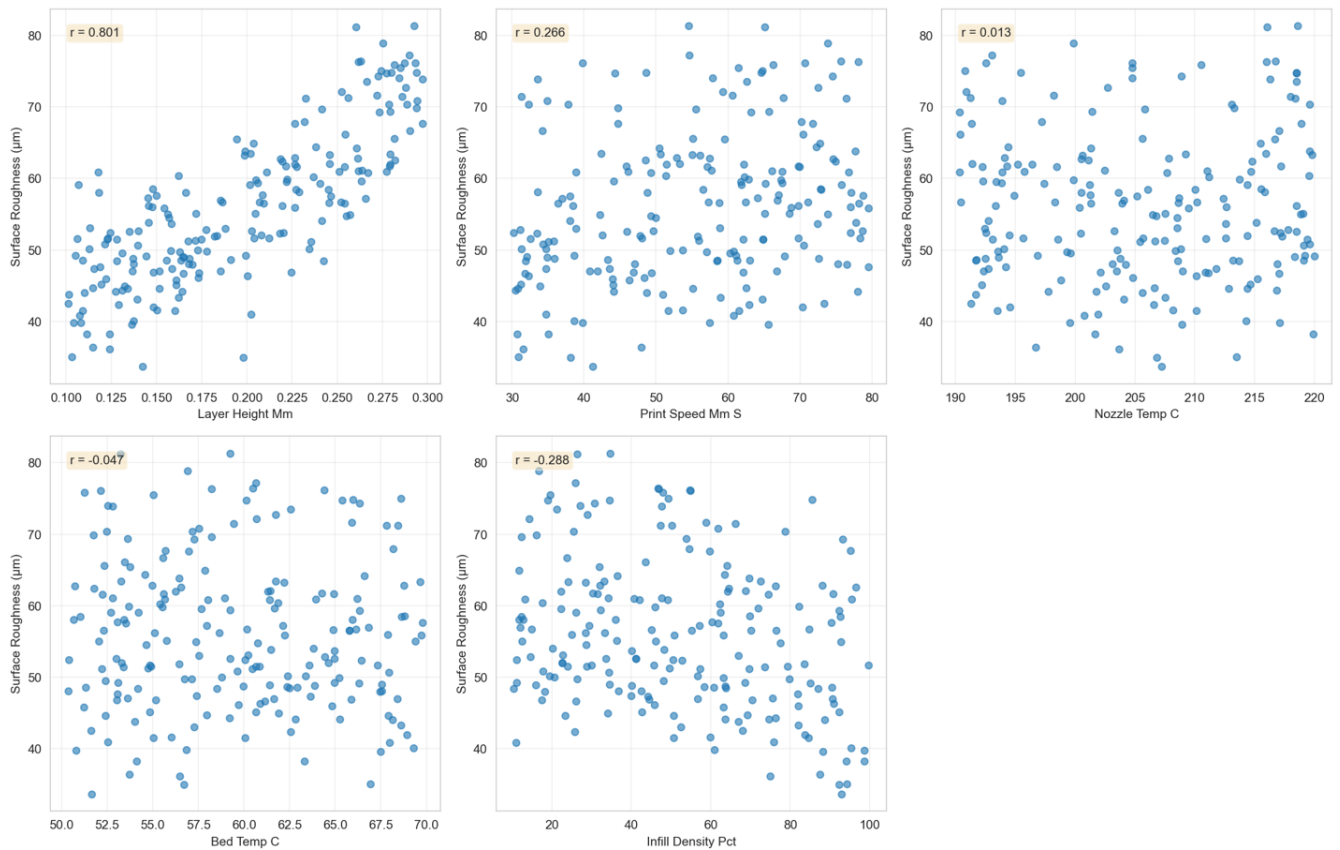


Рисунок 2.2 Розсіювання основних характеристик виробничого процесу виготовлення вакуумних присосок

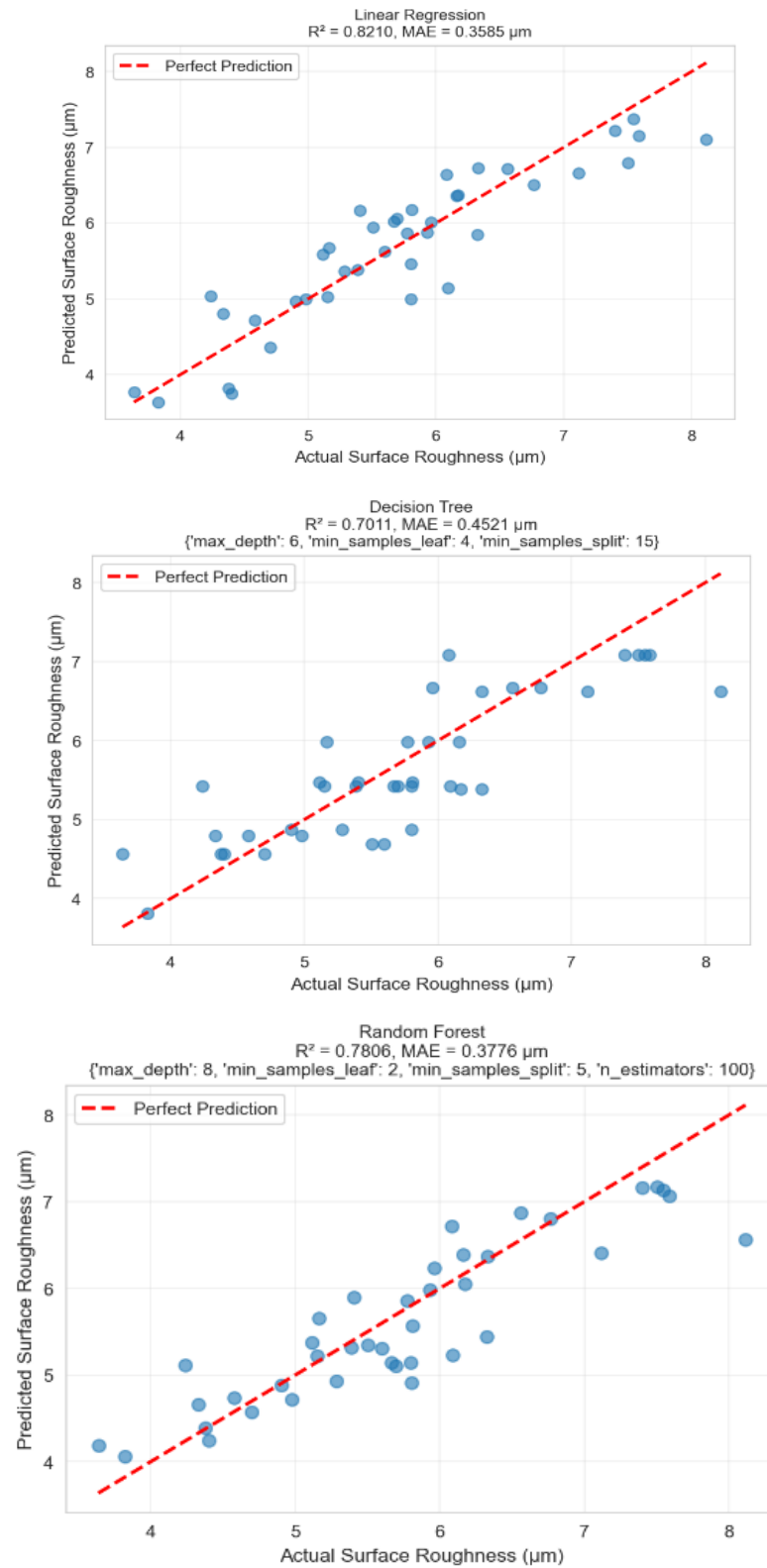


Рисунок 2.3 Побудова лінійної регресії методами машинного навчання – Linear Regression, Decision Tree, Random Forest

Для побудови прогнозних моделей застосовували типову схему Supervised Learning. Всі технологічні параметри розглядали як вхідні змінні X , а виміряна шорсткість кромки R_a як цільова змінна y . Вибірка випадковим чином ділилась на тренувальну та тестову підвибірки (орієнтовно 80 % та 20 % прикладів відповідно), що уможливило незалежну оцінку здатності моделі до узагальнення. Для запобігання спотворенню результатів через різні масштаби параметрів (наприклад, температура у градусах Цельсія та швидкість охолодження у градусах за хвилину) виконували стандартизацію ознак за допомогою StandardScaler: з тренувальної вибірки обчислювали середні значення та стандартні відхилення, після чого і тренувальні, і тестові дані перетворювали до безрозмірного виду із нульовим середнім та одиничною дисперсією. Це особливо важливо для моделей, чутливих до масштабу ознак, і забезпечує коректну роботу алгоритмів при підборі параметрів.

У коді реалізовано послідовне навчання та порівняння кількох регресійних моделей. Як базовий підхід використано лінійну регресію, що дозволяє оцінити, наскільки загальна залежність між параметрами процесу формування присоски та шорсткістю кромки може бути описана лінійною комбінацією ознак. Далі застосовано деревоподібну модель (Decision Tree Regressor) та ансамблевий алгоритм Random Forest, які здатні відтворювати нелінійні залежності та взаємодії між параметрами процесу. Для деревоподібних моделей використано механізм GridSearchCV, який здійснює перебір сітки гіперпараметрів (глибина дерева, мінімальна кількість зразків у вузлі поділу, мінімальна кількість зразків у листі, кількість дерев в ансамблі тощо) у поєднанні з k -кратною перехресною перевіркою. Це означає, що для кожної комбінації гіперпараметрів тренування та оцінка моделі виконуються на різних підмножинах тренувальної вибірки, що дозволяє обрати таку складність моделі, яка забезпечує найкращий компроміс між точністю та стійкістю до перенавчання.

Якість моделей оцінювали за кількома показниками: коефіцієнтом детермінації R^2 , середньою абсолютною похибкою MAE та квадратичною середньою похибкою RMSE на тестовій вибірці.

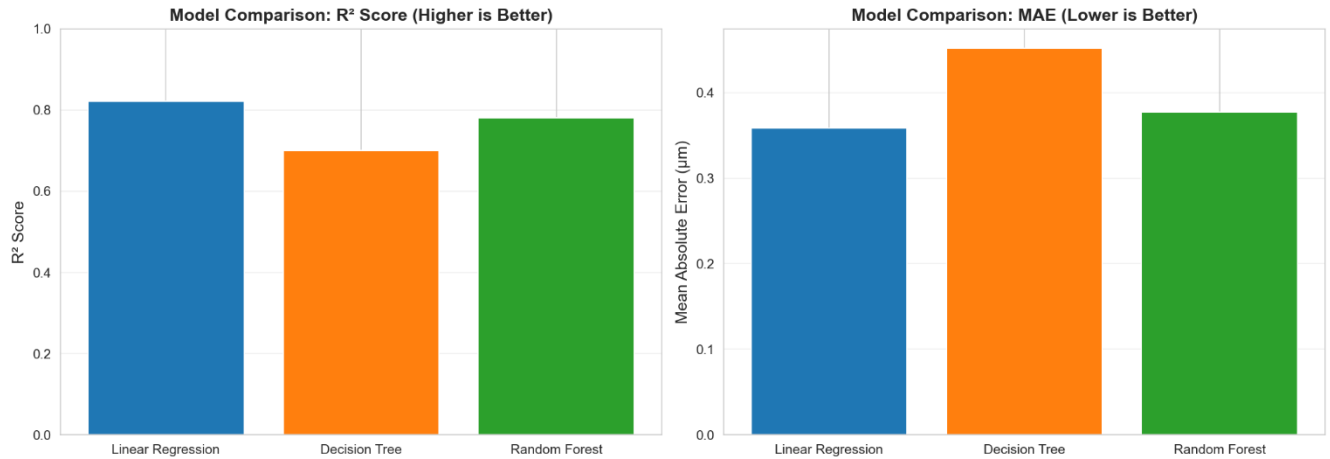


Рисунок 2.4 Порівняння метрик моделей машинного навчання

Значення R^2 , близькі до одиниці, свідчать про здатність моделі пояснювати більшу частину варіації шорсткості на основі параметрів процесу, тоді як малі MAE та RMSE (у мікрометрах) дозволяють зіставити похибку прогнозу із допустимими відхиленнями R_a для забезпечення герметичності кромки вакуумної присоски. Додатково аналізували різницю між R^2 на тренувальній та тестовій вибірках; невеликий розрив інтерпретували як ознаку доброї узагальнюваності, тоді як значний розрив сигналізує про перенавчання моделі на конкретну вибірку експериментів.

Важливим результатом застосування деревоподібних моделей є оцінка важливості ознак, яка у коді виводиться у вигляді відсортованого списку ваг кожного параметра процесу. Це дозволяє кількісно ранжувати вплив, наприклад, максимальної температури у формі, часу витримки, енергонасиченості циклу та швидкості охолодження на шорсткість кромки присоски. Така інформація безпосередньо використовується для побудови інтервалів технологічних процесів, у межах яких R_a не перевищує допустимих значень для забезпечення заданого

коефіцієнта герметизації при контакті з виробом. Фактично модель машинного навчання виконує роль апроксиматора залежності $R_a = f(\text{параметри процесу})$, що дає змогу у режимі офлайн або онлайн оцінювати наслідки зміни технологічних параметрів без проведення великої кількості фізичних експериментів.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

3.1. Охорона праці при використанні універсальних роботів на складальних операціях з використанням вакуумних присосок

Забезпечення охорони праці в роботизованих складальних осередках з вакуумними присосками базується на поєднанні конструктивної безпеки робота, надійності пневмовакуумної системи та якості захватних елементів. Вакуумний захват є критичним елементом технологічного ланцюга, оскільки одночасно визначає рівень ризику падіння вантажу, характер можливого контакту зі співробітником та межі допустимих швидкостей і прискорень маніпулятора. Будь-яка деградація вакуумних присосок безпосередньо впливає на утримувальну здатність і, відповідно, на необхідні коефіцієнти запасу при проєктуванні траєкторій, режимів палетайзингу та сценаріїв аварійної зупинки [81–83]. Тому питання безпеки не можна розглядати окремо від параметрів експлуатаційної стійкості присосок та їх технологічної якості.

Сучасна система регулювання безпеки машин, зокрема роботизованих комплексів, спирається на принципи, закріплені в стандарті ISO 12100, який описує загальний алгоритм оцінювання ризику і послідовність його зниження шляхом поєднання конструктивних заходів, технічних засобів захисту та організаційних процедур [87]. Для роботизованого осередку з вакуумними захватами це означає, що проєктувальник має послідовно ідентифікувати небезпеки, пов'язані з неконтрольованим рухом робота, падінням вантажу, защемленням, різальними крайками листових деталей, раптовою втратою тиску в пневмосистемі, а також з помилками оператора при наладці. Далі формується перелік захисних функцій, які мають бути реалізовані на рівні механіки, пневмовакуумної арматури, системи керування та організації робочого місця. Таким чином, стандартизований підхід

забезпечує структуровану інтеграцію вимог безпеки в процес проєктування захвату та робочого циклу.

Спеціалізовані вимоги до промислових роботів регламентуються стандартами ISO 10218-1 та ISO 10218-2, які встановлюють вимоги до конструкції самого робота та до інтегрованих роботизованих систем [84–85]. Вони визначають, зокрема, вимоги до систем обмеження робочого простору, контролю швидкості, зупинки в надзвичайних ситуаціях, а також до реалізації функцій безпечної зупинки приводу. Важливо, що в цих стандартах захватний пристрій розглядається як невід’ємна частина робочого органа, яка має бути врахована при оцінюванні ризиків, пов’язаних з ударом, проколом або падінням вантажу. Для вакуумних присосок це означає необхідність враховувати не тільки геометрію і масу виробу, а й режими вакуумування, ймовірність витоків, деградацію ущільнювальної кромки та наявність дублюючих присосок.

Для колаборативних роботів додаткові вимоги встановлені стандартом ISO/TS 15066, який деталізує допустимі режими спільної роботи людини і робота, обмеження швидкостей, сил і тисків при контакті, а також підходи до валідації безпечної взаємодії [86]. У задачах палетайзингу з вакуумними присосками це особливо важливо, оскільки оператор часто працює у безпосередній близькості до робота під час ручної подачі або відбору деталей, заміни піддонів, налагодження осередку. Колаборативний режим допускається лише там, де геометрія вантажу та конфігурація захвата не створюють неприйнятних ризиків проникнення чи проколювання. Сам вакуумний захват повинен бути конструктивно "неруйнівним" при випадковому контакті з тілом оператора, а ризик падіння завдяки одноразовій втраті вакууму має бути компенсований резервуванням присосок або використанням механічних утримувальних елементів.

Безпека пневматичних і вакуумних систем додатково регламентується стандартом ISO 4414, який встановлює загальні правила та вимоги безпеки для

пневматичних систем та їх компонентів [88]. Документ зобов'язує конструкторів забезпечувати передбачувану поведінку системи при втраті тиску, відмові живлення, розриві шланга або заклинюванні клапана. Для вакуумних захватів це означає необхідність застосування зворотних клапанів, вакуумних акумуляторів, клапанів безпеки і датчиків, які відповідають необхідному рівню надійності. Системи керування захисними функціями мають відповідати вимогам ISO 13849-1 щодо рівнів безпеки PL і враховувати вірогідність відмов елементів пневмовакуумної арматури [89]. Тому інтеграція датчиків вакууму, двоканальних схем контролю та діагностичних функцій є не лише проявом "доброї практики", а й безпосередньою вимогою ефективної реалізації концепції функціональної безпеки.

Порівняння вимог до промислових та колаборативних роботів, що виконують палетайзинг із вакуумними присосками, демонструє різні підходи до досягнення прийняттого рівня ризику. Для класичного промислового робота характерне використання огорожених зон, світлових завіс, блокувальних пристроїв і чітко відокремленого робочого простору. Це дозволяє реалізувати високі швидкості, великі прискорення та максимальну продуктивність за рахунок виключення оператора з небезпечної зони під час автоматичного циклу [84]. Основний ризик пов'язаний не з контактом робот - людина, а з падінням вантажу за межі огорожі, пошкодженням обладнання або вторинним травмуванням при відбитті листів чи пакетів. Для колаборативних сценаріїв, навпаки, оператор перебуває у спільному робочому просторі з роботом, тому допустимі швидкості, траєкторії та маса вантажу обмежуються так, щоб потенційний контакт не призводив до травм понад допустимі порогові значення [86]. У цьому випадку головний акцент робиться на обмеженні сил і тисків, плавності рухів, відсутності гострих крайок на захваті та вантажі, а також на візуальній й акустичній індикації стану системи.

Вакуумні присоски створюють специфічні ризики, пов'язані з можливим раптовим зривом деталі під дією інерційних навантажень, коливань тиску,

забруднення або деградації ущільнювальної кромки. У випадку палетайзингу листових матеріалів падіння великогабаритного листа чи пакета заготовок може призвести не лише до травмування персоналу, а й до пошкодження оснастки, сенсорів, кабельних трас, що викликає тривалі простої. Статистичні огляди впровадження роботів свідчать, що зростання рівня автоматизації у палетайзингу супроводжується підвищеними вимогами до надійності захватів, оскільки збій у захваті часто спричиняє зупинку всієї лінії [82, 90]. Тому під час оцінювання ризику необхідно враховувати не лише ймовірність одиначної відмови, а й системні наслідки у вигляді каскаду зупинок, накопичення заготовок у конвеєрних системах, блокування потоків матеріалів.

Важливий зв'язок між продуктивністю, якістю вакуумних присосок та експлуатаційною стійкістю проявляється через вплив дефектів і шорсткості кромки на утримувальну силу та час виходу на робочий вакуум. Нові, правильно підібрані за матеріалом і геометрією присоски забезпечують заданий коефіцієнт герметизації, що дозволяє досягати необхідного вакууму за соті чи десяті частки секунди, підтримувати високі прискорення та обмежувати запас по силі на безпечному рівні [81, 83]. У процесі експлуатації кромка присоски зазнає зношування, мікротріщин, проколів, забруднення мастилами та пилом, що зменшує ефективну площу контакту, збільшує витрати та змушує підвищувати час вакуумування або знижувати прискорення. Фактично, для підтримання прийнятного рівня ризику оператор або технолог змушені зменшувати швидкість роботи, збільшувати витримки перед початком руху та між операціями, що безпосередньо знижує продуктивність.

Різні типи експлуатаційних дефектів вакуумних присосок по-різному впливають на безпеку і продуктивність. Мікротріщини та абразивне зношування кромки зазвичай призводять до поступового зростання витоків і повільного падіння максимального вакууму. Це породжує приховану деградацію, яка проявляється у збільшенні часу вакуумування та зменшенні запасу утримувальної сили, але може

тривалий час залишатися непоміченою без чітко визначених критеріїв заміни [81, 88]. Локальні проколи або порізи, навпаки, створюють різке зростання витоків, що може відразу призвести до нездатності досягти заданого рівня розрідження. Деформація присоски (compression set) та втрата еластичності з часом змінюють профіль контакту, збільшують ефективну висоту мікрощілин і посилюють чутливість до шорсткості та хвилястості поверхні листа. З точки зору безпеки, повільні види деградації є особливо небезпечними, оскільки вони не викликають миттєвої відмови, але накопичуються й призводять до збільшення ризиків при пікових навантаженнях.

Охорона праці вимагає впровадження систематизованих процедур контролю стану вакуумних присосок, що включають регулярні огляди кромки, вимірювання твердості матеріалу, перевірку герметичності та тестування часу досягнення робочого вакууму при стандартному навантаженні. Такі процедури мають бути інтегровані в систему менеджменту якості підприємства та пов'язані з критеріями придатності, що формулюються виходячи з розрахункових резервів утримувальної сили та допустимих ризиків падіння вантажу [88–89]. Для осередків з підвищеною вартістю простою або з високими вимогами до безпеки доцільним є впровадження концепції прогностного обслуговування, коли дані про тиск, витрату повітря, кількість циклів, відсоток повторних захоплень та невдалих підйомів зберігаються та аналізуються для виявлення тенденцій деградації присосок. Такий підхід забезпечує перехід від реактивної заміни "за фактом" до планової заміни присосок за станом до досягнення критичного рівня ризику.

Системи керування універсальними роботами з вакуумними захватами повинні реалізовувати захисні функції відповідно до вимог ISO 13849-1 з урахуванням необхідного рівня виконання PL для конкретних небезпек [89]. На практиці це означає, що сигнали від датчиків вакууму, тиску в магістралі, стану зворотних клапанів і кінцевих вимикачів захвата мають оброблятися

двоканальними або діагностично контрольованими каналами, які при виникненні несправності примушують систему переходити в безпечний стан. Таким станом може бути зупинка рухів з обмеженим уповільненням, переміщення в безпечну зону, зниження вантажу на опору або блокування можливості запуску циклу без підтвердження герметичного захоплення. Особливу увагу слід приділяти сценаріям втрати енергії, зокрема падіння тиску в пневмосистемі або відключення живлення, коли утримувальна сила вакууму може швидко зменшуватися. У таких випадках застосовують вакуумні акумулятори, пружинні механізми утримання або додаткові механічні елементи, які забезпечують утримання вантажу протягом часу, достатнього для контрольованої зупинки.

Вимоги до безпеки суттєво відрізняються в залежності від типу роботи та сценарію його використання. Для промислових роботів, що працюють у відокремлених зонах палетайзингу, пріоритетом є забезпечення надійної фізичної ізоляції оператора від небезпечної зони та мінімізація ймовірності викиду вантажу через верх огорожі. Це досягається правильним вибором конфігурації захвату, орієнтації траєкторій, обмеженням прискорень у верхніх точках траєкторії та достатнім запасом утримувальної сили. Для колаборативних роботів, які переносить невеликі пакети або деталі у спільному просторі з оператором, на перший план виходять обмеження маси вантажу, контроль швидкості та плавності рухів, уникнення гострих крайок на вакуумних присосках і використання конструкцій із м'якими елементами, здатних демпфувати контакт з тілом людини [86]. У будь-якому випадку сумарний ризик оцінюється з урахуванням не тільки параметрів роботи, а й властивостей вантажу, шорсткості та геометрії його поверхонь, що впливають на стабільність захоплення.

Організаційні заходи охорони праці є необхідним доповненням до технічних рішень. Вони включають навчання персоналу особливостям роботи з роботизованими осередками з вакуумними захватами, роз'яснення ризиків,

пов'язаних з втручанням у зону дії робота, маніпулюванням листовими матеріалами та несанкціонованою зміною параметрів пневмовакуумних систем. Важливим є впровадження чітких процедур блокування та виведення з експлуатації, коли роботи з технічного обслуговування виконуються лише після повної розрядки пневмосистеми, зупинки робота та переведення його у безпечний режим відповідно до ІЕС 60204-1 [89]. Регулярні аудити відповідності вимогам міжнародних стандартів, аналіз інцидентів та майже інцидентів, а також залучення персоналу до процесів поліпшення безпеки забезпечують підтримання системи охорони праці в актуальному стані.

3.2. Безпека у надзвичайних умовах при використанні універсальних роботів на складальних операціях з використанням вакуумних присосок

Безпека роботизованих складальних осередків з універсальними роботами та вакуумними присосками визначається не лише коректністю алгоритмів керування та механічною надійністю, а й здатністю системи зберігати передбачувану поведінку в надзвичайних умовах. До таких умов належать раптова втрата вакууму, зникнення живлення, розгерметизація пневмоліній, несподівані зіткнення, помилки програмування, вихід за допустимий діапазон маси вантажу, а також зовнішні фактори виробничого середовища. Особливу небезпеку становлять операції з транспортування листових і плоских металевих деталей, де одночасно присутні значна маса, гострі кромки та великі габарити вантажу, що у разі падіння здатні створювати критичні ризики для персоналу та обладнання [88–89].

З позицій загальної безпеки машин надзвичайні умови розглядаються як поєднання ймовірних відмов та зовнішніх впливів, які можуть призвести до неконтрольованого руху, втрати утримання вантажу або небезпечного контакту з людиною. Міжнародний стандарт ISO 12100 встановлює рамку ідентифікації небезпек, оцінки та зниження ризику, яка застосовується й до роботизованих

осередків з вакуумними захватами [91]. Для промислових роботів додаткові вимоги формулюються у стандартах ISO 10218-1 та ISO 10218-2, де розглядаються специфічні ризики, пов'язані з програмованим рухом, траєкторіями, зонами досяжності та інтеграцією роботів у виробничу лінію [88–89]. Таким чином, аналіз безпеки у надзвичайних умовах повинен поєднувати підхід загальної машинобезпеки з урахуванням специфіки вакуумних систем та динаміки маніпулювання.

Ключові ризики у процесі палетайзингу та складальних операцій з вакуумними присосками можна поділити на кілька груп. Перша група пов'язана з падінням або неконтрольованим зміщенням вантажу внаслідок втрати вакууму, деградації присосок, неправильної оцінки маси або прискорень. Друга група включає механічні зіткнення робота з предметами або людьми у разі помилок програмування, відмови датчиків або порушення меж зон безпеки. Третю групу становлять ризики, пов'язані з пневматичною енергією, а саме розрив шлангів, шум, неконтрольовані рухи при раптовому розвантаженні енергії, що регламентуються вимогами ISO 4414 [93]. Четверта група охоплює ризики раптового пуску, відновлення живлення після аварійного вимкнення та відсутності передбачуваного переходу в безпечний стан, які розглядаються в ISO 12100, ISO 13849-1 та ISO 14118 [91–92].

У контексті вакуумних присосок особливо важливо зрозуміти фізичну природу відмов, що проявляються в надзвичайних умовах. Утримувальна сила присоски визначається добутком різниці тисків між атмосферою та вакуумною порожниною на ефективну площу герметичного контакту, з урахуванням коефіцієнта герметизації, який залежить від шорсткості поверхонь, стану кромки та дефектності матеріалу [94–96]. При зниженні тиску у пневмолінії, розгерметизації, засміченні вакуумного генератора або відмові клапанів диференціал тиску зменшується, відповідно утримувальна сила падає, тоді як інерційні сили від маси

листа та прискорень робота залишаються незмінними або зростають. У надзвичайних умовах, наприклад при аварійному гальмуванні чи неконтрольованому ударі, короточасні пікові прискорення можуть кратно перевищувати номінальні, що різко збільшує ризик зриву вантажу навіть при незначному погіршенні вакууму.

Якість та стан вакуумних присосок безпосередньо впливають на безпеку в аварійних режимах. Виробничі дефекти, такі як мікропори, повітряні пастки та усадочні раковини в зоні кромки, створюють локальні канали витоку, які в нормальному режимі можуть компенсуватися певним запасом вакууму, проте в аварійних умовах стають джерелом критичного падіння тиску [94–95]. Експлуатаційні дефекти, зокрема мікротріщини, проколи, зношування ущільнювальної кромки, залишкова деформація та термоокислювальне старіння матеріалу, змінюють мікрогеометрію та жорсткість кромки, зменшуючи ефективну площу контакту з виробом. У результаті коефіцієнт герметизації знижується, що потребує або обмеження прискорень робота, або збільшення діаметра та кількості присосок для збереження необхідного запасу утримувальної сили [95–96]. Якщо ці компенсуючі заходи не реалізовані, експлуатаційна деградація присосок перетворюється на прихований фактор небезпеки, який проявляється саме в надзвичайних ситуаціях.

Порівняння вимог до промислових та колаборативних роботів у контексті палетайзингу з вакуумними присосками є принципово важливим для коректної інтерпретації безпеки. Стандарти ISO 10218-1 і ISO 10218-2 описують класичні промислові роботизовані системи, які зазвичай працюють у відокремлених зонах з огороженнями, світловими завісами, міжблокуваннями та системами безпечного зупину, що запобігають присутності людини в зоні досяжності при роботі робота [88–89]. У таких системах основний акцент робиться на розділенні людини і робота, забезпеченні безпечного режиму при відкритті огорожень, а також на

функціональній безпеці системи керування, що реалізується відповідно до ISO 13849-1 з досягненням рівнів виконання PL d або PL e для критичних функцій безпеки [92]. Для палетайзингових роботів з вакуумними захватами це означає, що основні ризики для персоналу мають бути усунені за рахунок відсутності доступу до небезпечних зон, а ризики падіння вантажу сфокусовані переважно на захисті обладнання та вантажу.

Колаборативні роботи, регламентовані стандартом ISO/TS 15066, розглядають іншу парадигму безпеки, де допускається обмежена взаємодія людини та робота в одній робочій зоні [90]. Тут застосовуються такі режими, як контрольоване обмеження потужності та сили, а також контроль відстані та швидкості у режимі спільної роботи. Проте у випадку використання колаборативних роботів з вакуумними присосками для палетайзингу виникає додатковий клас ризиків, що пов'язаний з можливим падінням вантажу на людину. Обмеження сил при безпосередньому контакті руки робота з тілом оператора, які розраховуються у ISO/TS 15066, не враховують небезпеку інерційної маси вантажу, що може бути закріплений на вакуумних присосках. Таким чином, для колаборативних палетайзингових систем з вакуумними захватами стандартний підхід до оцінки допустимих сил і тиску на тіло людини є недостатнім. Необхідно доповнювати оцінюванням ризику падіння вантажу, визначенням допустимої маси та геометрії деталей, а також застосуванням додаткових конструктивних і організаційних заходів [90–91].

З позицій продуктивності, якості вакуумних присосок та експлуатаційної стійкості безпека в надзвичайних умовах визначається балансом між динамічними можливостями робота і запасами утримувальної сили. Прагнення до зменшення часу циклу спонукає до збільшення швидкостей і прискорень, зменшення витримок на формування вакууму, а іноді й до зниження коефіцієнтів запасу у розрахунках присосок [95–96]. Одночасно деградація присосок у процесі експлуатації, зміна

шорсткості кромки, забруднення поверхні виробів, коливання параметрів пневмосистеми та зношування вакуумних генераторів призводять до поступового зменшення фактичної утримувальної здатності. Якщо ці зміни не враховуються в регламенті обслуговування та контролю, у надзвичайній ситуації, наприклад при аварійному гальмуванні або раптовому відключенні живлення, результатом може стати неконтрольоване падіння вантажу незалежно від початкових розрахунків.

Конструктивні рішення вакуумних систем можуть суттєво підвищити безпеку у надзвичайних режимах. До таких рішень належать застосування зворотних клапанів безпеки безпосередньо біля присосок, використання вакуумних резервуарів для підтримання тиску протягом певного часу після втрати живлення, реалізація двоконтурних систем з незалежними генераторами та окремими каналами до різних груп присосок, що забезпечує часткове утримання вантажу при відмові одного контуру [94–95]. Також використовуються спеціальні «feathering» алгоритми керування, які забезпечують обмежене прискорення і плавне гальмування у разі виявлення падіння вакууму до порогового значення за даними датчиків. У системах високої відповідальності доцільним є застосування вакуумних сенсорів з діагностичною функцією, дублювання критичних сигналів і реалізація функцій безпечного зупину, виконаних на рівні PL d або PL e відповідно до ISO 13849-1 [92].

Важливим аспектом є інтеграція вимог безпеки у надзвичайних умовах в архітектуру системи керування роботизованим осередком. ISO 10218-2 та ISO 11161 наголошують на необхідності узгодження дій всіх компонентів інтегрованої виробничої системи при аварійних подіях, включно з роботами, конвеєрами, захватними пристроями, захисними огороженнями та блокуваннями [89]. Для вакуумних захватів це означає, що сигнал про критичне падіння вакууму повинен розглядатися як безпекова подія і викликати передбачуваний сценарій переходу у безпечний стан. Такий сценарій може передбачати негайне зменшення швидкості,

переміщення в зону безпечного скидання вантажу, контрольоване опускання деталі на стіл або зупинку руху з орієнтацією вантажу таким чином, щоб мінімізувати наслідки можливого падіння. Кожен із цих варіантів має бути підтверджений розрахунками допустимих прискорень, оцінкою маси вантажу та аналізом trajectories з точки зору зіткнень.

Специфічні вимоги висуваються до організації безпеки при транспортуванні металевих листів. Листи мають значну площу, порівняно малу товщину та часто гострі кромки, що при падінні створює різко виражену небезпеку порізів, ударів та притискання [88, 94]. У надзвичайних умовах навіть частковий зрив листа з однієї присоски може призвести до його провисання, розгойдування та ударів по елементам обладнання чи огороженням. Для мінімізації ризику застосовують конфігурації з надмірною кількістю присосок, оптимальне розташування точок захвату щодо центру мас, обмеження максимальної швидкості та прискорення, а також жорсткі критерії бракування присосок за ознаками механічних та візуальних дефектів. Додатково організаційні заходи мають передбачати заборону перебування операторів у небезпечних зонах під час маніпулювання листами, чітке маркування зон можливого падіння і застосування бар'єрів, здатних локалізувати траєкторію падіння.

Важливу роль у забезпеченні безпеки відіграє систематичний технічний огляд та обслуговування вакуумних присосок і пневмосистем. Міжнародні стандарти з менеджменту якості, зокрема ISO 9001, підкреслюють важливість процесного підходу та документування процедур контролю, що є релевантним і для управління ресурсом та станом захватних пристроїв [97]. На практиці це означає необхідність запровадження регламентів періодичного вимірювання вакууму під навантаженням, перевірки часу виходу на робочий вакуум, візуального та тактильного огляду кромки присосок, а також статистичного аналізу відмов захвату та незапланованих зупинок. Поєднання цих даних з інформацією про технологічні

параметри виготовлення присосок дає змогу формувати «ризикові профілі» партій виробів і коригувати режими виробництва та експлуатації ще до того, як дефекти проявляться у надзвичайних ситуаціях.

Сучасні підходи до безпечної експлуатації роботизованих осередків передбачають інтеграцію систем моніторингу стану вакууму, роботи пневмосистем і параметрів циклу у цифрові платформи, зокрема у контексті рамкових стандартів цифрових двійників ISO 23247 та норм з моніторингу стану машин ISO 17359 і ISO 13374 [96–97]. У таких системах дані про рівень вакууму, тиск у пневмолініях, час формування вакууму, кількість повторних захоплень, ресурси присосок та інциденти фіксуються у режимі реального часу та аналізуються алгоритмами, які можуть виявляти тенденції до погіршення стану. Це дозволяє переходити від реактивного обслуговування до прогностного, коли присоски замінюються або процеси коригуються до настання критичного рівня деградації, що суттєво зменшує ймовірність небажаних подій у надзвичайних умовах [96].

Порівняльний аналіз промислових та колаборативних систем показує, що для палетайзингу з вакуумними присосками важливо не стільки формальне віднесення робота до того чи іншого класу, скільки фактичне управління ризиками падіння вантажу, зіткнення та несподіваного запуску. У традиційних промислових осередках основним засобом зниження ризику є фізичне відділення людини, а у колаборативних системах необхідно додатково обмежувати масу, швидкість та траєкторії вантажу, що переміщується, або локально посилювати захист огороженнями, якщо ризик падіння не може бути знижений до прийнятного рівня [88–90]. В обох випадках якість вакуумних присосок, їх здатність зберігати герметичність у часі, стабільність характеристик при зміні температури, забрудненні та старінні матеріалу визначають фактичну експлуатаційну стійкість системи, а отже і її поведінку у надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

1. Узагальнюючи критичні висновки огляду, можна стверджувати, що сучасний стан досліджень забезпечує достатню теоретичну базу для вибору типу захвата (VGD, JGD або комбіновані рішення) і первинного інженерного розрахунку утримувальної здатності. Однак найбільш «дефіцитною» ланкою лишається кількісне зв'язування якості виготовлення і деградації присоски з часовими параметрами вакуумування і з імовірністю відмов у динамічних режимах роботи. Відповідно, перспективними є роботи, де фізичні моделі доповнюються даними експлуатації та статистичними методами групування режимів, а інженерні рекомендації формулюються не тільки за геометричними дефектами, але й за функціональними метриками «продуктивність плюс безвідмовність» у межах вимог міжнародних стандартів.

2. Узагальнюючи, особливості конструкції вакуумних присосок визначаються необхідністю формувати стабільне ущільнення при мінімальному часі захоплення і достатньому запасі стійкості до динамічних навантажень маніпулятора. Деградація експлуатаційних властивостей проявляється передусім у зміні стану ущільнювальної кромки, твердості та залишкової деформації еластомеру, що фізично веде до збільшення витоків через мікроканали та зниження доступного перепаду тиску, а отже до зменшення утримувальної сили та подовження часу досягнення вакууму. Відмінність впливу дефектів полягає у різній «траєкторії втрат»: абразивний знос і шорсткість переважно знижують продуктивність через збільшення часу захоплення, порізи та тріщини створюють ризик раптових відмов, залишкова деформація і затвердіння обмежують допустиму динаміку руху робота, а забруднення знижує точність і підвищує частку коригувальних дій. Розрахунковий приклад показує, що навіть відносно помірне зростання шорсткості кромки здатне збільшити час захоплення на десятки частки секунди та змусити перейти до більш консервативних прискорень, що у сумі дає двозначне зниження

продуктивності та підвищує ризики нестабільності палетайзингу. Тому в роботизованому складанні доцільно розглядати вакуумну присоску як елемент, стан якого прямо впливає на такт лінії, енергоспоживання та безвідмовність, а її заміну та профілактику слід планувати на основі вимірюваних показників витоків і часу встановлення вакууму, а не лише за календарним ресурсом.

3. У контексті роботизованих складальних операцій особливого значення набуває інтеграція знань про технологію виготовлення присосок, властивості матеріалів та механізми формування дефектів у єдину систему вибору захвату. Вибір матеріалу повинен враховувати температуру, наявність зварювальних аерозолів, мастил і пилу, шорсткість і геометрію листів, допустимі прискорення і вартість простоїв. Вибір технології виробництва визначає розкид шорсткості і дефектності кромки у серійному виробництві, а також стабільність параметрів у часі. При цьому саме відмінності у впливі окремих дефектів на продуктивність визначають пріоритети у контролі якості. Для LSR технологій першочерговими стають контроль зазору форми і видалення облоя; для поліуретанових присосок головним є контроль дегазації і режимів отвердіння; для ТРЕ критичними залишаються шорсткість форми і баланс температури форми та розплаву. У сукупності це формує технічну основу для обґрунтованого підбору вакуумних присосок і параметрів їх виробництва, спрямованого на забезпечення стабільної продуктивності та безвідмовності роботизованих захватів.

3. Моделі машинного навчання дозволили перейти від суто емпіричного підбору режимів до формалізованого підходу, у якому оптимальні значення температур, часу витримки, швидкості охолодження та інших параметрів визначаються на основі побудованої регресійної моделі шорсткості кромки. Це створює підґрунтя для обґрунтованого проектування технологічних режимів виробництва вакуумних присосок із гарантованою якістю поверхні, що, у свою чергу, прямо впливає на герметичність,

утримувальну здатність та продуктивність роботи вакуумних захватів універсального робота у складальних операціях.

4. Охорона праці при використанні універсальних роботів на складальних операціях з вакуумними присосками базується на інтегрованому підході, що поєднує стандартизоване оцінювання ризиків, технічну реалізацію функціональної безпеки, високу якість та експлуатаційну стійкість вакуумних присосок, а також організаційні заходи. Міжнародні стандарти ISO 12100, ISO 10218, ISO/TS 15066, ISO 4414 та ISO 13849 задають методологічну рамку для проєктування безпечних роботизованих осередків, а якість вакуумних присосок та їх здатність зберігати утримувальну здатність упродовж ресурсу роботи визначають фактичний рівень ризику падіння вантажу та продуктивність палетайзингу. Врахування деградації присосок, моніторинг вакууму та впровадження процедур прогнозного обслуговування дозволяють перейти від реактивного до керованого управління безпекою, що є ключовою умовою надійної та ефективної експлуатації універсальних роботів у складальних процесах.

5. Безпека у надзвичайних умовах при використанні універсальних роботів на складальних операціях з вакуумними присосками є функцією цілісного поєднання конструктивних, технологічних, системних та організаційних рішень. Вона базується на вимогах міжнародних стандартів машинобезпеки та робототехніки, враховує фізичні закономірності роботи вакуумних систем, деградацію присосок і вплив шорсткості, а також пов'язує продуктивність, якість та експлуатаційну стійкість в єдину систему управління ризиками. Саме такий підхід дозволяє забезпечити не лише номінальну відповідність нормативам, а й реальну безпечну роботу роботизованих складальних осередків у умовах, близьких до граничних, включно з аварійними ситуаціями та надзвичайними режимами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Monkman G. J., Hesse S., Stein M., Schunk H. Robot Grippers. Weinheim : Wiley-VCH, 2007.
2. Bicchi A., Kumar V. Robotic Grasping and Contact: A Review // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2000.
3. Carbone G. (ed.). Grasping in Robotics. London : Springer, 2013.
4. Birglen L., Schlicht T. A statistical review of industrial grippers // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2018.
5. Bogue R. The development of robotic grippers and end effectors // Industrial Robot: An International Journal. 2012.
6. Fantoni G. et al. Grasping force modeling for suction cups in industrial manipulation. 2014.
7. Raval D., Patel V. Design and analysis of vacuum gripper for material handling. 2016.
8. Chen T. Analytical model of suction cup holding force. 1982.
9. Erzincanli F., Sharp J. Bernoulli gripper: analysis and application. 1997.
10. Armengol J. et al. Non-contact handling using Bernoulli grippers. 2008.
11. Li Y., Kagawa T. Modeling and design of Bernoulli-type grippers. 2014.
12. Kamensky V. et al. Jet grippers for delicate products: experimental and numerical aspects. 2019.
13. Gent A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. Munich : Hanser Publishers, 2012.
14. Rodgers B. Rubber Compounding: Chemistry and Applications. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016.
15. Clemitson I. R. Polyurethane Casting Primer. Boca Raton : CRC Press, 2011.

- 16.Bont M., Barry C., Johnston S. Liquid silicone rubber injection molding: process variables and modeling // Polymer Engineering & Science. 2021.
- 17.Gim J., Turng L.-S. High surface quality injection molding: influencing factors and control // Polymer Testing. 2022.
- 18.Stanek M. et al. Mold surface roughness influence on rubber and TPE flow and surface quality // Materials Science Forum. 2019.
- 19.Abhilash M. et al. Cryogenic deflashing for rubber products // MATEC Web of Conferences. 2018.
- 20.ISO 12100:2010. Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : ISO, 2010.
- 21.ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power. General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : ISO, 2010.
- 22.ISO 13849-1:2023. Safety of machinery. Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design. Geneva : ISO, 2023.
- 23.ISO 10218-1:2025. Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots. Geneva : ISO, 2025.
- 24.ISO 10218-2:2025. Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration. Geneva : ISO, 2025.
- 25.ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices. Collaborative robots. Geneva : ISO, 2016.
- 26.Wolf A., Schunk H. End-of-arm tooling and industrial gripping: design considerations. 2019.
- 27.Lien T. K., Davis B. End-effector selection and cycle time impact in robotic assembly. 2008.
- 28.Koustoumpardis P., Aspragathos N. Gripping solutions for textile and flexible objects. 2004.

- 29.Reddy B., Suresh K. Pneumatic grippers in automation: comparative assessment. 2013.
- 30.Long P. et al. Vacuum gripping in industrial handling: reliability factors. 2020.
- 31.Boubekri N., Chakraborty S. Vacuum end-effectors: design and analysis considerations. 2002.
- 32.Mykhailyshyn R. et al. Energy-efficiency issues of pneumatic handling systems. 2019.
- 33.Maruschak P. et al. Degradation mechanisms of elastomers under cyclic loading. 2019.
- 34.Shi Z., Li Y. Jet-based non-contact manipulation: stability and control. 2016.
- 35.Brown E. et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 2010.
- 36.Polygerinos P. et al. Soft robotic grippers: design, modeling, and applications. 2017.
- 37.Rus D., Tolley M. T. Design, fabrication and control of soft robots // Nature. 2015.
- 38.O'Hanlon J. F. A User's Guide to Vacuum Technology. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2003.
- 39.Roth A. Vacuum Technology. 3rd ed. Amsterdam : Elsevier, 1990.
- 40.Schmalz. Vacuum Technology Handbook: technical documentation on suction cups and vacuum systems. Glatten : J. Schmalz GmbH, [рік видання не зазначено].
- 41.Festo. Technical documentation on pneumatic grippers and vacuum generators. Esslingen am Neckar : Festo SE & Co. KG, [рік видання не зазначено].
- 42.International Federation of Robotics (IFR). World Robotics: Industrial Robots. Frankfurt am Main : IFR, [рік(и) видання залежно від випуску].

- 43.ISO 9409-1:2004. Manipulating industrial robots. Mechanical interfaces. Part 1: Plates. Geneva : ISO, 2004.
- 44.ISO 8573 (серія стандартів). Compressed air. Contaminants and purity classes. Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 45.ISO 4413:2010. Hydraulic fluid power. General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : ISO, 2010.
- 46.ISO 11161:2007. Safety of machinery. Integrated manufacturing systems. Basic requirements. Geneva : ISO, 2007.
- 47.IEC 60204-1:2016. Safety of machinery. Electrical equipment of machines. Part 1: General requirements. Geneva : IEC, 2016.
- 48.ISO 13850:2015. Safety of machinery. Emergency stop function. Principles for design. Geneva : ISO, 2015.
- 49.ISO 14119:2013. Safety of machinery. Interlocking devices associated with guards. Principles for design and selection. Geneva : ISO, 2013.
- 50.ISO 14120:2015. Safety of machinery. Guards. General requirements for the design and construction of fixed and movable guards. Geneva : ISO, 2015.
- 51.ISO 14118:2017. Safety of machinery. Prevention of unexpected start-up. Geneva : ISO, 2017.
- 52.ISO 16092 (серія стандартів). Machine tools safety. Presses (safety requirements for presses). Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 53.ISO 14955 (серія стандартів). Machine tools. Environmental evaluation of machine tools. Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 54.ISO 23247 (серія стандартів). Automation systems and integration. Digital twin framework for manufacturing. Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 55.ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines. Geneva : ISO, 2018.

- 56.ISO 13374 (серія стандартів). Condition monitoring and diagnostics of machines. Data processing, communication and presentation. Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 57.ISO 13381 (серія стандартів). Condition monitoring and diagnostics of machines. Prognostics. Geneva : ISO, [роки видання залежно від частини].
- 58.ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Geneva : ISO, 2015.
51. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2008. 232 с.
52. Павленко І. І., Годунко М. О. Захватні пристрої роботів : навч. посіб. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 368 с.
53. Арендаренко В. М., Іванов О. М. Вакуумна техніка та технологій : навч. посіб. Полтава, 2019. 68 с.
54. Чекулаєв Є. Ф., Люта А. В. Гідропневмоприводи та пристрої автоматики : навч. посіб. 2-ге вид. Краматорськ : ДДМА, 2020. 172 с.
55. Tai K., El-Sayed A.-R., Shahriari M., Biglarbegian M., Mahmud S. State of the Art Robotic Grippers and Applications. Robotics. 2016. Vol. 5, No. 2. Art. 11. P. 1–20. DOI: 10.3390/robotics5020011.
56. Gabriel F., Fahning M., Meiners J., Dietrich F., Dröder K. Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. Production Engineering. 2020. Vol. 14. P. 545–554. DOI: 10.1007/s11740-020-00990-9.
57. Persson B. N. J., Yang C. Theory of the leak-rate of seals. Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. 315011. DOI: 10.1088/0953-8984/20/31/315011.
58. Greenwood J. A., Williamson J. B. P. Contact of nominally flat surfaces. Proceedings of the Royal Society A. 1966. Vol. 295, No. 1442. P. 300–319. DOI: 10.1098/rspa.1966.0242.
59. O’Hanlon J. F. A User’s Guide to Vacuum Technology. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 516 p. DOI: 10.1002/0471467162.

60. Gent A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. München : Hanser, 2012. 480 p. DOI: 10.3139/9781569906987.
61. Monkman G. J., Hesse S., Stein M., Schunk H. Robot Grippers. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 450 p.
62. Gent A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. Munich : Hanser Publishers, 2012. 433 p.
63. Rodgers B. Rubber Compounding: Chemistry and Applications. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 624 p.
64. O'Hanlon J. F. A User's Guide to Vacuum Technology. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 528 p.
65. Bont M., Barry C., Johnston S. A review of liquid silicone rubber injection molding: Process variables and process modeling // Polymer Engineering & Science. 2021. Vol. 61, № 2. P. 331–347.
66. Stanek M., Ovsik M., Manas M., Reznicek M., Fluxa P. Fluidity of rubber and TPE influenced by mold surface roughness // Materials Science Forum. 2019. Vol. 952. P. 198–206.
67. Abhilash M., Naveen Prakash G. V., Kasthuriengan S. Cryogenic Deflashing for Rubber Products // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 144. Art. 03004. 5 p.
68. Maruschak P. O., Bishchak R. T., Sorochak A. P., Panin S. V. Degradation mechanisms of elastomers under cyclic loading // Materials Science. 2019. Vol. 54, № 3. P. 345–356.
69. ISO 12100:2010. Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : International Organization for Standardization, 2010. 88 p.
70. ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power. General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : International Organization for Standardization, 2010. 106 p.

71. Whitehouse D. J. Surfaces and their Measurement. London : Hermes Penton, 2002. 300 p.
72. Gent A. N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. 3rd ed. Munich : Hanser Publishers, 2012. 433 p. DOI:10.3139/9783446428713.
73. Rodgers B. Rubber Compounding: Chemistry and Applications. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 624 p. DOI:10.1201/b18931.
74. Monkman G. J., Hesse S., Stein M., Schunk H. Robot Grippers. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 450 p.
75. Bont M., Barry C., Johnston S. A review of liquid silicone rubber injection molding: Process variables and process modeling // Polymer Engineering & Science. 2021. Vol. 61, № 2. P. 331–347. DOI:10.1002/pen.25618.
76. Gim J., Turng L.-S. A review of current advancements in high surface quality injection molding: Measurement, influencing factors, prediction, and control // Polymer Testing. 2022. Vol. 115. Art. 107718. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107718.
77. Stanek M., Ovsik M., Manas M., Reznicek M., Fluxa P. Fluidity of rubber and TPE influenced by mold surface roughness // Materials Science Forum. 2019. Vol. 952. P. 198–206. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.952.198.
78. O'Hanlon J. F. A User's Guide to Vacuum Technology. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 528 p.
79. Schmalz J. Vacuum Technology Handbook : technical documentation on suction cups and vacuum systems. Glatten : J. Schmalz GmbH, 2019. 120 p.
80. Festo. Pneumatic grippers and vacuum generators : technical catalogue. Esslingen : Festo AG & Co. KG, 2020. 210 p.
81. Monkman G. J., Hesse S., Stein M., Schunk H. Robot Grippers. Weinheim : Wiley VCH, 2007. 459 p.

82. Bicchi A., Kumar V. Robotic grasping and contact. In: Siciliano B., Khatib O. (eds.). Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Cham : Springer, 2016. P. 869–884.
83. Bogue R. The development of robotic grippers and end effectors. Industrial Robot. 2012. Vol. 39, No. 4. P. 317–322.
84. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots. Geneva : ISO, 2011. 52 p.
85. ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration. Geneva : ISO, 2011. 74 p.
86. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices. Collaborative robots. Geneva : ISO, 2016. 33 p.
87. ISO 12100:2010 Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : ISO, 2010. 84 p.
88. ISO 4414:2010 Pneumatic fluid power. General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : ISO, 2010. 64 p.
89. ISO 13849-1:2015 Safety of machinery. Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design. Geneva : ISO, 2015. 98 p.
90. International Federation of Robotics. World Robotics 2023. Industrial Robots. Statistical yearbook. Frankfurt am Main : IFR, 2023. 350 p.
91. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2011.
92. ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration. Geneva : International Organization for Standardization, 2011.
93. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices. Collaborative robots. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.

- 94.ISO 12100:2010 Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Geneva : International Organization for Standardization, 2010.
- 95.ISO 13849-1:2015 Safety of machinery. Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
- 96.ISO 4414:2010 Pneumatic fluid power. General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : International Organization for Standardization, 2010.
- 97.O'Hanlon J. F. A User's Guide to Vacuum Technology. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2003. 528 p.
- 98.Monkman G. J., Hesse S., Stein M., Schunk H. Robot Grippers. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 450 p.