

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: «ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ЗАХВАТІВ
УНІВЕРСАЛЬНОГО РОБОТА НА СКЛАДАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Назарій БАКУСЬКО
(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

БАКУСЬКО Назарій Тарасович

1. Тема роботи: «Обґрунтування параметрів пневматичних захватів універсальної роботи на складальних операціях»

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 работ: довідкова література, каталоги, методики використання технологій складальних операцій, вимоги до вакуумних присосок, 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	Визначення ефективності використання робіт	29.09.25-31.10.25	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	03.11.24-14.11.25	Виконано
7	Оформлення графічної частини	17.11.25-28.11.25	Виконано

Студент _____ Назарій БАКУСЬКО
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 621.865:621.51:621.9

Обґрунтування параметрів пневматичних захватів універсального робота на складальних операціях. Бакусько Назарій Тарасович. Кафедра машинобудування. Дубляни, Львівський НУВМБТ. 2025.

92 с. текст. част., 16 рис., 65 літературних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано системний аналіз конструктивних і функціональних особливостей пневматичних захватів універсальних роботів у складальних операціях, зосереджений на зв'язку між силовою взаємодією з деталлю, кінематикою руху маніпулятора та часовими характеристиками пневмосистеми. Порівняно механічні пневмозахвати і вакуумні захвати на основі присосок з позицій продуктивності, повторюваності базування та чутливості до стану контактних елементів і якості поверхні. Показано, що деградація вакуумних присосок у вигляді зношування кромки, мікротріщин, проколів і залишкової деформації знижує утримувальну силу та збільшує час формування вакууму, що змушує обмежувати прискорення і вводити додаткові витримки, зменшуючи продуктивність роботизованого циклу.

Розглянуто вплив технологій виготовлення присосок на дефектність, які визначають герметичність контакту, витіки та ресурс. Для структурування технологічних режимів застосовано кластеризаційний аналіз K-means, який дозволив виділити фізично інтерпретовані групи режимів у просторі параметрів `max_temperature`, `energy_density`, `cooling_rate` і `defect_size` та визначити технологічні межі забезпечення стабільної якості. Проаналізовано ризики безпеки при транспортуванні металевих листів і сформовано вимоги до функціональної безпеки відповідно до ISO 10218, ISO/TS 15066, ISO 4414, ISO 13849 та ISO 12100.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Види пневматичних захватів для роботів, їх особливості	11
1.2 Види вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів, їх особливості	22
1.3. Критерії якості вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів	27
2 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
2.1 Матеріали вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів	34
2.2. Основні дефекти та експлуатаційні пошкодження вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів	39
2.3. Основні технології виготовлення вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів в залежності від типу матеріалу	47
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	71
3.1. Охорона праці при використанні пневматичних захватів універсального робота	71
3.2 . Безпека у надзвичайних умовах при використанні пневмосистем для пневматичних захватів універсального робота	77
ВИСНОВКИ	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування та суміжних галузей переробної промисловості супроводжується інтенсивним переходом до гнучких роботизованих складальних ліній, здатних забезпечити стабільну якість виробів за умов високої номенклатурної мінливості, обмежень за часом циклу та підвищених вимог до виробничої безпеки. У такому середовищі універсальні роботи все частіше виконують не лише операції переміщення й позиціонування, а й функції точного базування, подачі заготовок до кондукторів, палетайзингу та міжопераційного транспортування плоских і габаритних деталей. Ключовим елементом, що визначає реальну продуктивність та безвідмовність таких систем, є захватний пристрій, оскільки саме він формує силову взаємодію з деталлю та вводить технологічні обмеження на кінематику маніпулятора. Для складальних операцій особливо поширеними є пневматичні захвати, включно з механічними пневмозахватами та вакуумними системами на основі присосок, які забезпечують швидкість спрацьовування, конструктивну простоту та інтегрованість із промисловими системами керування.

Практика експлуатації роботизованих осередків показує, що пневматичний захват доцільно розглядати як компонент, який одночасно визначає допустимі прискорення та швидкості руху робота, а також формує структуру допоміжного часу циклу через інерційність пневмосистеми, затримки наростання вакууму, стабілізацію тиску та алгоритми підтвердження захоплення. Механічні пневмозахвати зазвичай забезпечують високу повторюваність базування і короткий час спрацьовування, однак їх застосування для тонких або плоских виробів часто обмежується ризиком локального пошкодження поверхні та недостатньою площею контакту. Вакуумні захвати, навпаки, забезпечують технологічну гнучкість для маніпулювання листовими заготовками, деталями з великою площею, пакуванням і виробами зі складною геометрією, проте істотно залежать від стану гумових або полімерних контактних елементів, якості поверхні деталі та герметичності

контакту. Внаслідок цього фактична продуктивність вакуумного палетайзингу визначається не лише номінальним рівнем розрідження, а й витоками, дефектністю присоски, умовами забруднення та динамікою переміщень робота, які можуть спричиняти зсув або відрив деталі при пікових прискореннях.

Додатковим чинником актуальності є те, що деградація вакуумних присосок у реальних умовах складального виробництва має системний характер і проявляється як зношування ущільнювальної кромки, мікротріщини, проколи, залишкова деформація, зміна еластичності та передчасне старіння матеріалу. Такі дефекти прямо впливають на герметичність прилягання, швидкість формування вакууму та утримувальну силу, а отже змушують знижувати прискорення маніпулятора та вводити додаткові витримки, що зменшує продуктивність на десятки відсотків навіть без явних аварійних падінь деталей. У виробничих лініях, де після маніпулювання й базування виконуються наступні технологічні операції, зокрема роботизоване зварювання вузлів, нестабільність захвату набуває подвійного ефекту. З одного боку, зростають повторні захоплення і час циклу, з іншого боку, погіршується точність позиціонування, що здатне змінювати зазори та взаємне перекриття кромки у складальному вузлі і опосередковано впливати на якість технологічного процесу, включно з формуванням з'єднань та залишковими напруженнями. За таких умов обґрунтування параметрів пневматичних захватів перестає бути суто конструктивним вибором і перетворюється на інженерну задачу забезпечення одночасно продуктивності, надійності й технологічної якості.

Суттєвим аспектом проблематики є зв'язок між експлуатаційною якістю присосок і технологіями їх виготовлення. Режим нагрівання та охолодження, енергонасиченість процесу формування, стан прес-форми та післяобробка визначають дефектність і шорсткість робочої кромки, які безпосередньо впливають на витоки, стабільність вакуумування та ресурс присоски. Практично це означає, що параметри технологічного процесу виготовлення присосок формують «технологічні вікна», у яких досягаються мінімальні дефекти, прогнозована шорсткість та стабільний час виходу на робочий вакуум. Для інженерного

управління якістю є доцільним не лише контролювати окремі параметри, а й виявляти типові групи режимів, які призводять до схожої дефектності та експлуатаційної поведінки. У цьому контексті застосування методів кластеризації, зокрема K-means, дає змогу структурувати результати технологічних спостережень та пов'язати параметри процесу виготовлення з показниками дефектності і стабільності вакуумного захвату. Встановлення того, що пари ознак на кшталт максимальної температури та енергонасиченості, а також швидкості охолодження і розміру дефектів найкраще відділяють кластери режимів, має прикладне значення, оскільки саме ці змінні безпосередньо пов'язані з керованістю процесу і можуть бути покладені в основу виробничого контролю.

Окремого розгляду потребує безпека роботизованих складальних осередків із пневмосистемами, особливо за умов транспортування металевих листів і плоских заготовок. Листові матеріали поєднують значну площу й масу з гострими кромками та схильністю до прогинання, що створює підвищені ризики при раптовій втраті вакууму, коливаннях тиску в пневмолініях або відмовах сенсорів. У надзвичайних ситуаціях вирішальним стає здатність системи керування забезпечити передбачуваний перехід у безпечний стан і зменшити ймовірність падіння вантажу шляхом резервування контурів, застосування зворотних клапанів, моніторингу вакууму та коректного алгоритму аварійного уповільнення. Міжнародні стандарти безпеки промислових роботів, пневматичних систем та оцінювання ризиків, зокрема ISO 10218, ISO/TS 15066, ISO 4414, ISO 13849 та ISO 12100, задають вимоги до архітектури функціональної безпеки, діагностики відмов і запобігання небезпечним рухам. Водночас практичний вибір захвату вимагає порівняння безпеки різних типів пневматичних захватів з урахуванням властивостей вантажу, стану поверхні, характеру забруднень та вартості простоїв лінії, особливо коли наступні операції є високовартісними та чутливими до зміщень базування.

У зв'язку з наведеним мета магістерської роботи полягає в обґрунтуванні параметрів пневматичних захватів універсального робота на складальних операціях з урахуванням продуктивності циклу, надійності вакуумного утримання, впливу

дефектності та шорсткості присосок, а також вимог міжнародних стандартів безпеки при роботі в нормальних і надзвичайних умовах. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається виконати системний аналіз типів пневматичних захватів та їх придатності до маніпулювання плоскими і листовими деталями, встановити причинно-наслідкові зв'язки між герметичністю присоски, витокami, часом формування вакууму, допустимими прискореннями робота і фактичною продуктивністю палетайзингу, а також розробити інженерні розрахункові підходи до вибору геометрії та матеріалу присосок з урахуванням стану поверхні деталей. Важливою частиною дослідження є оцінювання впливу деградації присосок на утримувальну силу й часові параметри циклу, формування рекомендацій щодо регламенту контролю стану кромки та критеріїв придатності присосок у виробництві, а також аналіз технологій виготовлення присосок і їхнього впливу на дефектність і шорсткість. Для підвищення достовірності обґрунтувань передбачається використати дані технологічних параметрів виготовлення та результати контролю якості для кластеризації режимів, що дасть змогу виділяти технологічні вікна стабільної якості та формувати керовані рекомендації для виробництва. Окремо в роботі розглядаються питання охорони праці та безпеки у надзвичайних умовах, включно з аналізом ризиків при транспортуванні металевих листів і порівнянням безпекових характеристик різних типів пневматичних захватів відповідно до вимог міжнародних стандартів.

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

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

Наукова новизна роботи полягає у комплексному поєднанні розрахунку утримувальної сили та часових характеристик вакуумування з аналізом деградації присосок і технологій їх виготовлення, а також у застосуванні кластеризаційного аналізу для виділення фізично інтерпретованих груп технологічних режимів, що формують відмінні рівні дефектності та експлуатаційної стабільності. Такий підхід створює можливість переходу від реактивного обслуговування захватів до керованого вибору параметрів, що узгоджується з вимогами функціональної безпеки та підвищення загальної ефективності обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні обґрунтованих рекомендацій щодо вибору типу пневматичного захвату та параметрів вакуумних присосок для різних умов складальних операцій, включно з маніпулюванням сухими листами з мінімальними геометричними відхиленнями та роботизованими лініями, чутливими до простоїв і забруднень поверхні. Запропоновані підходи дозволяють пов'язати якість присосок із тактом роботи робота та ймовірністю відмов, обґрунтувати регламенти контролю стану кромки і критерії заміни за експлуатаційними показниками, а також визначити пріоритетні параметри технологічного процесу виготовлення присосок, які мають контролюватися для забезпечення стабільної герметичності та мінімізації дефектів. Дотримання вимог міжнародних стандартів безпеки та розроблення заходів для надзвичайних режимів експлуатації створює передумови для безпечної інтеграції пневматичних захватів у роботизовані осередки транспортування металевих листів і палетайзингу, підвищуючи загальну надійність та конкурентоспроможність виробничих систем.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Види пневматичних захватів для роботів, їх особливості

Пневматичні захвати належать до групи кінцевих виконавчих органів робота, що перетворюють енергію стисненого повітря на кероване зусилля утримання та забезпечують перенесення, орієнтацію і позиціювання деталей під час складальних операцій. Їхня актуальність у роботизованому складанні зумовлена поєднанням відносно простої конструкції, високої динаміки спрацьовування, технологічної стійкості до запиленості та можливості модульного компонування під конкретну номенклатуру виробів. Водночас пневматичний принцип приводу створює низку інженерних компромісів: зусилля та швидкодія істотно залежать від тиску й витрати повітря, якості підготовки повітря та стану арматури, а для вакуумних рішень критичною стає герметичність контакту присоски з поверхнею та стабільність вакууму в часі [2, 8]. Для універсального робота на складальних операціях це означає, що вибір типу захвату та обґрунтування його параметрів мають виконуватися одночасно з урахуванням механіки контакту, кінематики траєкторій, такту лінії та ризиків відмов, оскільки навіть невелике зниження запасу утримання може призвести до зривів, падіння деталей і непродуктивних простоїв, що непропорційно погіршує фактичну продуктивність [9].

Класифікацію пневматичних захватів доцільно вести за способом формування утримувального зусилля та характером контакту з деталлю. Найпоширенішими є механічні захвати з пневмоциліндром або пневмоприводом, де зусилля передається через пальці чи губки на поверхню деталі. Для складальних операцій типові паралельні двопальцеві захвати, кутові захвати та трипальцеві самоцентрувальні рішення, які забезпечують відтворюваність базування та достатню жорсткість при установці у пристосування або при введенні в посадку [1,

3]. Окрему групу становлять вакуумні захвати, в яких утримання формується різницею тисків між атмосферою та розрідженням у порожнині присоски; вакуум часто генерується пневматичним ежектором за принципом Вентурі, що дозволяє інтегрувати захват без електричного вакуумного насоса, але підвищує залежність від витрати стисненого повітря [5–6]. Універсальні роботизовані складальні осередки часто застосовують комбіновані конструкції, де пневматичний паралельний захват виконує точне базування та орієнтацію, а вакуумний модуль забезпечує швидке захоплення плоских або коробчастих виробів для пакування чи палетайзингу; така інтеграція зменшує кількість переналагоджень і підвищує гнучкість, але вимагає узгодження масоінерційних характеристик та інтерфейсу кріплення з роботом [7].

Особливості процесу використання пневмозахватів у роботизованому складанні насамперед визначаються тим, що захват є частиною пневмосистеми зі скінченними об'ємами, опорами, затримками та стохастичними витоками. На рівні циклу «підхід, захоплення, перенесення, установка, відпуск» ключовими стають час наростання зусилля та повторюваність цього часу, оскільки вони визначають, наскільки стабільно робот може виконувати рухи без додаткових витримок і перевірок. Для механічного захвату час спрацьовування визначається ходом губок, ефективною площею поршня, тиском у магістралі, пропускною здатністю клапанів і довжиною пневмоліній; для вакуумного захвату додається етап евакуації повітря з порожнини присоски та шлангів до досягнення заданого рівня вакууму, причому наявність мікровитоків або пористості контакту збільшує цей час і робить його чутливим до стану гумових елементів та чистоти поверхні деталі [5–6]. У практиці складальних операцій це проявляється як необхідність впровадження датчиків положення губок, вакуумних реле та логіки підтвердження захоплення, щоб запобігти перенесенню деталі при недостатньому утриманні; проте така діагностика підвищує надійність ціною додаткового часу контролю, тому техніко-

економічно доцільніше забезпечити достатній запас утримувального зусилля та мінімізувати невизначеність контакту, ніж компенсувати її збільшенням витримок у циклі [2, 9].

Параметри пневматичних захватів для універсального робота на складальних операціях обґрунтовують через взаємопов'язані вимоги до зусилля, швидкодії, точності позиціонування та маси кінцевого органа. Для механічного захвату розрахункове зусилля губок у першому наближенні визначають як $F = p \cdot A \cdot \eta$, де p є надлишковим тиском у порожнині приводу, A є ефективною площею поршня, η є коефіцієнтом, що враховує втрати на тертя та кінематичні перетворення механізму [2]. Умови утримання формалізують нерівністю $F \cdot \mu \geq m \cdot (a + g) \cdot S$ для найгіршого випадку, коли деталь схильна до вислизання під дією інерційних навантажень; μ є коефіцієнтом тертя контактної пари, m є масою деталі, a є прискоренням робота, g є прискоренням вільного падіння, S є коефіцієнтом запасу, який доцільно підвищувати для палетайзингу через ризики аварійного гальмування та ударних навантажень [9]. Для вакуумних захватів утримувальна сила визначається як $F_v = \Delta p \cdot A_{\text{eff}} \cdot k$, де Δp є різницею тисків між атмосферою і порожниною присоски, A_{eff} є ефективною площею присоски, k є узагальненим коефіцієнтом герметичності та реального контакту, що різко зменшується за наявності дефектів гумового елемента, забруднень або підвищеної шорсткості поверхні [4]. Саме коефіцієнт k , на відміну від геометричних параметрів, найчастіше визначає розкид фактичної сили в експлуатації, тому при проектуванні доцільно орієнтуватися на сценарій деградації присоски та поверхні, а не лише на паспортні значення [5–6].

Порівняння продуктивності пневмозахватів різних типів слід виконувати не лише за максимальною частотою циклів у лабораторних умовах, а за фактичним тактом у складі роботизованого осередку. Механічні пневмозахвати, особливо паралельні, зазвичай забезпечують менший час захоплення, оскільки формування зусилля обмежується наповненням циліндра і закриттям губок, а підтвердження

захоплення може виконуватися за положенням або за тиском, не очікуючи стабілізації вакууму [1–2]. Вакуумні захвати часто мають більшу гнучкість щодо форми деталі, але їх продуктивність зменшується через час евакуації, необхідність видування для швидкого відпускання та підвищену чутливість до дефектів поверхні; у високошвидкісному палетайзингу це проявляється як зростання частки допоміжного часу та підвищення варіативності такту [5–6]. Окремо слід враховувати енергетичний аспект, оскільки пневматичні вакуумні ежектори при великих витоках або пористому контакті переходять у режим підвищеної витрати повітря, і тоді економічна ефективність «простого» вакуумного рішення може поступатися електричним вакуумним насосам або механічним захватам, навіть якщо початкова інвестиція нижча [5, 10]. Таким чином, продуктивність як інтегральний показник визначається взаємодією захвату, режимів руху робота та стабільності контакту, а не лише вибором «швидкого» приводу.

Зв'язок між продуктивністю роботи та якістю вакуумних гумових захватів є одним із найбільш критичних для складальних ліній, де палетайзинг виконується безперервно і будь-яка відмова призводить до зупинки потоку. Фізично утримання присоскою забезпечується пружною деформацією кромки та формуванням герметичного контуру, у межах якого різниця тисків створює нормальну силу притискання; при цьому реальна площа контакту та величина витоків визначаються мікрогеометрією поверхні, в'язкопружними властивостями матеріалу присоски та швидкістю навантаження [4]. Якщо кромка присоски має тріщини, порізи, локальні задирки або втрату еластичності через старіння, то зростає витік, зменшується досяжний вакуум і збільшується час, необхідний для досягнення порогового рівня Δp , який дозволяє роботизованому контролеру підтвердити захоплення [5–6]. Паралельно зниження вакууму зменшує запас утримання, через що доводиться обмежувати прискорення робота, збільшувати плавність траєкторій або вводити додаткові витримки при гальмуванні. Це прямо зменшує кількість циклів на годину

навіть у разі, коли падіння деталі не відбувається, а у випадку зриву зростає частота аварійних зупинок, що різко знижує доступність обладнання і погіршує фактичну продуктивність у термінах ОЕЕ [9]. Отже, якість гумової присоски та стан контактної поверхні впливають на продуктивність двома каналами: через середній час циклу та через ймовірність інцидентів, що призводять до простоїв і дефектів укладання.

Вплив якості самого захвату на якість операції складання проявляється через точність і стабільність базування деталі у момент взаємодії з пристосуванням або з'єднуваними компонентами. Механічні пневмозахвати при зношенні напрямних, люфтах у передачі або нерівномірності контактних накладок створюють перекоси, які переводять операцію з режиму «позиціювання за геометрією» у режим «позиціювання за силами», підвищуючи контактні тиски, ризик задирок та нестабільність посадки. Для вакуумних захватів аналогічний ефект виникає при непаралельності площини присосок до деталі або при неоднорідності вакууму по групі присосок, коли деталь орієнтується під дією різниці сил і формує систематичну кутову похибку, що критично під час автоматизованого введення у паз, різьбове з'єднання або під час нанесення клею чи герметика по траєкторії [4, 6]. У палетайзингу якість укладання визначається рівномірністю геометричного кроку та відсутністю мікрозсувів під час відпускання; дефектні присоски можуть спричиняти «липке» відпускання або несиметричний відрив, що збільшує розкид положення коробок або деталей у шарі й підвищує ризик розвалювання палети під час транспортування. Таким чином, якість захвату прямо визначає не лише факт утримання, а й геометричну якість складання та стабільність кінцевого результату.

Під час інтеграції пневмозахватів у універсальний роботизований осередок значущими є також вимоги до уніфікації кріплення, швидкої заміни інструмента та безпеки. Механічний інтерфейс між роботом і захватом, як правило, виконується за стандартизованими приєднувальними розмірами, що спрощує конфігурацію та

забезпечує повторюваність позиціонування при сервісній заміні [7]. Паралельно вимоги безпеки до промислових роботів передбачають оцінку ризику падіння вантажу, наявність захисту від втрати утримання при знеструмленні, контроль стану пневмосистеми та організацію безпечного режиму зупинки; для захватів це трансформується у вимогу резервування утримання, наявність зворотних клапанів у вакуумних магістралях, коректну логіку підтвердження захоплення і врахування аварійних прискорень при проєктуванні запасу [9]. Крім того, якість стисненого повітря за вмістом частинок, води та масла визначає довговічність клапанів, ежекторів і ущільнень, тому для складальних ліній з високою частотою циклів доцільно обґрунтовувати клас чистоти повітря, а не покладатися на «загальнозаводський» рівень; це зменшує дрейф параметрів захвату в часі та підвищує повторюваність циклу [8, 10].

Приклад інженерного розрахунку доцільно показати на типовій для машинобудування ситуації, коли робот виконує перенесення та палетайзинг звареного вузла після складально-зварювальної операції, а стабільність утримання впливає на безвідмовність потоку. Нехай деталь являє собою зварений коробчастий вузол масою $m = 12$ кг із листової сталі, який після складання проходить зварювання стикового шва довжиною $L_w = 0,25$ м у напівавтоматичному процесі MIG/MAG зі струмом близько 180 А і напругою близько 22 В; робоча швидкість зварювання становить $v_w = 0,5$ м/хв, тому час виконання шва $t_w = L_w/v_w = 0,25/0,5 = 0,5$ хв, тобто 30 с. Після виходу деталі з осередку універсальний робот здійснює захоплення вакуумним захватом і укладає виріб на палету. Робоча відстань перенесення між точкою захоплення і точкою укладання становить $s = 1,2$ м; для забезпечення прийняттого такту робот планується в режимі обмеження швидкості $v = 1,2$ м/с, а прискорення а визначається допустимим запасом утримання. У вакуумному модулі використовується пневматичний ежектор, що забезпечує цільовий абсолютний тиск у порожнині присоски приблизно $p_t = 45$ кПа, тобто різницю тисків $\Delta p = 101 - 45 =$

56 кПа; загальний об'єм вакуумної порожнини з урахуванням шлангів приймаємо $V = 0,25$ л, а номінальна продуктивність евакуації ежектора становить $Q = 35$ л/хв [6, 10]. Потрібно порівняти два варіанти гумових присосок і оцінити їх вплив на цикл і надійність палетайзингу.

У варіанті А застосовано дві плоскі присоски діаметром $d_A = 60$ мм з матеріалу NBR, що мають помітний знос кромки та забруднення; для такого стану узагальнений коефіцієнт герметичності та реального контакту приймаємо $k_A = 0,60$. Ефективна площа однієї присоски дорівнює $A = \pi \cdot d^2/4$, а сумарна утримувальна сила для двох присосок визначається як $F_{vA} = \Delta p \cdot A \cdot k_A \cdot n$. Підставляючи $\Delta p = 56\,000$ Па, $d_A = 0,06$ м, $n = 2$, отримуємо $A = \pi \cdot 0,06^2/4 \approx 0,002827$ м², тоді $F_{vA} \approx 56\,000 \cdot 0,002827 \cdot 0,60 \cdot 2 \approx 190$ Н. Для палетайзингу доцільно приймати коефіцієнт запасу $S = 2,5$ з урахуванням аварійних режимів і можливих ударів при укладанні [9]. Тоді умова утримання по вазі має вигляд $F_v \geq m \cdot g \cdot S$, де $m \cdot g \cdot S = 12 \cdot 9,81 \cdot 2,5 \approx 294$ Н. Порівняння показує, що $F_{vA} < 294$ Н, отже варіант А не забезпечує потрібного запасу на вертикальне навантаження і при несприятливих умовах може призвести до відриву деталі при гальмуванні або при мікропідсосі повітря в момент відриву від опори. Практичний наслідок полягає в тому, що для забезпечення безвідмовності доведеться або збільшити кількість присосок, або підвищити вакуум і продуктивність системи, або суттєво знизити динаміку руху і вводити додаткові витримки, що знижує продуктивність і збільшує витрати повітря [5–6].

Оцінимо динамічне обмеження для горизонтального перенесення, коли критичним стає зсув по контакту. У першому наближенні сила тертя, що протидіє зсуву, дорівнює $F_t = \mu \cdot F_v$, де μ є коефіцієнтом тертя «гума – пофарбована сталь». Для зношеного NBR прийmemo $\mu_A = 0,55$. Умова відсутності ковзання при прискоренні a має вигляд $\mu \cdot F_v \geq m \cdot a \cdot S$, звідки $a \leq \mu \cdot F_v / (m \cdot S)$. Для варіанта А отримуємо $a_A \leq 0,55 \cdot 190 / (12 \cdot 2,5) \approx 3,48$ м/с². Оскільки реальна система має розкид μ та F_v через варіації поверхні, доцільно приймати ще більш консервативне a , і це

безпосередньо вплине на час переміщення між точками. Якщо рух моделювати трапецієподібним профілем швидкості з максимальною швидкістю $v = 1,2$ м/с, то час переміщення на відстань $s = 1,2$ м становитиме $t_{\text{move}} = 2 \cdot v/a + (s - v^2/a)/v$, що для $a_A \approx 3,48$ м/с² дає $t_{\text{move}A} \approx 1,34$ с. Це означає, що навіть при відсутності зривів захоплення варіант А змушує обмежувати динаміку та збільшує допоміжний час на кожен цикл.

У варіанті В застосовано дві сильфонні присоски діаметром $d_B = 80$ мм із м'якого силікону, призначені для компенсування нерівностей та мікрокривизни поверхні; завдяки еластичності та профілю кромки приймаємо $k_B = 0,85$ і $\mu_B = 0,75$. Тоді площа однієї присоски становить $A \approx \pi \cdot 0,08^2/4 \approx 0,005027$ м², а утримувальна сила $F_vB \approx 56\,000 \cdot 0,005027 \cdot 0,85 \cdot 2 \approx 479$ Н. Умова по вазі виконується з запасом, оскільки $479 \text{ Н} > 294 \text{ Н}$, що зменшує чутливість до випадкових витоків і забезпечує безпечніше аварійне гальмування [9]. За умовою відсутності ковзання допустиме прискорення становить $a_B \leq 0,75 \cdot 479 / (12 \cdot 2,5) \approx 11,96$ м/с². Для такого прискорення час переміщення на 1,2 м за того ж обмеження швидкості $v = 1,2$ м/с дорівнює $t_{\text{move}B} \approx 1,10$ с. Різниця близько 0,24 с на одне переміщення здається невеликою, проте у палетайзингу вона повторюється двічі в кожному циклі, а також дозволяє зменшити додаткові витримки на «плавне» гальмування, що сумарно дає відчутний приріст продуктивності.

Далі врахуємо вплив якості присосок на час формування вакууму, який є критичним елементом циклу для вакуумних захватів. Для оцінки використаємо спрощену експоненційну модель евакуації $p(t) = p_0 \cdot \exp(-(Q_{\text{eff}}/V) \cdot t)$, де $p_0 \approx 101$ кПа є початковий абсолютний тиск, Q_{eff} є ефективна продуктивність евакуації з урахуванням витоків, V є об'єм порожнини [5–6]. Час досягнення цільового тиску $p_t = 45$ кПа дорівнює $t_v = (V/Q_{\text{eff}}) \cdot \ln(p_0/p_t)$. Для варіанта В приймемо $Q_{\text{eff}B} = Q$, тоді $t_{vB} \approx (0,25/35) \cdot 60 \cdot \ln(101/45) \approx 0,35$ с. Для варіанта А через знос кромки та мікровитоки ефективну продуктивність евакуації доцільно зменшити, наприклад до

$Q_{\text{effA}} = 0,55 \cdot Q$; тоді $t_{vA} \approx 0,63$ с. Отже, гірша якість присосок збільшує допоміжний час у найбільш «дорогому» місці циклу, коли робот змушений чекати підтвердження захоплення, і знижує стабільність такту через більший розкид часу досягнення вакууму [6]. Крім того, підвищені витрати збільшують витрати стисненого повітря через ежектор і сприяють нагріву елементів, що прискорює деградацію гуми, формуючи самопідсилювальний механізм погіршення якості і продуктивності [5, 10].

Оцінимо підсумкову продуктивність палетайзингу для двох варіантів, задавши структуру циклу. Прийнемо час підходу та контакту з деталлю $t_{\text{app}} = 0,55$ с, час установки на палету $t_{\text{place}} = 0,45$ с, час відпускання з видуванням $t_{\text{rel}} = 0,20$ с, час логічного контролю сигналів і переходів станів $t_{\text{sens}} = 0,35$ с. Тоді тривалість циклу можна оцінити як $t_{\text{cycle}} = t_{\text{app}} + t_v + t_{\text{move}} + t_{\text{place}} + t_{\text{rel}} + t_{\text{move}} + t_{\text{sens}}$. Для варіанта А маємо $t_{\text{cycleA}} \approx 0,55 + 0,63 + 1,34 + 0,45 + 0,20 + 1,34 + 0,35 \approx 4,87$ с, що відповідає продуктивності $PA \approx 3600/4,87 \approx 739$ циклів за годину. Для варіанта В $t_{\text{cycleB}} \approx 0,55 + 0,35 + 1,10 + 0,45 + 0,20 + 1,10 + 0,35 \approx 4,10$ с, продуктивність $PB \approx 3600/4,10 \approx 878$ циклів за годину. Отже, покращення якості присосок і збільшення їх діаметра у межах того самого вакуумного рівня дає приріст продуктивності приблизно на 19%. Інженерна інтерпретація цього результату полягає в тому, що палетайзинг у масовому виробництві чутливий навіть до часток секунди в циклі, а дефекти гумових елементів переводять систему у режим обмежених прискорень та збільшених витримок, тому економічно доцільно закладати ресурс присосок і регламент їх заміни як фактор продуктивності, а не лише як витратний матеріал [6, 9].

З погляду надійності палетайзингу, варіант В має додаткові переваги, які не повністю відображаються середнім часом циклу. По-перше, запас утримання по вазі забезпечує стійкість до випадкових відхилень p_t , локальної шорсткості, присутності бризок зварювання або залишків мастила, що є типовими для машинобудівних

деталей після складально-зварювальних операцій [4]. По-друге, більший допустимий рівень прискорень зменшує час перебування деталі у «граничних» режимах, коли мікроковзання може спричиняти кутові похибки укладання; це прямо підвищує геометричну якість формування палети та знижує ризик її розвалювання при транспортуванні. По-третє, менший час евакуації та менша чутливість до витоків зменшують частоту хибних спрацювань вакуумного датчика, які зазвичай призводять до повторних спроб захоплення і накопичення мікропауз у циклі. У сукупності ці фактори підвищують доступність обладнання, що в умовах потокового виробництва часто є більш вагомим, ніж максимальна паспортна швидкість робота [9–10]. Отже, якість присосок і правильність їх добору визначають не лише продуктивність у секундах, а й безвідмовність у годинах та змінах.



Рисунок 1.1 Робот Fanuc з пневматичним захватним пристроєм



Рисунок 1.2 Пневматичний захват робота UR

1.2. Види вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів, їх особливості

Вакуумні присоски як основні робочі елементи пневматичних захватів універсальних роботів забезпечують формування контактної поверхні, через яку створюється розрідження та генерується утримувальне зусилля для маніпулювання деталями у складальних операціях. Їх конструкція, матеріал, геометрія та динамічні характеристики визначають здатність роботизованої системи виконувати точні, високошвидкісні та відтворювані маніпуляції з широким спектром об'єктів різної маси, шорсткості, жорсткості і форми. У технологічних процесах складання саме пневматичні вакуумні захвати забезпечують необхідний баланс між швидкістю циклу та якістю фіксації, що безпосередньо позначається на стабільності роботи виробничої системи та надійності таких операцій, як палетайзинг або подавання деталей у зварювальні чи складальні осередки [11], [12].

Пневматичний захват функціонує на основі швидкого створення вакууму у внутрішньому об'ємі присоски і контролю витрати повітря в системі. У момент контакту присоски з поверхнею деталі необхідно забезпечити швидке герметичне прилягання, що залежить від відповідності жорсткості матеріалу, геометрії кромки, умов змочуваності та характеристик поверхні деталі. Будь-які дефекти або деградація матеріалу присоски, особливо мікротріщини, надлишкова шорсткість або втрачена еластичність, знижують ефективну площу контакту. Це призводить до падіння максимального утримувального зусилля та збільшення часу, необхідного для досягнення робочого вакууму, що у свою чергу негативно впливає на тривалість циклу складання та на надійність подальшої транспортної операції [13].

У складальних операціях універсальних роботів застосовуються різні типи вакуумних присосок, оптимізовані для об'єктів з відмінними механічними і геометричними властивостями. Класичні пласкі присоски використовуються для гладких поверхонь, що не мають суттєвих хвильових або мікрогеометричних

відхилень. Їх жорсткі контури гарантують мінімальні втрати потоку повітря, а отже, високу швидкість створення робочого вакууму та підвищену продуктивність циклу піднімання та переміщення [14]. Для деталей зі складною геометрією, включно з криволінійними, застосовуються гофровані або багатоконтурні присоски. Їх сегментована структура дозволяє компенсувати нерівномірність поверхні, забезпечуючи стабільний контакт навіть за наявності локальних дефектів або шорсткості. Цей тип присосок широко використовується у палетайзингових комплексах, оскільки забезпечує необхідну адаптивність до варіацій положення об'єктів [15].

Особливо важливою у складальних процесах є робота з деталями із підвищеною пористістю, шорсткістю або наявністю мікрорельєфу, зокрема пластиковими литими корпусами, шліфованими металевими компонентами, листовими матеріалами зі слідами обробки. Для таких випадків застосовують присоски зі спеціальною м'якою контактною губою з силікону або термополіуретану. М'які полімери забезпечують покращену адаптацію до поверхні, що дозволяє зменшити витрати повітря на компенсацію витоків та підвищити стабільність утримувального зусилля. Проте м'які матеріали є менш довговічними і часто потребують регулярної заміни, оскільки схильні до зношування при інтенсивних циклах роботи [16]. Саме компроміс між довговічністю і адаптивністю виступає центральним критерієм раціонального вибору таких присосок.

Порівняння продуктивності різних типів присосок демонструє значну залежність між геометрією контактної поверхні, матеріалом та режимами роботи вакуумної системи. Плaskі поліуретанові присоски забезпечують найвищу швидкість циклу за умов роботи з рівними поверхнями, оскільки досягнення цільового вакууму відбувається за мінімальний час. Гофровані присоски демонструють нижчу швидкість роботи через більший внутрішній об'єм, що потребує більше часу для відкачування повітря. Натомість багатоконтурні присоски

з м'якого силікону забезпечують найвищу якість прилягання на нерівних поверхнях, хоча їхня циклічна продуктивність зазвичай нижча через затримку на етапі герметизації [17]. Універсальні роботизовані системи на складальних операціях часто використовують комбінації типів присосок або комплекти змінних губ, що дозволяє налаштовувати захват залежно від конкретної деталі.

Якість матеріалу вакуумної присоски безпосередньо визначає як продуктивність захвату, так і безпечність палетайзингу. Резинові та полімерні матеріали схильні до змін фізико-механічних властивостей під дією температурних коливань, мастильних речовин, ультрафіолетового випромінювання та циклічних механічних навантажень. Зниження еластичності поверхні призводить до утворення мікротріщин, через які відбуваються додаткові витoki повітря. У результаті вакуумний насос або ежекторний пристрій вимушений працювати у режимі підвищеної інтенсивності, що знижує ресурс обладнання, а вакуум у присосці формується повільніше, подовжуючи цикл переміщення деталі. Чим більше шорсткість або локальні дефекти на контактній поверхні присоски, тим вищими є вимоги до потужності вакуумної системи і тим нижчим є фактичне утримувальне зусилля, що створює ризики падіння деталей, зупинки робота або порушення роботи лінії [18].

Для аналізу зв'язку між продуктивністю системи та якістю вакуумних присосок доцільно розглянути один послідовний інженерний розрахунок. Нехай універсальний робот виконує операцію палетайзингу сталевих пластин розміром 250×150 мм і масою 1,8 кг кожна. Для стабільного захоплення застосовується пласка поліуретанова присоска діаметром 60 мм. Максимальна допустима швидкість переміщення робота залежить від сили утримання F_{hold} , яка визначається як добуток ефективної площі контакту A_{eff} та різниці тиску між атмосферою і вакуумною камерою Δp . Ефективний радіус з урахуванням деформації та нерівностей поверхні становить 0,027 м. Відповідно $A_{\text{eff}} = \pi \cdot r^2 =$

$3,14 \cdot (0,027)^2 \approx 2,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Вакуумний ежектор забезпечує розрідження до 70 кПа, тому сила утримання $F_{\text{hold}} = \Delta p \cdot A_{\text{eff}} = 70 \cdot 10^3 \cdot 2,29 \cdot 10^{-3} \approx 160 \text{ Н}$.

Якщо присоска має дефекти, що збільшують витік повітря на 30 відсотків, то фактичний вакуум зменшується до 50 кПа. У такому разі $F_{\text{hold}} \approx 50 \cdot 10^3 \cdot 2,29 \cdot 10^{-3} \approx 115 \text{ Н}$. Оскільки коефіцієнт безпечності для захвату у палетайзингових операціях становить не менше ніж 2, максимальна дозволена маса деталі або прискорення під час руху робота визначаються як $a_{\text{max}} \leq F_{\text{hold}} / (2 \cdot m)$. Для справної присоски $a_{\text{max}} \approx 160 / (2 \cdot 1,8) \approx 44 \text{ м/с}^2$. Для зношеної присоски $a_{\text{max}} \approx 115 / (2 \cdot 1,8) \approx 32 \text{ м/с}^2$. Різниця у майже 12 м/с^2 безпосередньо впливає на максимально дозволену швидкість циклу та тривалість робочої операції. Якщо час переміщення робота приблизно пропорційний оберненій величині середнього прискорення, то падіння прискорення на 27% збільшує тривалість циклу приблизно на 37%. Для лінії палетайзингу, яка виконує 900 циклів за годину, це означає зменшення продуктивності до 650–680 циклів за годину.

Розглянемо альтернативний варіант використання силіконової гофрованої присоски того ж діаметра. Через більший внутрішній об'єм час досягнення робочого вакууму зростає з 35 до 55 мс. Для одного циклу це незначна різниця, однак для тисяч циклів на годину вона збільшує загальний час роботи осередку. Проте така присоска забезпечує стабільне прилягання навіть у випадках нерівної поверхні, тому вакуум формується без значних витоків і робота лінії не зупиняється через аварійні збої або падіння деталей. З точки зору довговічності силіконові присоски зношуються швидше, але забезпечують меншу кількість незапланованих зупинок, що є критично важливим для безперервних складальних операцій.

У контексті високошвидкісного палетайзингу надійність є параметром пріоритетного значення. Навіть одиничне падіння деталі може зумовити необхідність повторного калібрування системи зору або позиціонування, а також збільшення технологічного простою. Тому вибір вакуумної присоски не може

ґрунтуватися лише на критеріях швидкості досягнення вакууму. Враховується сукупність факторів: стабільність контактної площі, схильність матеріалу до старіння, рівень шорсткості поверхні деталей, інтенсивність циклів роботи та параметри пневматичної системи. Саме таким чином забезпечується надійне та безпечне виконання маніпуляційних операцій у складальних комплексах [19].

Практичні дослідження показують, що при роботі з деталями складної геометрії адаптивні гофровані присоски забезпечують на 15–20% меншу варіабельність сили утримання у порівнянні з плоскими присосками на зношених поверхнях. Це підвищує точність позиціонування деталі та зменшує зусилля компенсуючої динаміки робота. За рахунок більш рівномірного розподілу контактного тиску сили реакції не викликають значних коливань кінематичної схеми маніпулятора, тому амплітуда мікроколивань зменшується, що є критично важливим для високоточної подачі елементів у складальні гнізда [20].

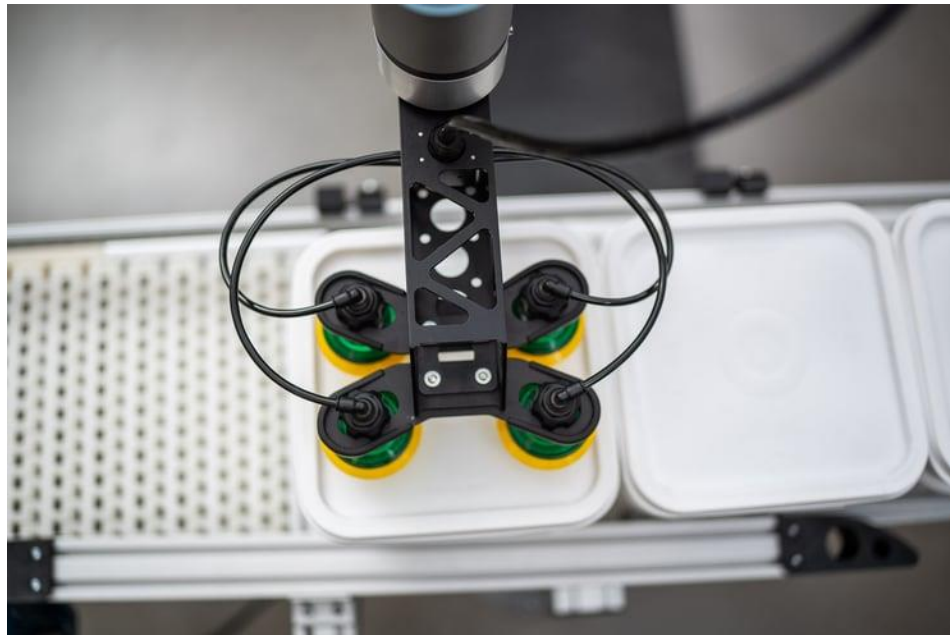


Рисунок 1.3 Високопродуктивні присоски пневматичного захвату

Залежність між якістю захвату і якістю операції складання проявляється у двох площинах. По-перше, точність подачі деталі до зони складання визначає стабільність наступних технологічних операцій. По-друге, нерівномірність

утримувального зусилля може призводити до мікрозсувів деталі у момент контакту зі складальним пристроєм. Це спричиняє накопичення похибок та, як наслідок, зниження відсотка придатних виробів. Використання високоякісних вакуумних присосок знижує такі ризики завдяки стабільній силі притягнення, меншій залежності від стану поверхні та мінімальній варіабельності параметрів вакуумної системи.



Рисунок 1.4 Різні види розміщення вакуумних присосок в залежності від типу вантажу, що переміщується

1.3. Критерії якості вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів

Якість вакуумних присосок у пневматичних захватах універсальних роботів визначає стабільність утримувального зусилля, швидкість формування вакууму, надійність захоплення деталей і довговічність самого маніпуляційного обладнання. У роботизованих складальних процесах, де операції повторюються десятки тисяч разів на добу, навіть незначні зміни геометрії або матеріальних

властивостей присосок можуть призвести до втрати точності, збільшення часу циклу, аварійних зупинок та зниження якості продукції [30]. Тому розроблення критеріїв оцінювання якості вакуумних присосок є ключовим елементом загального інженерного забезпечення роботизованих систем.

Пневмозахвати універсальних роботів працюють у режимах, що часто змінюються, оскільки деталі можуть мати різну шорсткість, масу, геометрію, криволінійні поверхні або наявність технологічних обробок на кшталт швів, фасок чи опуклостей. Формування вакууму у захватному елементі відбувається завдяки щільному контакту між присоскою і поверхнею деталі, де будь-який витік повітря безпосередньо зменшує доступну силу утримання та впливає на точність позиціонування. Тому одним з основних критеріїв якості виступає герметичність прилягання, що визначається: матеріалом та еластичністю робочої кромки; мікрогеометрією контактної поверхні; опором витіку під дією циклічного навантаження; величиною залишкової деформації після тривалої експлуатації [31], [32].

У високопродуктивних складальних осередках до критеріїв якості додатково відносять швидкість відновлення форми, динамічні властивості матеріалу за високих частот циклу, стійкість до мастил і абразивних частинок та температурну інваріантність. Зношена присоска збільшує навантаження на вакуумний генератор, підвищує частоту спрацювання аварійних зупинок і змінює кінематичний режим роботи маніпулятора, оскільки робот змушений компенсувати мікроссуви деталі під час транспортування [33].

Критерії якості вакуумних присосок тісно пов'язані з продуктивністю роботи маніпулятора. Коли присоска втрачає еластичність або має мікротріщини, час досягнення робочого вакууму збільшується, а сила утримання зменшується. Відповідно робот повинен знижувати прискорення та швидкість переміщення деталі, щоб залишити достатній запас безпечності і не допустити відрив деталі під

час руху. Таким чином якість присоски визначає значення максимального робочого прискорення, а отже, і тривалість повного циклу складання [34].

Порівняння продуктивності різних типів пневмозахватів показує, що плоскі поліуретанові присоски забезпечують найвищу швидкість формування вакууму, але вимагають високої чистоти поверхні. Гофровані присоски поглинають нерівності, проте мають більший внутрішній об'єм, що підвищує тривалість відкачування. Силіконові м'які присоски надають найкращий контакт для деталей зі змінною геометрією, однак швидше зношуються, що підвищує ризики деградації сили утримання під час тривалої експлуатації [35]. Саме тому розробники роботизованих систем завжди інтегрують систему моніторингу зусилля вакууму та стану присосок.

Якість вакуумних присосок є ключовою для стабільності процесу палетайзингу. Під час укладання деталей у штабелі робот виконує швидкі циклічні переміщення з високими прискореннями, а відрив деталі може призвести до аварійного зупинення, пошкодження виробів і порушення ритмічності роботи всієї лінії. Тому контроль сили утримання, величини вакууму, швидкості відкачування повітря та наявності витоків є обов'язковими критеріями у системах забезпечення якості [36].

Для підтвердження взаємозв'язку між якістю присосок, продуктивністю маніпулятора та надійністю палетайзингу розглянемо конкретний приклад. Робот виконує складальну операцію подачі та укладання сталевих панелі розміром 320×220 мм, масою 2,4 кг. Панель має зварний шов довжиною 180 мм, виконаний MIG/MAG процесом зі струмом 160 А, напругою 19 В та швидкістю переміщення пальника 0,4 м/хв. Шов утворює невеликий підсилювальний валик висотою до 0,8 мм, що впливає на рівномірність прилягання присоски у цій зоні.



Рисунок 1.5 Присоска VF, плоска, з ребрами жорсткості, діаметр 70 мм

Робот використовує присоску діаметром 70 мм. Ефективний радіус з урахуванням нерівностей становить 0,032 м, тому площа контакту:

$$A_{\text{eff}} = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot (0,032)^2 \approx 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Вакуумний генератор створює розрідження до 75 кПа. Сила утримання:

$$F_{\text{hold}} = \Delta p \cdot A_{\text{eff}} = 75 \cdot 10^3 \cdot 3,22 \cdot 10^{-3} \approx 241 \text{ Н.}$$

Згідно з вимогами безпеки коефіцієнт запасу становить не менше ніж 2, тому допустиме прискорення:

$$a_{\text{max}} = F_{\text{hold}} / (2 \cdot m) = 241 / (2 \cdot 2,4) \approx 50 \text{ м/с}^2.$$

Це значення визначає максимальну динаміку робота при переміщенні панелі.

Розглянемо вплив дефектів присоски. Нехай її контактна поверхня має ділянку підвищеної шорсткості або мікротріщину, що зменшує ефективне розрідження до 55 кПа. Нова сила утримання:

$$F_{n_{\text{hold}}} = 55 \cdot 10^3 \cdot 3,22 \cdot 10^{-3} \approx 177 \text{ Н.}$$

Допустиме прискорення:

$$a'_{\max} = 177 / (2 \cdot 2,4) \approx 37 \text{ м/с}^2.$$

Зниження прискорення на 26% змінює кінематичний режим маніпулятора. Якщо середній шлях переміщення становить 0,9 м, то час циклу, що визначається залежністю $t = \sqrt{2S/a}$, збільшується:

$$t_1 = \sqrt{2 * 0,9/50} = 0,19 \text{ с};$$

$$t_2 = \sqrt{2 * 0,9/37} = 0,22 \text{ с}$$

Різниця у 0,03с у межах одного циклу є незначною, однак при 5000 циклах на годину сумарний приріст тривалості становить понад 150 с, що еквівалентно зменшенню продуктивності на 4–6%. У палетайзингових системах це може привести до порушення синхронізації з конвеєром і накопичення похибок позиціонування.

Порівняємо продуктивність у випадку застосування альтернативної присоски – гофрованої силіконової.



Рисунок 1.5 Присоска VB 1,5 гофрирована, діаметр 70мм

Через більший внутрішній об'єм час досягнення робочого вакууму зростає з 40 до 60 мс. Проте така присоска краще компенсує локальні дефекти зварного шва. Ефективний радіус прилягання становить близько 0,034 м, тому сила утримання за вакууму 75 кПа:

$$A_{\text{eff}2} = 3,14 \cdot (0,034)^2 \approx 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; F_{\text{hold}2} = 75 \cdot 10^3 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} \approx 272 \text{ Н.}$$

$$\text{Таким чином } a_{\text{max}2} \approx 272 / (2 \cdot 2,4) \approx 57 \text{ м/с}^2.$$

Вищий запас утримувальної сили забезпечує підвищену надійність навіть за наявності нерівномірностей. Хоча час досягнення вакууму на 20 мс більший, загальна продуктивність лінії підвищується завдяки мінімізації аварійних зупинок та стабільності циклу.

Інтерпретація результатів свідчить, що вибір присоски має базуватися не лише на параметрах швидкодії, але й на здатності до адаптації. Для деталей зі зварними швами, фасками чи іншими елементами, що порушують рівність поверхні, оптимальними є присоски із м'яким, але зносостійким матеріалом, навіть якщо вони потребують більше часу для формування вакууму. Натомість для рівних поверхонь найефективнішими є плоскі присоски, що забезпечують мінімальний час циклу та високу кінематичну точність.

Критерії якості вакуумних присосок включають також стабільність механічних властивостей упродовж тривалої експлуатації. Установлено, що присоски з поліуретану зберігають форму та еластичність довше, але гірше взаємодіють з поверхнями зі змінною геометрією. Силіконові присоски демонструють кращу адаптацію, однак зношуються швидше, що вимагає впровадження системи регулярного моніторингу витрат повітря, сили утримання та зміни часового профілю створення вакууму [37].

Зв'язок між якістю присосок і якістю операції складання виявляється у точності подачі деталі до зони стикування. Нерівномірне утримання викликає мікрозсуви під час маніпуляцій, що збільшує похибки розташування і може

призвести до накопичення дефектів у складальній системі. Зокрема, якщо панель із зварними швами подається з похибкою більше ніж 0,5 мм, це може спричинити неправильне позиціонування у складальному гнізді або недопустимі навантаження на систему фіксації. Використання присосок високої якості зменшує такі похибки, стабілізуючи геометрію процесу складання [38].

У системах палетайзингу критично важливим фактором є динамічна надійність. Моделі деградації присосок показують, що зі зростанням шорсткості їх контактної поверхні понад 15 мкм витрати повітря зростають на 25–30%, що, відповідно, збільшує сумарний час формування вакууму та знижує доступну силу утримання. Відповідно ефективність роботи вакуумної системи має регулярно підтверджуватися тестуванням за допомогою контрольних циклів, у яких вимірюється час відгуку та величина вакууму при стандартному навантаженні [39].

РОЗДІЛ II ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Матеріали вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів

Матеріали вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів визначають не лише їхню еластичність, герметичність та зносостійкість, але і загальну продуктивність роботизованих складальних систем. У промислових умовах присоски контактують з деталями зі змінною геометрією, різною шорсткістю, наявними технологічними виступами, слідами зварювання або залишками мастил. Тому матеріал повинен забезпечувати надійне прилягання в динамічних циклах роботи, зберігати стабільність механічних характеристик протягом тривалого часу та не втрачати герметичність під дією зовнішніх чинників. Саме властивості матеріалу визначають швидкість формування вакууму, силу утримання та кінематичну точність рухів робота, що безпосередньо впливає на якість складальних операцій [40].

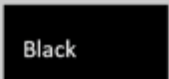
Suction cup	Color	Image	Work Piece	Environment
Buna (N)			Oily and Plain	
Polyurethane (U)			Oily, Plain & Rough	
Silicon (S)			Food, Hot & Cold	
Viton (F)			Oily, Plain & Hot	
Buna anti-static (NA)			Electronic, oily	

Рисунок 2.1 Основні матеріали для виготовлення вакуумних присосок та їх позначення

Універсальні роботизовані системи застосовують декілька типів матеріалів для вакуумних присосок: натуральну та синтетичну гуму, поліуретан, силікон, термопластичні еластomers, а також комбіновані матеріали з підвищеною зносостійкістю. Кожен матеріал має свої механічні, трибологічні та експлуатаційні властивості, які забезпечують відповідні можливості для адаптації до окремих груп деталей або умов виробництва. Наприклад, поліуретан характеризується значною абразивною стійкістю та низьким стиранням, що робить його ефективним для палетайзингових операцій у середовищах з твердими частинками. Силікон забезпечує високу еластичність і здатність до відтворення геометрії поверхні, що є критичним для деталей зі складною формою або локальними нерівностями [41].

Однією з ключових особливостей використання пневмозахватів є необхідність швидкого та стабільного створення вакууму при кожному циклі. Матеріал присоски має еластично відтворювати контактну поверхню, забезпечуючи мінімальне значення витoku повітря. Мікротріщини або деградація матеріалу викликають зростання витрат повітря і збільшення часу досягнення необхідного вакууму, що затримує кожну складальну операцію. На високопродуктивних лініях це призводить до значних втрат часу та зниження ефективності обладнання [42]. Додатково матеріал впливає на його взаємодію з поверхнями різної шорсткості. Наприклад, гумові присоски краще працюють на гладких поверхнях, у той час як силіконові забезпечують ефективніше ущільнення на шорстких або нерівних матеріалах завдяки більшій здатності до локальної деформації.

Порівняння продуктивності пневмозахватів різних типів свідчить про залежність між типом матеріалу, величиною контактної жорсткості та швидкістю циклу. Поліуретанові присоски мають підвищену жорсткість, через що швидше відновлюють форму після розвантаження і забезпечують коротший час переходу між циклами. Однак їхня здатність компенсувати нерівності поверхні обмежена, що

може призводити до витоків повітря у випадку деталей зі зварними швами або фасками. Силіконові присоски мають нижчу жорсткість і довше повертаються у вихідну форму, але їх адаптивність сприяє стабільному зчепленню, навіть якщо область контакту частково порушена рельєфними елементами [43]. Тому вибір матеріалу завжди здійснюється з урахуванням співвідношення між швидкодією та гарантованою якістю утримання.

Важливою складовою взаємозв'язку між продуктивністю та якістю матеріалу є довговічність. З часом полімери піддаються старінню під дією температурних коливань, ультрафіолетового випромінювання, мастил і механічних навантажень. Поліуретан має кращу стійкість до мастильних середовищ, у той час як силікон краще витримує високі температури та зберігає еластичність у ширшому інтервалі деформацій. Гума, хоча і має доступну вартість, значно швидше деградує при високочастотних циклах в автоматизованих системах. Деградація матеріалу призводить до зменшення ефективної контактної площі, а отже, до зниження сили утримання і зростання частоти відмов пневмосистеми, що впливає на надійність палетайзингу [44].

Розглянемо операцію подачі деталі у роботизованому складальному осередку. Деталь - сталева пластина 300×200 мм з масою 2,2 кг та зварним швом довжиною 150 мм, виконаним MIG/MAG методом при струмі 150 А, напрузі 20 В і швидкості переміщення пальника 0,35 м/хв. Після зварювання поверхня у зоні шва має підсилювальний валик висотою 1 мм, що створює нерівності для контакту присоски.

Робот використовує присоску діаметром 80 мм. За умови, що присоска виготовлена з поліуретану, її ефективний радіус з урахуванням жорсткості та деформацій складає приблизно 0,036 м. Площа контакту:

$$A_{\text{eff}} = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot (0,036)^2 \approx 4,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

При вакуумі 70 кПа сила утримання:

$$F_{\text{hold}} = \Delta p \cdot A_{\text{eff}} = 70 \cdot 10^3 \cdot 4,07 \cdot 10^{-3} \approx 285 \text{ Н.}$$

Допустиме прискорення за коефіцієнта безпечності 2:

$$a_{\text{max}} = F_{\text{hold}} / (2 \cdot m) = 285 / (2 \cdot 2,2) \approx 65 \text{ м/с}^2.$$

Поліуретанова присоска забезпечує високу силу утримання, але її жорсткість може призвести до витоків у зоні шва. Якщо через нерівності втрачається 20% ефективного вакууму, сила зменшується:

$$F'_{\text{hold}} = 0,8 \cdot 285 \approx 228 \text{ Н.}$$

$$a'_{\text{max}} \approx 228 / (2 \cdot 2,2) \approx 52 \text{ м/с}^2.$$

Отже зниження сили на 20% зменшує допустиме прискорення на 13 м/с², що збільшує тривалість циклу.

Тепер порівняємо силіконову присоску того ж діаметра. Завдяки вищій еластичності її ефективний радіус у зоні шва збільшується до 0,038 м:

$$A_{\text{eff}2} = 3,14 \cdot (0,038)^2 \approx 4,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$F_{\text{hold}2} = 70 \cdot 10^3 \cdot 4,53 \cdot 10^{-3} \approx 317 \text{ Н.}$$

Однак силікон має нижчу зносостійкість, тому під час роботи з абразивними матеріалами зростає ризик мікроушкоджень. При деградації поверхні на 10%:

$$F''_{\text{hold}} = 0,9 \cdot 317 \approx 285 \text{ Н.}$$

Це фактично відповідає початковому значенню поліуретанової присоски, але силіконова забезпечує кращу адаптацію до шва, що забезпечує стабільність циклу без повторних спроб захвату.

Розрахунок часу виконання операції базується на кінематичній формулі:

$$t = \sqrt{2S/a},:$$

де $S = 0,8 \text{ м}$ - середня відстань переміщення деталі.

Для поліуретану у нормальному стані:

$$t_1 = \sqrt{2 \cdot 0,8 / 65} = 0,156 \text{ с};$$

Для поліуретану після втрати герметичності:

$$t_1 = \sqrt{2 \cdot 0,8 / 52} = 0,175 \text{ с};$$

Для силікону у нормальному стані:

$$t_2 = \sqrt{2 * 0,8/57}=0,167\text{с};$$

Для силікону після невеликої деградації:

$$t_2 \approx 0,165 \text{ с.}$$

Таким чином поліуретан найшвидший у початковому стані, але має гіршу адаптивність; силікон стабільніший у динаміці, хоча й менш продуктивний у коротких циклах при ідеальних поверхнях. У контексті палетайзингу, де нерівності поверхні часті, силіконова присоска зменшує кількість аварійних ситуацій, підвищуючи надійність роботи.

У складальних системах точність подачі деталей визначає стабільність подальших технологічних операцій. Матеріал присоски впливає на мікроссуви деталі в момент контакту через неоднорідність сили утримання. Поліуретан, маючи жорсткіший профіль, здатен передавати вібрації та створювати імпульсні навантаження на робота. Силікон завдяки демпфуванню знижує амплітуду мікроколивань. Це важливо у складальних операціях після зварювання, де точність позиціонування компенсує деформації від теплового впливу.

Висока якість матеріалу присоски забезпечує мінімальні відхилення від номінальних траєкторій переміщення. У випадку деградації матеріалу збільшується варіабельність утримувальної сили, що може призводити до накопичення похибок під час складання. Для палетайзингових операцій це критично, оскільки навіть один відрив деталі здатен порушити роботу всієї системи і вимагати перезапуску операційного циклу [45].

Поліуретанові присоски мають найвищу зносостійкість, проте гіршу адаптацію до складних поверхонь. Силіконові присоски забезпечують кращу герметичність та прилягання, проте мають нижчу стійкість до абразивних частинок. Гумові присоски дешевші, але інтенсивно старіють, що робить їх менш придатними для високопродуктивних роботизованих систем. Термопластичні еластomers

поєднують частину переваг поліуретану та силікону, забезпечуючи високу адаптацію при достатній зносостійкості [46].

У контексті надійності палетайзингу найбільш важливими параметрами є стабільність сили утримання, стійкість до мікротріщин та рівень деградації за циклічних навантажень. Експериментальні дослідження показують, що силіконові присоски зберігають сили утримання на 12–18% стабільніше, ніж поліуретанові, на деталях зі змінною шорсткістю [47]. Це забезпечує меншу варіабельність циклу та мінімізацію аварійних зупинок.

У підсумку вибір матеріалу вакуумної присоски визначає продуктивність, стабільність та безпеку роботизованих складальних процесів. Поліуретан забезпечує високу швидкодію, силікон адаптивність і стабільність, термопластичні еластомери баланс характеристик для універсальних робіт. Розрахунки показують, що матеріал впливає на силу утримання, допустиме прискорення маніпулятора та час циклу. Високоякісний матеріал є ключовим для зменшення аварійних ситуацій, підвищення точності складання та забезпечення довговічності обладнання.

2.2. Основні дефекти та експлуатаційні пошкодження вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних робіт

Експлуатаційна якість вакуумних присосок у пневматичних захватах універсальних робіт є ключовим фактором забезпечення стабільності, точності та продуктивності складальних операцій. У процесі інтенсивної роботи присоски зазнають значних механічних, термічних і абразивних навантажень, що формує характерні дефекти та пошкодження. Вони впливають на герметичність контакту, швидкість досягнення робочого вакууму, силу утримання та здатність робота виконувати переміщення з необхідною динамікою. Зниження якості присоски прямо відображається на продуктивності складальних операцій, частоті аварійних

зупинок та стабільності палетайзингу, а також на загальній надійності роботи автоматизованої системи [40].



Рисунок 2.1 Результат слабкого прилягання вакуумних присосок до матеріалу

Дефекти вакуумних присосок формуються внаслідок зношування робочої кромки, появи мікротріщин у полімерному матеріалі, старіння еластомеру, впливу мастильно-охолоджувальних рідин, абразивного пилю або нерівностей поверхонь деталей. Особливо важлива роль у формуванні дефектів належить шорсткості поверхні деталей, що контактують із присосками. Висока шорсткість або локальні виступи на поверхні (включно зі зварними швами) створюють несиметричне навантаження на контактну кромку, прискорюючи її зношування. Наявність нерівностей спричиняє локальні втрати вакууму, що зменшує ефективну силу утримання та змінює кінематичні параметри руху маніпулятора [41].

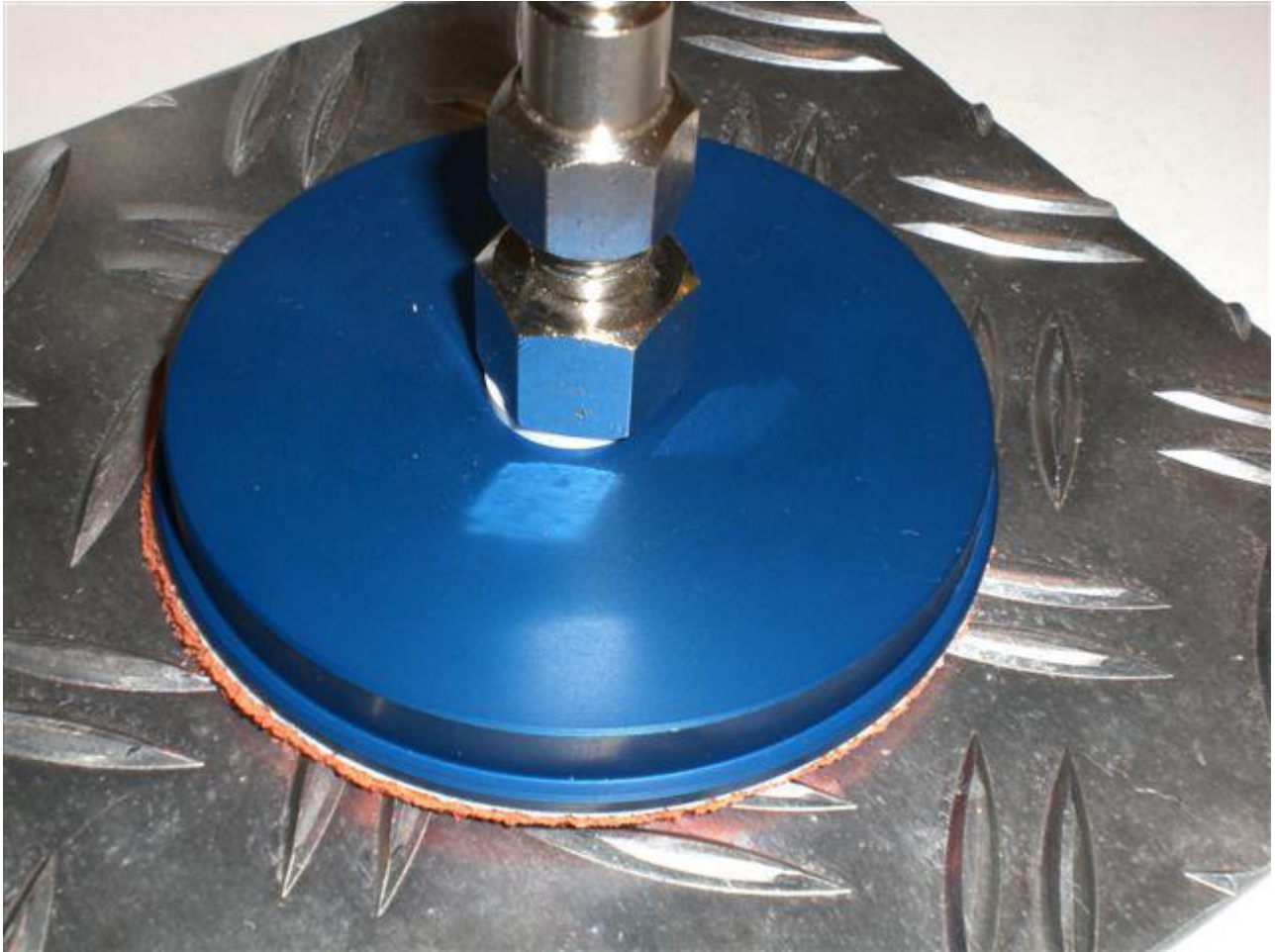


Рисунок 2.2. Неоднорідний профіль металевого листа впливає на величину зусилля утримання вакуумного захвату

Шорсткість поверхні деталі визначає величину мікроконтактів, які повинні бути компенсовані деформацією матеріалу присоски. Якщо здатність матеріалу до деформації недостатня, контакт утворюється лише частково, що спричиняє збільшення витоків повітря та підвищення навантаження на вакуумний генератор. На поверхнях зі слідами механічної обробки, різання або зварювання присутні нерегулярні западини та виступи, які створюють труднощі при формуванні герметичного контакту. Це подовжує час досягнення робочого вакууму та знижує доступне утримувальне зусилля, що позначається на швидкості циклів подачі деталей та надійності переміщень [42].

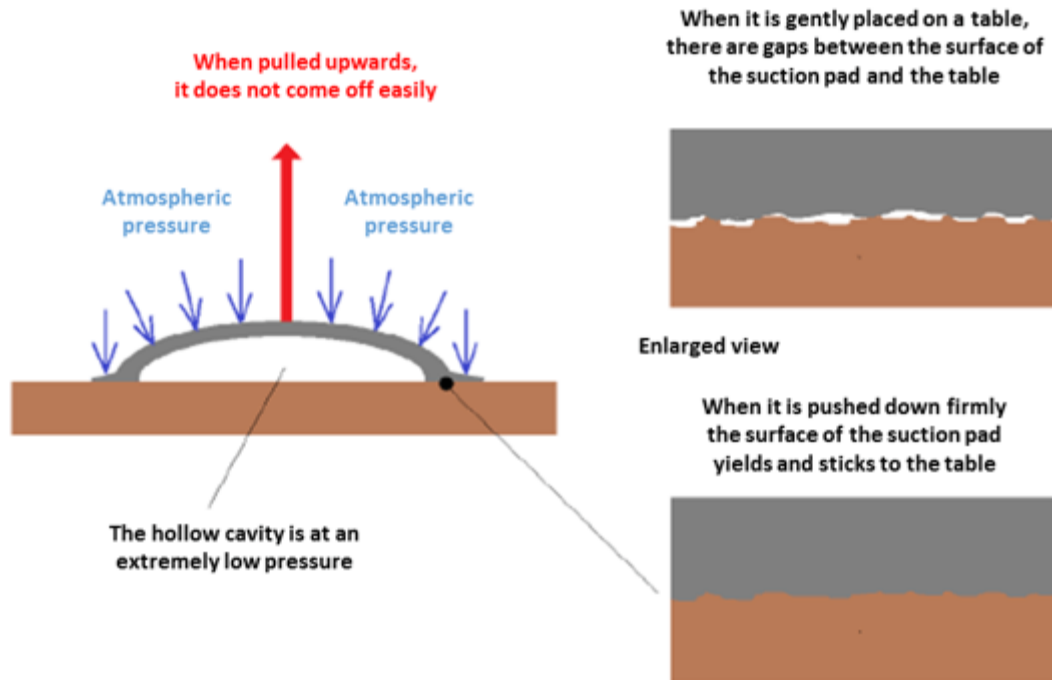


Рисунок 2.3 Вплив шорсткості на ефективність роботи пневмозахвату

Порівняння продуктивності пневмозахватів різних типів в умовах дефектів присосок показує, що плоскі присоски є найбільш чутливими до шорсткості та локальних виступів. Їх жорстка геометрія забезпечує високу продуктивність на гладких поверхнях, проте інтенсивно втрачає ефективність при роботі з деталями після зварювання або проточування. У свою чергу гофровані присоски створюють адаптивну структуру контакту, що частково компенсує нерівності, хоча потребують більше часу для створення вакууму через збільшений внутрішній об'єм. Присоски з м'якого силікону або термопластичних еластомерів забезпечують найкращу адаптацію до шорстких поверхонь, однак мають короткий ресурс через схильність до механічних пошкоджень [43].

Якість вакуумних гумових захватів безпосередньо визначає продуктивність роботи робота. Якщо поверхня присоски має мікротріщини або дефекти, навіть незначні витоки повітря викликають зниження вакууму та збільшення часу його досягнення. Це спричиняє необхідність зниження прискорень та швидкостей у траєкторіях переміщення деталі, що збільшує цикл складання. У разі значної

деградації присоски робот може не досягти безпечного значення утримувальної сили, що призводить до скидання деталі або аварійного зупинення системи [44]. Таким чином зв'язок між якістю присоски та продуктивністю системи є лінійним.

Основними дефектами вакуумних присосок, що формують зниження їх ефективності у складальних операціях, є: нерівномірне зношування робочої кромки, мікротріщини в еластомерній структурі, розшарування полімеру, надмірна залишкова деформація, відкладання абразиву та мастил, локальні проколи або розриви, а також зміна твердості матеріалу через старіння. Усі ці дефекти зменшують реальну контактну площу, збільшують витрати повітря та знижують величину вакууму. Деградована присоска збільшує частоту повторних спроб захвату, підвищує енергоспоживання вакуумної системи та створює нерівномірні навантаження на маніпулятора [45].

У роботизованих складальних процесах важливою є також стабільність геометрії присоски після багаторазового циклу деформування. Якщо матеріал втрачає здатність повертатися у вихідну форму, на його поверхні утворюється залишкова деформація, що негативно впливає на якість контакту. Це особливо критично у палетайзингових операціях, де присоска повинна утримувати деталь у високодинамічних режимах з прискореннями, близькими до граничних значень. Зниження сили утримання навіть на 10–15% може зробити недоступними швидкі режими роботи, які визначають продуктивність лінії [46].

Пневмозахват оснащений присоскою діаметром 70 мм. Для нової присоски ефективний радіус з урахуванням деформації становить 0,032 м. Площа контакту:

$$A_{\text{eff}} = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot (0,032)^2 \approx 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

За вакууму 75 кПа сила утримання:

$$F_{\text{hold}} = 75 \cdot 10^3 \cdot 3,22 \cdot 10^{-3} \approx 242 \text{ Н}.$$

Допустиме прискорення:

$$a_{\text{max}} = F_{\text{hold}} / (2 \cdot m) = 242 / (2 \cdot 1,6) \approx 76 \text{ м/с}^2.$$

Це значення забезпечує роботизованому комплексу можливість працювати у високопродуктивному режимі.

Розглянемо дефект - мікротріщина на робочій кромці, яка збільшує витрати повітря та знижує вакуум на 25%. Нове значення вакууму становить 56 кПа:

$$F'_{\text{hold}} = 56 \cdot 10^3 \cdot 3,22 \cdot 10^{-3} \approx 180 \text{ Н.}$$

Допустиме прискорення:

$$a'_{\text{max}} = 180 / (2 \cdot 1,6) \approx 56 \text{ м/с}^2.$$

Таким чином прискорення зменшилось на 26 відсотків. Це означає, що для траєкторії переміщення довжиною 0,75 м час циклу зростає:

$$t_1 = \sqrt{2 * 0,75 / 76} = 0,14 \text{ с};$$

$$t_2 = \sqrt{2 * 0,75 / 56} = 0,16 \text{ с}.$$

Різниця у 0,02 с здається незначною, але на рівні 8000 циклів за зміну це дає втрату продуктивності на 160 с, або близько 4%. За умови кількох робіт у лінії ефект накопичується, створюючи серйозне відставання від планового виробітку.

Порівняємо з альтернативною присоскою гофрованою силіконовою. Завдяки підвищеній еластичності її ефективний радіус у зоні шва становить 0,034 м:

$$A_{\text{eff}2} = 3,14 \cdot (0,034)^2 \approx 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$F_{\text{hold}2} = 75 \cdot 10^3 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} \approx 272 \text{ Н.}$$

Однак через зношування хвилястого профілю присоски на 15% її сила зменшується:

$$F''_{\text{hold}} = 0,85 \cdot 272 \approx 231 \text{ Н.}$$

Допустиме прискорення:

$$a''_{\text{max}} = 231 / (2 \cdot 1,6) \approx 72 \text{ м/с}^2.$$

Зниження прискорення у силіконової присоски менше критичне, ніж у випадку гумової з мікротріщинами. Тому навіть із частковими дефектами силіконова присоска забезпечує більшу стабільність циклу та менший ризик втрати деталі у високодинамічних режимах.

Палетайзингові операції є найбільш чутливими до зниження сили утримання, оскільки роботи виконують швидкі вертикальні та горизонтальні переміщення з високими прискореннями. Якщо дефекти присоски зменшують силу утримання нижче від порогу безпечності, існує ризик відриву деталі. Такі випадки не лише зупиняють лінію, а й створюють ризики пошкодження виробів і травмування обладнання. Тому у стандартах передбачені регулярні перевірки витоків та контроль часового профілю створення вакууму [47].

Дефекти присосок впливають і на якість складання, оскільки зменшення стабільності захвату викликає мікрозсуви деталі під час транспортування. Такі мікрозсуви накопичуються і можуть викликати відхилення у позиціонуванні, що стає критичним для операцій стикування, зварювання або встановлення деталей у фіксатори. Недостатня якість захвату часто є причиною каскадних похибок, які важко компенсувати навіть за наявності систем машинного зору.

Пласкі поліуретанові присоски демонструють найвищу стійкість до абразивних пошкоджень, однак є найбільш чутливими до мікротріщин по периферії. Силіконові гофровані присоски мають кращу здатність до компенсації нерівностей, але швидше втрачають жорсткість і піддаються залишковим деформаціям. Гумові присоски мають найнижчу довговічність та найвищий ризик старіння. Термопластичні еластomersи демонструють збалансовані характеристики, але потребують захисту від хімічних реагентів [48].

З точки зору стабільності продуктивності, силіконові присоски забезпечують найменшу варіабельність сили утримання при дефектах, однак поліуретанові - найменше чутливі до абразивного зношування. У лініях з високою шорсткістю поверхонь доцільно використовувати комбіновані присоски з м'якою контактною зоною та жорстким корпусом.



Рисунок 2.4 Асиметрична конструкція пневмо захвату створює додаткові нерівномірні навантаження на вакуумні присоски

2.3. Основні технології виготовлення вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних роботів в залежності від типу матеріалу

Якість виготовлення вакуумних присосок є визначальним фактором стабільності пневматичного захоплення у складальних операціях, де універсальний робот виконує багаторазові цикли «захоплення, перенесення, орієнтація, позиціонування, відпускання». Для вакуумного захвату критичною є не лише геометрична точність присоски, а й мікрорельєф її робочої кромки, цілісність

еластомерної структури, однорідність твердості та відсутність внутрішніх дефектів, що формують канали витоку. Саме технологія виготовлення, обрана з урахуванням матеріалу, визначає, якою буде шорсткість поверхні після формування, наскільки повторюваними стануть деформаційні властивості кромки, як швидко наростатиме знос при контакті з деталлю та наскільки прогнозовано присоска утримуватиме вакуум у динамічних режимах руху робота [40–41]. У виробничих осередках, де маніпуляція деталями поєднується з наступними технологічними операціями, наприклад роботизованим зварюванням вузлів, вплив якості захвату набуває подвійного характеру: через втрату стабільності вакууму зменшується продуктивність і погіршується точність позиціонування, а відхилення базування здатне змінювати зазор, взаємне перекриття кромки і, як наслідок, формування шва та рівень залишкових напружень у конструкції.

Технологічні маршрути виготовлення вакуумних присосок доцільно розглядати як сукупність операцій формування еластомерної оболонки, стабілізації структури (вулканізація або отвердіння), забезпечення мікрогеометрії поверхні, видалення облоя та післяобробки, що задає кінцеву шорсткість і чистоту. Для гумових матеріалів традиційного типу, зокрема нітрильних, етилен-пропіленових або сумішей з наповнювачами, основними залишаються пресування у прес-формах (компресійне формування) та лиття під тиском гумових сумішей. Для силіконових еластомерів, які широко застосовують у вакуумних присосках через термостійкість і хімічну інертність, промисловим стандартом стало лиття рідкої силіконової гуми (Liquid Silicone Rubber, LSR) у закриті форми з холодноканалюючою подачею та інтенсивним нагрівом порожнин форми. Для поліуретанових матеріалів поширеним є реакційне лиття та заливання у форми, де якість значною мірою визначається дегазацією, чистотою компонентів і режимами отвердіння [43, 48–49]. Для термопластичних еластомерів (TPE, TPV) домінує класичне лиття під тиском з короткими циклами і високою повторюваністю розмірів, але з більш жорсткими

вимогами до керування дефектами поверхні, що безпосередньо впливають на герметичність контакту [44–45].

Компресійне формування гуми забезпечує відносно просте оснащення і можливість отримання присосок з товстими стінками та вираженими гофрами, що підвищує адаптивність до нерівностей деталі. Проте саме для присосок, орієнтованих на високочастотні цикли складання і палетайзингу, пресування має ризики, пов'язані з варіативністю розподілу температури у прес-формі, локальним недовулканізуванням або, навпаки, «перепалом» суміші. Ці явища формують неоднорідність твердості по периметру кромки, а отже зміну контактних тисків і мікропротікань при одному й тому самому розрідженні. У литті під тиском гумових сумішей повторюваність краща, однак підвищується чутливість до вентиляції порожнини та до стану поверхні форми: повітряні пастки, зварні лінії потоку, мікрораковини та облой стають джерелом зростання шорсткості на ущільнювальній кромці [40–41]. Для вакуумних присосок це означає, що навіть при номінально правильній геометрії діаметрів і висоти фактична площа герметичного контакту зменшується, а час досягнення цільового вакууму збільшується, що безпосередньо подовжує цикл робота на кожному захопленні.

Для LSR-лиття характерним є поєднання дуже низької в'язкості матеріалу в зоні подачі та швидкого прискорення реакції зшивання при підвищенні температури форми. Цей баланс забезпечує високу якість відтворення мікрогеометрії прес-форми і дозволяє отримувати «чисту» поверхню присоски з мінімальною шорсткістю за умови правильно підібраних режимів. Водночас низька в'язкість LSR робить процес надзвичайно чутливим до зазорів на площині рознімання, до параметрів утримання тиску та до стабільності дозування, оскільки мікрооблой у зоні кромки може утворюватися навіть при незначних розузгодженнях оснащення, а його видалення без зміни шорсткості часто складне [49]. Саме тому технологія виготовлення LSR-присосок у практиці роботизованих

захватів розглядається не як «просте лиття», а як процес керування поверхневими дефектами, де взаємопов'язані температура інструмента, час вулканізації, параметри охолодження та післяопераційна обробка, включно з видаленням облоя та можливим постотвердінням [43, 49]. Для поліуретанових присосок якість поверхні значною мірою визначається чистотою форми, режимом заливання, вакуумною дегазацією і керуванням тепловим режимом отвердіння, оскільки мікропухирці та усадочні порожнини формують дефекти, що проявляються як локальні «пори» на кромці і стають каналами витоку вакууму [48].

Порівняння технологій виготовлення через призму продуктивності роботизованого захоплення має спиратися на причинно-наслідковий ланцюг «режими виготовлення → шорсткість і дефектність кромки → швидкість наростання вакууму і стабільність утримання → час циклу і відсоток збоїв → фактична продуктивність складальної операції». У литті під тиском еластомерів і ТРЕ продуктивність досягається коротким циклом формування та високою повторюваністю, проте саме дефекти поверхні, такі як сліди потоку, мікротріщини, «апельсинова кірка», зварні лінії і мікрооблой, визначають, чи забезпечить присоска заданий рівень герметичності при контакті з реальною деталлю [44–45]. Компресійне формування має більшу інерційність циклу і вищу варіативність шорсткості внаслідок розподілу тиску і температури у товщі заготовки, але може дати перевагу у стійкості до грубих поверхонь деталі завдяки більшій податливості стінок. LSR-лиття за правильної організації обладнання, включно з точним змішуванням компонентів у співвідношенні 1:1 та стабільним термоконтролем форми, забезпечує найвищу повторюваність кромки і найменший розкид шорсткості, що критично для високошвидкісного палетайзингу, де навіть десятки частки секунди на етапі «присмоктування» множаться на тисячі циклів зміни [43, 49]. Поліуретанові технології дають високу зносостійкість, проте при порушенні дегазації різко зростає частка внутрішніх дефектів, що веде до нестабільних

мікровитоків і збільшення відмов у захопленні, особливо при обробці шорстких або запилених поверхонь [48].

Шорсткість робочої кромки присоски формується насамперед мікрорельєфом порожнини прес-форми та станом поверхні після видалення облоя. Для еластомерів з високим заповненням наповнювачами характерним є «видавлювання» частинок на поверхню, що збільшує R_a і викликає мікропротікання при контакті з гладкими деталями, тоді як для LSR типові ризики пов'язані з утворенням тонких плівок облоя, які механічно видаляють після формування. Якщо видалення проводиться агресивними методами, зокрема шліфуванням або нерегламентованим обрізанням, формується хвилястість і задирки, які збільшують ефективну висоту мікрощілини у зоні ущільнення. Технології кріогенного видалення облоя, де частина з облоєм охолоджується нижче температури склування й обробляється ударним середовищем, дають кращу повторюваність якості кромки, але вимагають підбору режимів, щоб не викликати мікротріщини у тонких елементах гофри [47]. На практиці саме поєднання полірування форми, керованої вентиляції, стабільних температурних режимів і «м'якої» післяобробки визначає, чи буде присоска працювати як герметизувальний елемент, а не як «витоківий дросель» у вакуумній системі робота.

Вплив якості захвату на операцію складання проявляється через точність і повторюваність базування. Якщо присоска має локальні дефекти кромки або підвищену шорсткість, рівень вакууму в зоні контакту стає залежним від мікроположення присоски відносно деталі. Це призводить до зміни деформації гофри та до коливань положення центру захоплення, що збільшує розкид координат деталі у хваті. У складальних операціях це проявляється як збільшення часу на корекцію положення або як зростання частки помилок позиціонування, а у випадку подальшого роботизованого зварювання може формувати систематичні відхилення зазору чи перекосу, що впливає на умови формування шва, стабільність переносу

металу та ймовірність дефектів з'єднання. Таким чином, технологічна якість виготовлення присоски опосередковано впливає не лише на продуктивність маніпуляції, а й на якість наступних операцій у технологічному ланцюгу.

Для кількісного обґрунтування взаємозв'язку режимів виготовлення, дефектності й продуктивності розглянемо приклад, де вакуумна присоска з силіконового еластомеру LSR призначена для роботизованої складально-зварювальної операції з наступним палетайзингом. Деталь є штампованим сталевим кронштейном масою $m = 2,0$ кг, який робот захоплює з піддона, встановлює у кондуктор, після чого у тому самому осередку виконується роботизоване MIG/MAG-зварювання кутового шва довжиною $L_{\text{ш}} = 0,42$ м. Для зварювання прийнято струм $I = 180$ А, напругу $U = 21$ В, швидкість переміщення робота $v_z = 8$ мм/с, що відповідає часу проходження шва $t_z = L_{\text{ш}} / v_z = 420 \text{ мм} / 8 \text{ мм/с} = 52,5$ с. З урахуванням підходів, відходів та стабілізації дуги приймемо додатковий час 7,5 с, тоді сумарно зварювальна частина циклу становить близько 60 с. Маніпуляційна частина включає дві вакуумні дії на одну деталь, захоплення заготовки та зняття вузла після зварювання, тому навіть невелике збільшення часу «присмоктування» і зростання відмов захвату здатні суттєво вплинути на фактичну продуктивність і, що важливіше, на надійність палетайзингу та ризик пошкодження виробу.

Технологічний процес виготовлення присоски виконують методом LSR-лиття під тиском з подальшим охолодженням та видаленням облоя. Для інженерної оцінки тривалості формувального циклу приймемо, що цикл лиття можна представити як $t_{\text{ц}} = t_{\text{впр}} + t_{\text{вулк}} + t_{\text{ох}} + t_{\text{вил}}$, де $t_{\text{впр}}$ є часом впорскування і дозування, $t_{\text{вулк}}$ є часом вулканізації в формі, $t_{\text{ох}}$ є часом охолодження до температури безпечного виймання, $t_{\text{вил}}$ є часом виштовхування та маніпуляції виробом. Для типового виробництва LSR присосок $t_{\text{впр}}$ і $t_{\text{вил}}$ можуть становити сумарно близько 8–12 с залежно від оснащення, тоді як $t_{\text{вулк}}$ і $t_{\text{ох}}$ визначаються тепловим режимом форми та товщиною деталі [43, 49]. Нехай температура виймання приймається $T_{\text{вим}}$

$= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальна температура в порожнині форми при витримці відповідає $T_{\max}$, яка в межах задачі може змінюватися від 150 до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тоді охолодження можна оцінити співвідношенням $t_{\text{ох}} = (T_{\max} - T_{\text{вим}}) / CR$, де CR є середня швидкість охолодження в $^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ у заданому інтервалі 20–100. Для подальших розрахунків розглянемо два варіанти режимів, які відрізняються енергонасиченістю, швидкістю охолодження та відхиленням $T_{\max}$ від оптимуму.

Енергонасиченість процесу для цілей порівняння введемо як інтегральну енергетичну густину Ed у $\text{кДж}/\text{м}^2$, що характеризує сумарний тепловий вплив на поверхню виробу під час вулканізації і визначається як $Ed = q'' \cdot t_{\text{вулк}} / 1000$, де q'' є середній тепловий потік до поверхні порожнини форми у $\text{Вт}/\text{м}^2$, $t_{\text{вулк}}$ задається в секундах. Така форма параметра зручна для оцінок, оскільки відображає причинний зв'язок між інтенсивністю нагріву, кінетикою і ризиком утворення непровулканізованих зон або пористості при недостатньому тепловому впливі, а також ризиком «перепалу» і термодеструкції при надмірному нагріві [43, 49]. Розглянемо варіант А як технологічно збалансований: $T_{\max} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $CR = 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, $Ed = 120\text{ кДж}/\text{м}^2$. Розглянемо варіант Б як режим з підвищеним перегрівом і швидким охолодженням за недостатньої енергонасиченості: $T_{\max} = 340\text{ }^{\circ}\text{C}$, $CR = 90\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, $Ed = 60\text{ кДж}/\text{м}^2$. Обидва варіанти дозволяють показати вплив режимів на дефектність.

Спершу оцінимо тривалість формувального циклу за рахунок охолодження. Для варіанта А час охолодження $t_{\text{ох,А}} = (220 - 70) / 40 = 150/40 = 3,75\text{ хв}$, тобто 225с. Для варіанта Б час охолодження $t_{\text{ох,Б}} = (340 - 70) / 90 = 270/90 = 3,0\text{ хв}$, тобто 180с. Формально варіант Б дає коротший час охолодження, але це скорочення досягається високою швидкістю охолодження, яка підсилює термоградієнти в тонких елементах присоски і збільшує ймовірність усадочних мікропорожнин та залишкових напружень, що надалі проявляються як мікротріщини кромки при циклічному стисканні [41, 48]. З урахуванням $t_{\text{впр}} + t_{\text{вил}} = 10\text{ с}$ і прийнятого $t_{\text{вулк}} = 20\text{ с}$

для даної товщини гофри отримуємо $t_{ц,А} \approx 10 + 20 + 225 = 255$ с, а $t_{ц,Б} \approx 10 + 20 + 180 = 210$ с. З позиції продуктивності виготовлення варіант Б виглядає привабливішим, однак реальна економіка циклу для вакуумних присосок визначається не лише виходом по часу, а й втратами через дефектність, стабільність шорсткості та ресурс роботи присоски у виробничому осередку.

Для кількісного порівняння дефектності, приймемо напівемпіричну модель, що узгоджується з загальними тенденціями технології еластомерів: підвищення швидкості охолодження збільшує дефектність через усадочні порожнини і термонапруження; відхилення T_{max} від оптимальної температури зшивання збільшує дефектність через недо- або перепровулканізацію; зростання E_d зменшує дефектність за рахунок повнішого зшивання і стабільнішої реології фронту потоку [43, 49]. Нормуємо параметри: $\phi CR = (CR - 20)/80$, $\phi Ed = (Ed - 35)/125$, $\phi T = ((T_{max} - 220)/250)^2$. Тоді оцінимо дефектність D у мм як $D = 0,35 + 0,9 \cdot \phi CR + 0,8 \cdot \phi T - 0,5 \cdot \phi Ed$, після чого інтерпретуємо D як характерний розмір дефекту Defect Size.

Для варіанта А маємо $\phi CR = (40 - 20)/80 = 0,25$; $\phi Ed = (120 - 35)/125 = 0,68$; $\phi T = 0$. Отже $DA = 0,35 + 0,9 \cdot 0,25 + 0,8 \cdot 0 - 0,5 \cdot 0,68 = 0,35 + 0,225 - 0,34 = 0,235$ мм, тобто Defect Size $\approx 0,24$ мм. Для варіанта Б маємо $\phi CR = (90 - 20)/80 = 0,875$; $\phi Ed = (60 - 35)/125 = 0,20$; $\phi T = ((340 - 220)/250)^2 = (120/250)^2 = 0,2304$. Тоді $DB = 0,35 + 0,9 \cdot 0,875 + 0,8 \cdot 0,2304 - 0,5 \cdot 0,20 = 0,35 + 0,7875 + 0,1843 - 0,10 = 1,2218$ мм, тобто Defect Size $\approx 1,22$ мм. Отримані значення повністю відображають принципову різницю між режимами: варіант Б має приблизно у п'ять разів більший характерний розмір дефекту.

Далі пов'яжемо дефектність з шорсткістю кромки, оскільки внутрішні порожнини і поверхневі раковини проявляються як «пітинг» та мікровиступи, що збільшують Ra і висоту мікрощілини в зоні ущільнення. Для інженерної оцінки приймемо, що шорсткість кромки присоски визначається сумою базової шорсткості, заданої поліруванням форми, і складової від дефектності: $Ra = Ra_0 +$

$kR \cdot D$, де $Ra_0 = 0,4$ мкм, $kR = 2,5$ мкм/мм. Тоді $Ra_A = 0,4 + 2,5 \cdot 0,235 = 0,99$ мкм, а $Ra_B = 0,4 + 2,5 \cdot 1,222 = 3,46$ мкм. Таке зростання Ra є критичним для вакуумного ущільнення, оскільки проникність мікроканалу витоку збільшується непропорційно висоті щілини, що в пневмовакуумних системах проявляється як падіння досяжного розрідження і як зростання часу виходу на робочий вакуум при кожному захопленні [41, 44]. Введемо коефіцієнт герметизації η , що зменшує ефективну площу герметичного контакту, у вигляді $\eta = 1/(1 + \beta \cdot Ra)$, де $\beta = 0,2$ 1/мкм. Отже $\eta_A = 1/(1 + 0,2 \cdot 0,99) = 0,835$, а $\eta_B = 1/(1 + 0,2 \cdot 3,46) = 0,591$. Ці значення означають, що при однаковій геометрії присоски варіант Б має приблизно на 29% нижчу ефективність ущільнення.

Оцінимо утримувальну силу присоски для обох варіантів, оскільки вона визначає надійність палетайзингу та стійкість до динамічних навантажень при прискореннях робота. Приймаємо, що застосовується одна присоска діаметром $d = 40$ мм, тоді площа $A = \pi(d/2)^2 = \pi \cdot 0,02^2 = 0,001257$ м². При цільовому розрідженні $\Delta p = 60$ кПа утримувальна сила без урахування дефектів дорівнює $F_0 = \Delta p \cdot A = 60000 \cdot 0,001257 = 75,4$ Н. З урахуванням η отримаємо $F_A = 75,4 \cdot 0,835 = 62,9$ Н, а $F_B = 75,4 \cdot 0,591 = 44,6$ Н. Для надійного палетайзингу потрібно врахувати запас на прискорення і удари. Якщо прийняти максимальне вертикальне прискорення $a = 2$ м/с² та коефіцієнт запасу $K = 2$, тоді необхідна сила $F_{\text{потр}} = K \cdot m \cdot (g + a) = 2 \cdot 2,0 \cdot (9,81 + 2) = 47,2$ Н. Отже для варіанта А запас є суттєвим, тоді як для варіанта Б умова не виконується, що означає ймовірність зриву деталі при пікових прискореннях або при додаткових збуреннях, наприклад при короткочасному падінні вакууму через забруднення або локальну нерівність поверхні. Це і є практичний прояв того, як якість виготовлення присоски безпосередньо визначає надійність операції складання та палетайзингу.

Вплив шорсткості і дефектності на продуктивність проявляється також через час виходу на робочий вакуум. Для спрощеної оцінки приймемо, що евакуація

об'єму вакуумної лінії V здійснюється ежектором з еквівалентною подачею $Q_p = 70 \text{ л/хв}$, тобто $1,167 \text{ л/с}$, а ефективна подача зменшується через витоки пропорційно $(1 - \eta)$. Тоді $Q_{\text{ef}} = Q_p \cdot \eta$. Нехай приведений об'єм системи з урахуванням шлангів і порожнин становить $V = 0,5 \text{ л}$, а час досягнення абсолютного тиску $p_2 = 41 \text{ кПа}$ з початкового $p_1 = 101 \text{ кПа}$ оцінюється як $t_{\text{вак}} = (V/Q_{\text{ef}}) \cdot \ln(p_1/p_2)$. Оскільки $\ln(101/41) = 0,90$, для варіанта А маємо $Q_{\text{ef,А}} = 1,167 \cdot 0,835 = 0,974 \text{ л/с}$, звідси $t_{\text{вак,А}} = (0,5/0,974) \cdot 0,90 = 0,462 \text{ с}$. Для варіанта Б маємо $Q_{\text{ef,Б}} = 1,167 \cdot 0,591 = 0,689 \text{ л/с}$, звідси $t_{\text{вак,Б}} = (0,5/0,689) \cdot 0,90 = 0,653 \text{ с}$. Різниця становить близько $0,19 \text{ с}$ на одну вакуумну подію. У розглянутому осередку маємо дві вакуумні події на одну деталь, отже чистий приріст часу циклу лише за рахунок вакуумного наростання складає приблизно $0,38 \text{ с}$. На тлі зварювального часу близько 60 с цей приріст виглядає малим, однак саме він формує кумулятивні втрати продуктивності у багатозмінній роботі, а ще важливіше, дефектна присоска варіанта Б не забезпечує необхідної утримувальної сили, тобто створює ризик зриву і незапланованих зупинок, що для роботизованого осередку різко погіршує загальну ефективність обладнання через простої та повторне налагодження.

Таким чином, інженерне порівняння демонструє типовий конфлікт між швидкістю виготовлення присоски та її експлуатаційною якістю. Варіант Б має коротший час формувального циклу $t_{\text{ц,Б}}$, але через поєднання високого T_{max} , високого CR та недостатнього Ed формує більший Defect Size, що збільшує шорсткість, зменшує герметичність і переводить захват у «ризиковий» режим з точки зору палетайзингу. Варіант А є повільнішим у виробництві, але забезпечує малі дефекти та нижчу шорсткість кромки, що підвищує утримувальну здатність і стабілізує час вакуумування. У контексті довговічності присоски різниця ще суттєвіша, оскільки дефекти розміру понад 1 мм у тонких елементах гофри стають концентраторами напружень і ініціаторами тріщин при циклічному стисканні, що скорочує ресурс, збільшує частоту заміни та підвищує вірогідність раптових відмов

[41, 48]. Для роботизованого виробництва, де простій через відмову захвату часто коштує дорожче, ніж економія на скороченні циклу лиття, пріоритетом має бути технологічна стабільність поверхні і дефектності, а не мінімізація часу формування за будь-яку ціну.

Загальна логіка вибору технології виготовлення вакуумних присосок у прив'язці до матеріалу зводиться до узгодження трьох груп вимог. Перша група визначає експлуатаційні умови, зокрема температуру і забруднення, що у зварювальних та складально-зварювальних осередках підвищує доцільність силіконових і фторсиліконових матеріалів, а у чистих високошвидкісних операціях може відкрити шлях для TPE. Друга група вимог пов'язана з продуктивністю захоплення, де визначальними стають шорсткість кромки, повторюваність пружних властивостей та мінімізація витоків, що найкраще забезпечується керованим литтям LSR або високоякісним литтям TPE з контролем дефектів поверхні [43–45, 49]. Третя група вимог стосується керованості виготовлення, а саме здатності стабільно утримувати технологічні параметри, що формують Defect Size і шорсткість, включно з температурою форми, швидкістю охолодження та енергонасиченістю процесу. Саме ця група визначає, чи буде захват працювати як надійний функціональний елемент, чи перетвориться на джерело нестабільності продуктивності та якості складання.

Оцінювання якості вакуумних присосок та впливу технологічних режимів на формування шорсткості, дефектності й експлуатаційної надійності доцільно здійснювати не лише на основі окремих параметрів, таких як максимальна температура, швидкість охолодження або енергонасиченість формування, але й шляхом виділення типових режимних «станів» технологічної системи. Одним з найефективніших інструментів такого структурного аналізу є методи кластеризації, які дозволяють групувати технологічні режими виготовлення або результати контролю якості на основі їх багатовимірної подібності. На відміну від класичної

лінійної інтерпретації окремих параметрів, кластеризація розкриває латентну структуру даних, що відповідає фізично обґрунтованим технологічним «класам поведінки» матеріалу під час формування присоски.

Задача кластеризації може бути інтерпретована як пошук конфігурації мінімальної «потенціальної енергії» системи параметрів. Простір технологічних режимів виготовлення присоски ($T_{\max}$, CR, Ed, Defect Size, Ra тощо) утворює багатовимірний ландшафт, у якому кожен режим відповідає певному вектору стану. Алгоритм кластеризації (зокрема метод KMeans) формує в цьому просторі стійкі групи точок, що є аналогом фізичних «потенціальних ям» або режимів технологічної стабільності. У межах кожного кластеру технологічні параметри знаходяться у рівноважному співвідношенні, забезпечуючи подібний рівень якості поверхні та дефектності, а також подібний характер впливу на утримувальну здатність робочої кромки.

Математична основа KMeans полягає у мінімізації суми квадратів відстаней між точками та центрами їх кластерів. У технологічній інтерпретації це відповідає мінімізації розкиду параметрів у межах кожного режиму. Наприклад, якщо максимальна температура $T_{\max}$, швидкість охолодження CR (cooling rate) та енергетична щільність Ed (energy density) для певної групи присосок утворюють компактний кластер із низьким значенням Defect Size, це означає, що технологічний процес працює в стабільній зоні, де відхилення режимів не призводить до суттєвих змін шорсткості та утримувальної здатності. Навпаки, широкий розкид та відсутність структурованих груп свідчать про високу чутливість процесу до параметрів і про необхідність його переналаштування.

Показник інерції, який обчислюється під час кластеризації, має прямий фізичний зміст. Він відповідає сумарній «енергетичній варіативності» всередині кластерів, тобто величині, що описує, наскільки сильно відхиляються окремі присоски або режими виготовлення від свого «центру тяжіння». Чим нижча інерція,

тим більш однорідним є кластер, а отже технологічна стадія або результат контролю якості демонструють стабільність і передбачуваність. Для виробництва вакуумних присосок це означає однотипність формування мікрогеометрії кромки і повторюваність Defect Size, що є ключовим для прогнозованого вакуумного утримання у складальних операціях.

Другим фундаментальним показником кластеризації є коефіцієнт силуету (Silhouette Score), що порівнює відстані між точками одного кластеру та відстані до найближчого сусіднього кластеру. У фізичній інтерпретації це показник «просторової відокремленості» режимів, який описує, наскільки чітко відрізняються технологічні стани один від одного. Високий коефіцієнт силуету вказує на існування добре структурованих зон технологічної стабільності, наприклад умов, коли Ed і CR узгоджені з товщиною виступів присоски так, що утворюється мінімальний Defect Size. Низький коефіцієнт означає накладання станів, коли технологічна система може легко перейти з однієї зони стабільності в іншу, що у реальному виробництві проявляється у нерегулярності шорсткості кромки та варіативності часу наростання вакууму.

У контексті вакуумних присосок кластеризація дозволяє виокремлювати три принципово важливі типи технологічних зон:

1. **Зони оптимальної стабільності**, де Tmax, CR та Ed перебувають у фізично збалансованому співвідношенні, Defect Size знаходиться в межах 0,2–0,4 мм, а шорсткість кромки забезпечує високий коефіцієнт герметизації. Такі присоски демонструють мінімальний час вакуумування і найвищу повторюваність утримувальної сили.
2. **Зони допустимої варіативності**, де Defect Size або Ra перебувають у середньому діапазоні (0,5–0,8 мм), але технологічний процес ще зберігає передбачуваність. Присоски з таких зон можуть експлуатуватися у

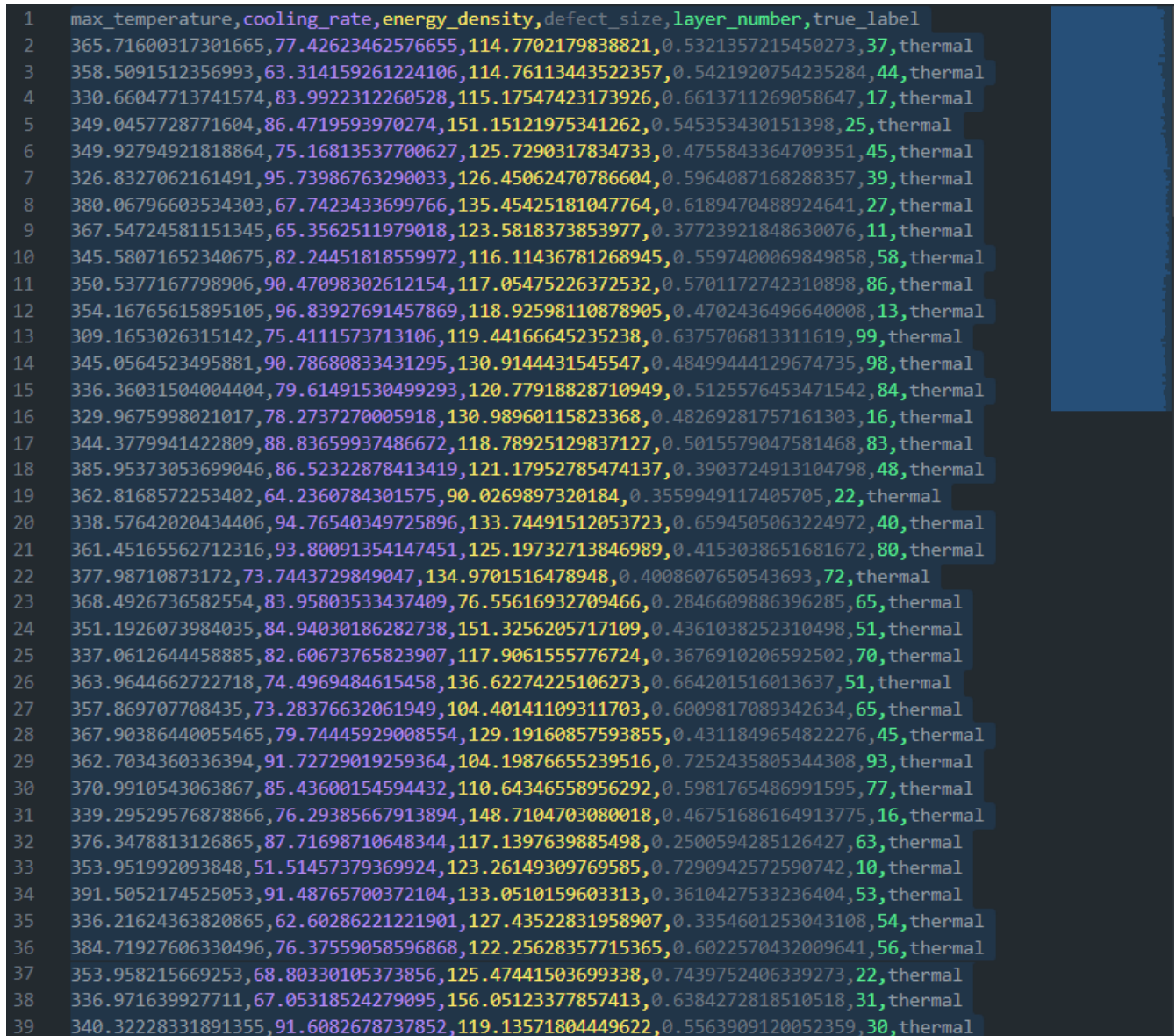
палетайзингових операціях, але з обмеженням на максимальне прискорення робота, що пов'язано зі зниженням коефіцієнта η .

3. **Зони технологічного ризику**, у яких $T_{\max}$ перевищує рекомендований інтервал, CR занадто велике або Ed недостатнє. Ці фактори призводять до Defect Size понад 1 мм, що формує значну висоту мікрощілин, зменшує η до критичних значень та погіршує утримувальну силу, що є недопустимим для надійного палетайзингу.

Таким чином, кластеризація виступає не лише статистичним інструментом, але й важливим засобом фізично обґрунтованої інтерпретації технологічних процесів виготовлення еластомерних присосок. Вона дозволяє кількісно оцінити, у яких діапазонах параметрів формується стабільна структура матеріалу, а де виникають потенційні дефекти, здатні погіршити герметичність та зменшити експлуатаційну надійність пневматичних захватів. Це робить кластеризацію корисним інструментом у задачах оптимізації, передиктивного контролю якості та підвищення довговічності вакуумних захватів у роботизованих складальних осередках.

Провели дослідження параметрів процесу. У наборі даних використовували ознаки `max_temperature`, `cooling_rate`, `energy_density`, `defect_size`. Фізично це відповідає таким величинам у виготовленні присоски: `max_temperature` є максимальною температурою у зоні формування (температура стінки форми, поверхні або ядра виробу), яка визначає швидкість зшивання еластомеру, ступінь вулканізації, ризик термодеструкції та утворення газів. Для LSR це режим, що визначає кінетику реакції зшивання; `cooling_rate` відображає інтенсивність тепловідведення після піку температури - визначає термоградієнти, усадочні деформації, залишкові напруження в тонких елементах гофри та ймовірність мікротріщин або усадочних порожнин, а також стабільність геометрії ущільнювальної кромки; `energy_density` є інтегральною характеристикою

«теплого балансу» процесу, тобто наскільки енергонасиченою була стадія формування, що впливає на повноту зшивання, в'язко-пружні властивості та однорідність структури. defect_size фізично відповідає характерному розміру дефекту - порою, раковині або мікротріщиною, що стає каналом витоку або ініціатором руйнування кромки під циклічним стисканням.



1	max_temperature	cooling_rate	energy_density	defect_size	layer_number	true_label
2	365.71600317301665	77.42623462576655	114.7702179838821	0.5321357215450273	37	thermal
3	358.5091512356993	63.314159261224106	114.76113443522357	0.5421920754235284	44	thermal
4	330.66047713741574	83.9922312260528	115.17547423173926	0.6613711269058647	17	thermal
5	349.0457728771604	86.4719593970274	151.15121975341262	0.545353430151398	25	thermal
6	349.92794921818864	75.16813537700627	125.7290317834733	0.4755843364709351	45	thermal
7	326.8327062161491	95.73986763290033	126.45062470786604	0.5964087168288357	39	thermal
8	380.06796603534303	67.7423433699766	135.45425181047764	0.6189470488924641	27	thermal
9	367.54724581151345	65.3562511979018	123.5818373853977	0.37723921848630076	11	thermal
10	345.58071652340675	82.24451818559972	116.11436781268945	0.5597400069849858	58	thermal
11	350.5377167798906	90.47098302612154	117.05475226372532	0.5701172742310898	86	thermal
12	354.16765615895105	96.83927691457869	118.92598110878905	0.4702436496640008	13	thermal
13	309.1653026315142	75.4111573713106	119.44166645235238	0.6375706813311619	99	thermal
14	345.0564523495881	90.78680833431295	130.9144431545547	0.48499444129674735	98	thermal
15	336.36031504004404	79.61491530499293	120.77918828710949	0.5125576453471542	84	thermal
16	329.9675998021017	78.2737270005918	130.98960115823368	0.48269281757161303	16	thermal
17	344.3779941422809	88.83659937486672	118.78925129837127	0.5015579047581468	83	thermal
18	385.95373053699046	86.52322878413419	121.17952785474137	0.3903724913104798	48	thermal
19	362.8168572253402	64.2360784301575	90.0269897320184	0.3559949117405705	22	thermal
20	338.57642020434406	94.76540349725896	133.74491512053723	0.6594505063224972	40	thermal
21	361.45165562712316	93.80091354147451	125.19732713846989	0.4153038651681672	80	thermal
22	377.98710873172	73.7443729849047	134.9701516478948	0.4008607650543693	72	thermal
23	368.4926736582554	83.95803533437409	76.55616932709466	0.2846609886396285	65	thermal
24	351.1926073984035	84.94030186282738	151.3256205717109	0.4361038252310498	51	thermal
25	337.0612644458885	82.60673765823907	117.9061555776724	0.3676910206592502	70	thermal
26	363.9644662722718	74.4969484615458	136.62274225106273	0.664201516013637	51	thermal
27	357.869707708435	73.28376632061949	104.40141109311703	0.6009817089342634	65	thermal
28	367.90386440055465	79.74445929008554	129.19160857593855	0.4311849654822276	45	thermal
29	362.7034360336394	91.72729019259364	104.19876655239516	0.7252435805344308	93	thermal
30	370.9910543063867	85.43600154594432	110.64346558956292	0.5981765486991595	77	thermal
31	339.29529576878866	76.29385667913894	148.7104703080018	0.46751686164913775	16	thermal
32	376.3478813126865	87.71698710648344	117.1397639885498	0.2500594285126427	63	thermal
33	353.951992093848	51.51457379369924	123.26149309769585	0.7290942572590742	10	thermal
34	391.5052174525053	91.48765700372104	133.0510159603313	0.3610427533236404	53	thermal
35	336.21624363820865	62.60286221221901	127.43522831958907	0.3354601253043108	54	thermal
36	384.71927606330496	76.37559058596868	122.25628357715365	0.6022570432009641	56	thermal
37	353.958215669253	68.80330105373856	125.47441503699338	0.7439752406339273	22	thermal
38	336.971639927711	67.05318524279095	156.05123377857413	0.6384272818510518	31	thermal
39	340.3228331891355	91.6082678737852	119.13571804449622	0.5563909120052359	30	thermal

Рисунок 2.5 Набір даних для кластеризації режимів виробництва вакуумних присосок

На основі отриманих даних через систему моніторингу прес-форми і лінії: температурні датчики у плитах, дані термостатів, профіль охолодження, параметри

циклу, витрата енергії нагріву, а також результати контролю якості побудували графіки візуалізації розкиду основних параметрів технологічного процесу.

Наведені графіки демонструють, що технологічний процес виготовлення вакуумних присосок має виражену «режимну» структуру. Це означає, що дефектність не є випадковою, а формується у кількох відносно стійких комбінаціях параметрів, які можна інтерпретувати як різні фізичні механізми формування браку та різні рівні ризику для експлуатаційної надійності присоски у вакуумному захваті.

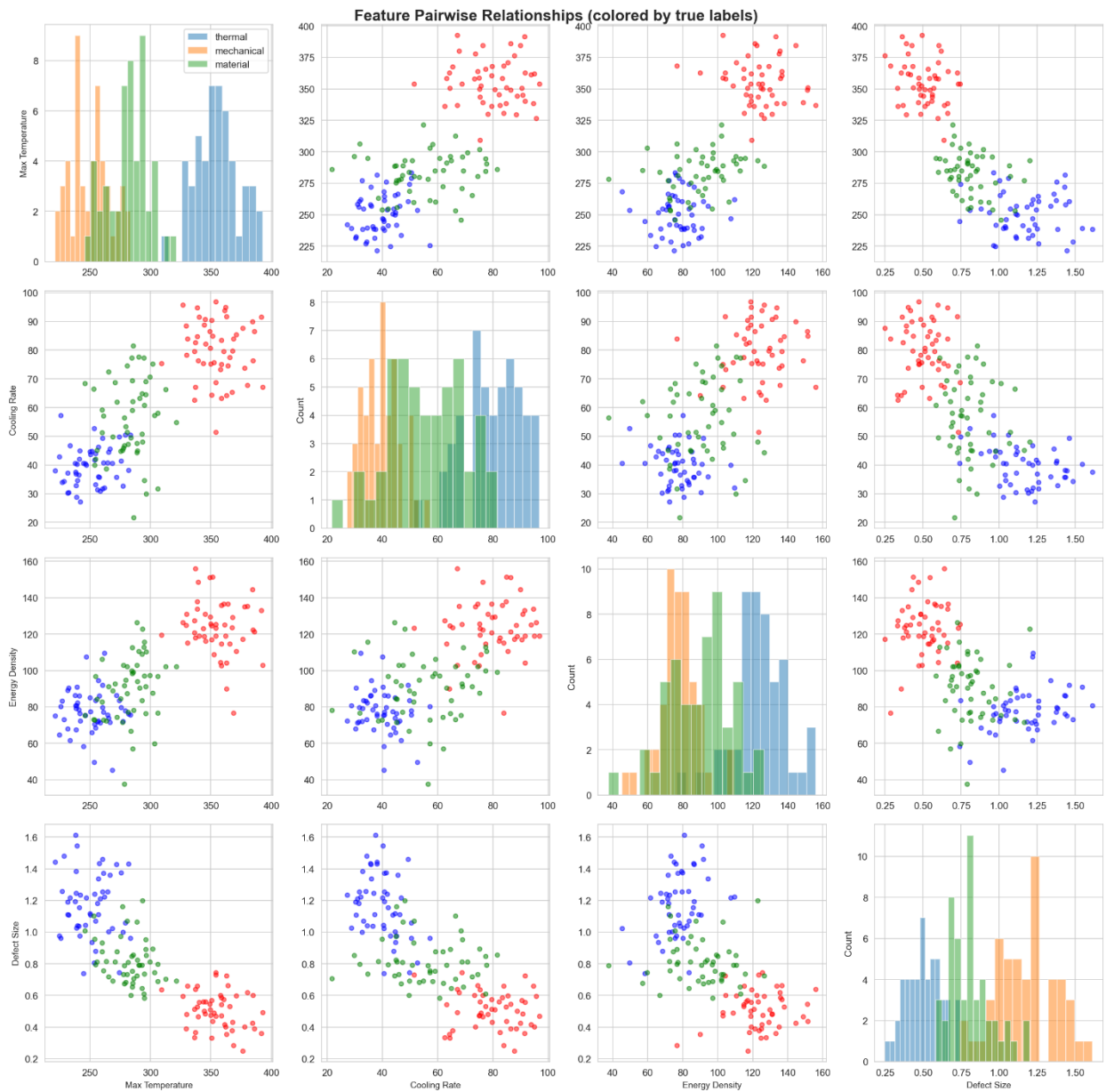


Рисунок 2.6 Розподіл досліджуваних характеристик

На підставі рис. 2.6 провели пошук кореляцій між тепловими режимами та дефектністю. Встановлено, що великі defect_size групуються при високих cooling_rate і високих max_temperature, це інтерпретується як кластер термомеханічних дефектів, де домінують усадочні мікропорожнини і термонапруження в кромці. Якщо defect_size зростає при низькій energy_density за помірних температур, це типово відповідає дефектам «недостатнього зшивання» або підвищеної пористості через неповне отвердіння, коли матеріал залишається надто податливим, кромка швидко «заламуються», а мікроканали витoku збільшуються. Якщо ж дефекти з'являються незалежно від температури, але пов'язані з аномальною energy_density або розкидом, це може вказувати на «матеріальний» механізм: невірне співвідношення компонентів, волога, дегазація, наповнювачі, що виходять на поверхню, або помилки змішування. Така попередня візуалізація допомагає сформулювати гіпотези, які далі підтверджуються оцінками якості кластеризації.

Видно три добре відмінні області у просторі ознак. Перша область відповідає високим max_temperature (приблизно 320–390) та високій energy_density (приблизно 110–155) за підвищеного cooling_rate (приблизно 65–95) і при цьому демонструє найменші значення defect_size (приблизно 0,25–0,75). Друга область є протилежною: нижча max_temperature (приблизно 220–280), нижча energy_density (приблизно 60–95), нижчий cooling_rate (приблизно 25–50) і найбільші defect_size (приблизно 0,9–1,6). Третя область розташована між ними і має проміжні параметри, зокрема max_temperature близько 250–310, energy_density близько 70–110, cooling_rate близько 35–75 та defect_size переважно 0,6–1,1. Таким чином висновок з цих залежностей полягає в тому, що defect_size монотонно зменшується зі зростанням energy_density і зі зростанням cooling_rate, а також непрямо

зменшується зі зростанням `max_temperature`, оскільки `max_temperature` і `energy_density` у даних явно корельовані.

З точки зору формування еластомерної присоски така картина узгоджується з типовим ланцюгом причин. Низька енергонасиченість процесу (`energy_density`) часто означає неповне зшивання або недостатню стабілізацію структури у формі, що підвищує ймовірність пористості, усадкових порожнин або зон неоднорідної твердості. У вакуумній присосці це проявляється як збільшення «ефективної» мікрошпарини на кромці ущільнення, зростання витоків, падіння досяжного розрідження та збільшення часу виходу на робочий вакуум. Низький `cooling_rate` у поєднанні з недостатнім зшиванням збільшує час, коли матеріал залишається в'язкопружним, а дефекти можуть «розростатися» або коалесціювати (об'єднуватись), тому це відповідає великим `defect_size`. Проміжний кластер, як правило, відображає змішаний механізм: частина дефектів керується тепловим режимом, а частина зумовлена матеріальними та реологічними факторами, - якістю змішування компонентів, дегазацією, забрудненням форми, якістю видалення облоя, тобто тим, що напряду формує шорсткість і мікрорельєф ущільнювальної кромки.

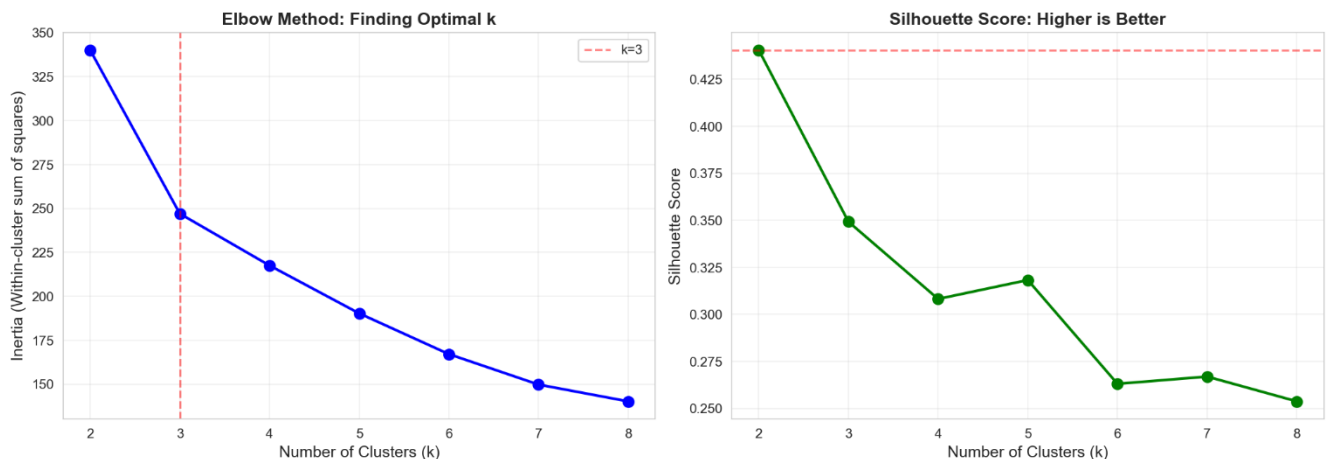


Рисунок 2.7 Оцінка кількості кластерів, виділених методом K-means

Графіки на рис.2.7 підтверджують, що `k=3` є компромісом між складністю моделі та пояснювальною здатністю: інерція різко падає від `k=2` до `k=3` і далі

зменшується більш плавно. Водночас силует максимальний при $k=2$ (приблизно 0,44), а для $k=3$ він нижчий (приблизно 0,35). Це означає, що дані найкраще відокремлюються на «дві великі групи», умовно кажучи, низькодефектний режим і високодефектний режим, а третя група є перехідною і частково перекривається з ними. Для виробництва присосок це типова ситуація, оскільки «матеріальні» та «процесні» причини часто проявляються схожими значеннями дефектності, але різняться тим, як саме дефект впливає на поверхню кромки та її знос.

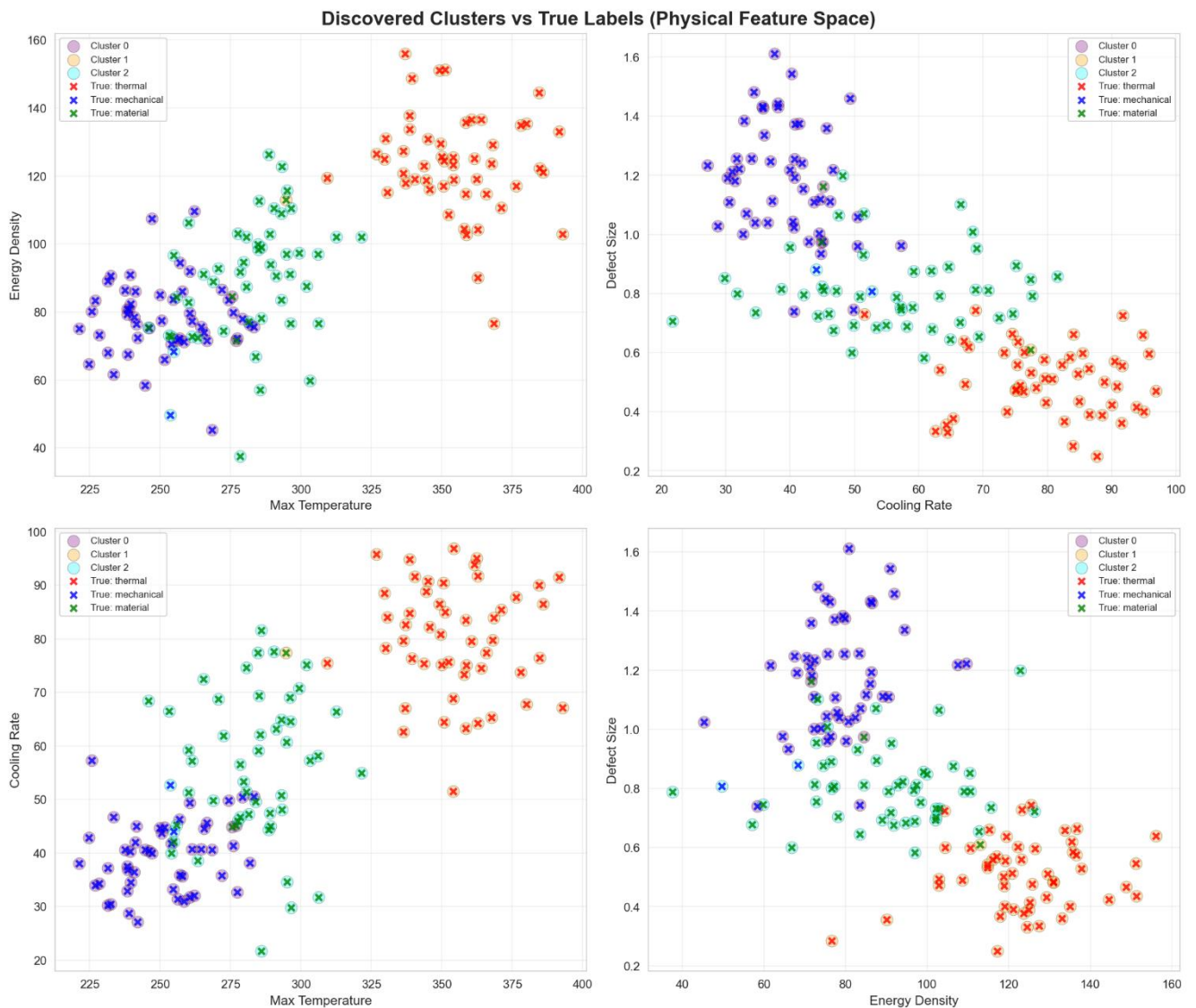


Рисунок 2.8 Результат кластеризації методом K-means

На рис. 2.8 показано, що K-means досить коректно відновлює три групи в фізичному просторі параметрів. Найкраще кластери відділяються на проєкціях `max_temperature` – `energy_density` та `cooling_rate` – `defect_size`. Це важливо з практичної точки зору, бо саме ці пари ознак безпосередньо пов'язані з керованістю процесу. Якщо для присоски ключовою характеристикою є герметичність і стабільний час вакуумування, то саме `energy_density` та `cooling_rate` є першими ознаками для побудови якісного технологічного процесу.

Рекомендації щодо кластеризації процесу виготовлення доцільно формувати у двох рівнях, технологічному та аналітичному. На технологічному рівні, якщо мета полягає у мінімізації `defect_size` та стабілізації шорсткості кромки, варто утримувати процес у зоні підвищеної `energy_density` і підвищеного `cooling_rate`, але без виходу у режими, де можливі ознаки термодеструкції матеріалу. Оскільки високі `max_temperature` асоційовані з низькими дефектами, є сенс інженерно перевірити, чи не «маскуються» там інші типи відхилень, наприклад локальне підвищення твердості, зміна еластичності, збільшення `compression set` або передчасне старіння. Для вакуумних присосок ці явища можуть не збільшувати `defect_size` в геометричному розумінні, але знижувати ресурс і стабільність захвату, що проявляється як зростання відмов на палетайзингу через падіння коефіцієнта герметизації при повторних циклах.

У високодефектному кластері, який відповідає низьким `energy_density` і низькому `cooling_rate`, пріоритетом має бути усунення причин неповного зшивання та усадкової дефектності. Практично це означає перевірку і стабілізацію теплового вкладення циклу, контроль фактичного часу витримки у формі, стабільність температурних контурів, а також, для реакційних систем, контроль співвідношення компонентів і ефективності дегазації. Додатково, якщо цей кластер відповідає партіям, що дають підвищені витоки у вакуумному захваті, доцільно встановити прямий тест на герметичність або витрату повітря як виробничий контроль, а не покладатися лише на геометричну оцінку дефектів.

Для проміжного кластера, який на графіках частково перекривається з двома іншими, рекомендація полягає в тому, щоб розширити набір ознак. Саме тут K-means, як алгоритм із сферичними кластерами, зазвичай дає найбільше неоднозначності. Для виготовлення присосок критично корисними ознаками є показник шорсткості або профілометрія кромки, твердість Shore A, compression set після стандартного циклу, результати тесту на витік вакууму, параметри змішування та дегазації (вакуум, час, температура компонентів), а також стан прес-форми, зокрема її поверхнева чистота та наявність зносу у зоні ущільнювальної кромки. Додавання таких ознак підвищить достовірність і дозволить відділяти «матеріальні» причини від «режимних» без залучення ручної розмітки.

З аналітичного боку доцільно зберегти $k=3$ як інтерпретований рівень причин, але паралельно впровадити двоступеневу схему для виробництва. На першому кроці модель $k=2$ або навіть простий поріг у просторі `energy_density` - `cooling_rate` може виконувати швидку класифікацію «низькоризиковий» проти «високоризиковий» режим. На другому кроці в межах ризикової зони можна застосувати $k=3$, щоб відділити «недостатній тепловий бюджет» від «матеріально-технологічних» причин. Це практично корисно, бо на реальному виробництві для теплового бюджету коригують температуру і витримку, для матеріальних причин коригують змішування, дегазацію, чистоту, післяобробку та регламент обслуговування оснастки.

Важливо пов'язати кластеризацію з експлуатаційними показниками вакуумного захвата. Рекомендовано накопичувати, разом із технологічними параметрами виготовлення присосок, статистику реальної роботи на промисловому роботі: час виходу на робочий вакуум, частоту повторних захоплень, падіння вакууму під навантаженням, відсоток зривів при пікових прискореннях, а також ресурс у циклах до заміни. Тоді кожен кластер можна перетворити на конкретний ризиковий профіль для палетайзингу і складальної точності, а технологічні вікна будуть встановлюватися не лише за “`defect_size`”, а за фактичним показниками надійності та продуктивності роботизованої операції.

Рекомендації по параметрам пневматичних захватів універсального робота.

Розрахунок виконано для транспортування листа із низьковуглецевої сталі розміром $1000 \times 600 \times 1,5$ мм (маса близько 7,1 кг), перенос між позиціями 1,2 м із підйомом на безпечну висоту 150 мм.

Для вибору режиму необхідно виконати перевірку за двома умовами: по відриву (утримувальна сила вакууму має перевищувати запасовану суму ваги та інерційної складової) і по зсуву (допустима зсувна сила дорівнює добутку коефіцієнта тертя та нормальної сили від вакууму). Для сухого металу з м'якою гумою типове ефективне тертя може бути 0,25–0,35, для змащених або запилених поверхонь воно може падати до 0,10–0,20, тому режим гарантованої роботи завжди має включати підвищений запас і/або резервування присосок.

Режим А: максимальна продуктивність (мінімальний час циклу за допустимого ризику)

Скорочення часу вакуумування та збільшення швидкості переміщень, з контролем мінімально необхідного вакууму для старті руху. Рекомендовано орієнтуватися на гладкі листи без мастил, стабільну геометрію штабеля та мінімальне забруднення.

Захват і пневматика

- Конфігурація присосок: 4 присоски діаметром 50 мм, плоскі або з низькою гофрою (1–1,5 хвилі) для швидкого “присмоктування”; матеріал NBR або PU, твердість 50–60 Shore A (вища зносостійкість при швидких циклах).
- Номінальне розрідження: $\Delta p = 60$ кПа (приблизно $-0,60$ bar).
- Поріг “дозвіл на рух”: не нижче -45 кПа; мінімально допустиме під час транспортування: -35 кПа (нижче цього рух припиняється або знижується прискорення).
- Генерація вакууму: ежектор високої витрати з живленням 6 bar; рекомендована ефективна продуктивність евакуації не менше 60–80 л/хв на захват; діаметр вакуумної магістралі 8 мм, мінімізація довжини шлангів.

- Час виходу на робочий вакуум: 0,18–0,25 с (залежить від об'єму магістралі та стану поверхні).
- Продув (blow-off) для швидкого відлипання: 2 bar, 0,10–0,15 с.
- Контроль: один вакуумний датчик (аналоговий або дискретний) у колекторі, фільтр 40–60 мкм.

Параметри руху робота

- Транспортна швидкість TSP: 1,4–1,6 м/с.
- Прискорення TSP: 2,8–3,2 м/с².
- Швидкість підходу до листа: 0,30–0,40 м/с; прискорення 1,5–2,0 м/с².
- Висота “зони безпеки”: підйом на 150 мм над перешкодами; вертикальні переміщення бажано виконувати з обмеженим прискоренням 1,5–2,0 м/с² для зниження зсувних навантажень на присоски.
- Блендинг (радіус згладжування траєкторії): 10–20 мм на непозиційних відрізках, щоб не зупинятися в кожній точці.

Для пневматичних захватів 4×50 мм при $\Delta p = 60$ кПа теоретична сила вакууму становить близько 471 Н; з урахуванням втрат герметизації та шорсткості (коефіцієнт ефективності 0,7) реальна сила порядку 330 Н. Вага листа близько 69 Н, тобто запас по відриву понад 4,5 рази. При прискоренні 3 м/с² зсувна сила інерції дорівнює приблизно 21 Н, що також зазвичай укладається в запас по тертю для сухого листа. Саме тому режим дає максимальну швидкість, але в той же час залишається чутливим до мастил, пилу та мікродефектів кромки присосок.

Режим В: максимальна надійність (мінімізація зривів, стабільність циклу)

Даний режим призначений для резервування утримання (надлишкова кількість присосок), підвищених порогах вакууму, м'якшій динаміці та перевірці герметичності перед активним переміщенням. Рекомендовано для листів зі слідами мастила, неідеальною поверхнею, можливими мікронерівностями, а також для критичних ліній з високою вартістю простою.

Захват і пневматика

- Конфігурація присосок: 6 присосок діаметром 40 мм, гофровані (2–3 хвилі) для компенсації хвилястості листа та неплоскостності; матеріал силікон або м'який ТРЕ, твердість 35–45 Shore A (краща герметизація на “складних” поверхнях).
- Номінальне розрідження: $\Delta p = 70$ кПа (приблизно $-0,70$ bar).
- Поріг “дозвіл на рух”: не нижче -55 кПа; мінімально допустиме під час транспортування: -50 кПа.
- Резервування вакууму: зворотний клапан на кожну присоску або на секцію 2–3 присоски плюс малий ресивер 0,2–0,5 л у колекторі, щоб короточасний витік не зірвав захват.
- Час виходу на робочий вакуум: 0,30–0,45 с, додатково 0,10–0,15 с на стабілізацію сигналу датчика.
- Перевірка витоку перед рухом: після досягнення $-55\dots-60$ кПа коротко “перекрити” вакуум (клапаном) на 0,2 с і перевірити, що падіння вакууму не перевищує 5 кПа; при гіршому результаті виконати повторне присмоктування або сигналізувати про бруд/знос присосок.
- Продув: 1,5–2 bar, 0,15–0,25 с.

Параметри руху робота

- Транспортна швидкість ТСП: 0,7–0,9 м/с.
- Прискорення ТСП: 1,2–1,6 м/с².
- Швидкість підходу: 0,20–0,25 м/с; прискорення 0,8–1,2 м/с².
- Вертикальні переміщення: обмежити прискорення 0,8–1,2 м/с² для мінімізації пікових зсувних навантажень.
- Блендинг: 5–10 мм (менше згладжування, вища повторюваність позиціонування і менша динамічна “розкачка” листа).
- Стратегія перенесення: за можливості зберігати лист у близько горизонтальному положенні і мінімізувати повороти зап'ястя під час транспортування, щоб зменшити моментні навантаження на крайні присоски.

Пневматичний захват 6×40 мм при $\Delta p = 70$ кПа дає теоретично близько 528 Н; навіть за мінімальної ефективності 0,75 реальна сила порядку 396 Н. Ключова перевага не лише у величині, а в резервуванні: при відмові однієї присоски (наприклад, через подряпину чи локальний виступ) п'ять присосок все ще забезпечують приблизно 330 Н, тобто близько того самого рівня, що й “продуктивний” режим у справному стані. Зниження прискорення в 2 рази додатково зменшує зсувну інерційну складову і робить захват значно менш чутливим до падіння коефіцієнта тертя на змащених поверхнях.

Практичні рекомендації з вибору між режимами

Для сухих листів з мінімальними відхиленнями в геометрії доцільно застосовувати набір А, але із жорстким регламентом контролю стану кромки присосок оскільки будь-яке зростання мікровитоків швидко “з’їдає” виграш у часі через повторні захоплення. Якщо ж поверхні можуть бути з мастилом, із пилом, або простій лінії дорогий (наступною є роботизована зварювальна операція), набір В дає істотно вищу експлуатаційну стійкість за рахунок резервування, вищих порогів вакууму та м’якшої динаміки, навіть якщо номінальний цикл довший.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

3.1. Охорона праці при використанні пневматичних захватів універсального робота

Забезпечення охорони праці при використанні пневмосистем універсальних роботів у складальних і вантажно-маніпуляційних операціях є критичною передумовою безпечної експлуатації обладнання, що працює з підвищеними ризиками. Пневматичні захвати, зокрема вакуумні присоски та механічно-пневматичні системи утримання, беруть на себе функцію контакту з деталями, які можуть мати значну масу, гострі кромки, високу жорсткість або нестандартну форму. Тому вимоги до безпеки їх експлуатації формуються на стику міжнародних стандартів у сфері робототехніки, технічної безпеки машин, пневматичних систем, а також нормативів, що регламентують підйомно-транспортні операції з металевими листами та крупногабаритними заготовками. Особливу роль відіграють стандарти ISO 10218-1 та ISO 10218-2, які визначають вимоги до промислових роботів і роботизованих систем; ISO 13849-1 і ISO 13849-2, що задають категорії безпеки та рівні ефективності систем керування; ISO 4414, що регламентує безпечне використання пневматичного обладнання; а також ISO 12100, який визначає процедури управління ризиками для машин і механізмів [58–60].

Усі пневматичні захвати універсальних роботів працюють у безпосередньому контакті з деталями, що виставляє підвищені вимоги до контролю зусилля, точності керування та моніторингу стану вакууму або тиску. Невиконання цих вимог може призвести до небезпечних ситуацій: падіння деталі, її неконтрольованого ковзання, різкого зриву вакуумного контакту чи пружного відскоку під дією стисненого повітря. Такі явища здатні створювати ризики травмування персоналу, пошкодження конструкцій або втрати дорогих виробів. Тому охорона праці в

роботизованих осередках з пневмосистемами розглядається не як допоміжна вимога, а як інтегрований елемент проектування технічних рішень, де системи керування, конструкція захватів, методи діагностики та організація робочого простору утворюють єдиний контур безпеки.

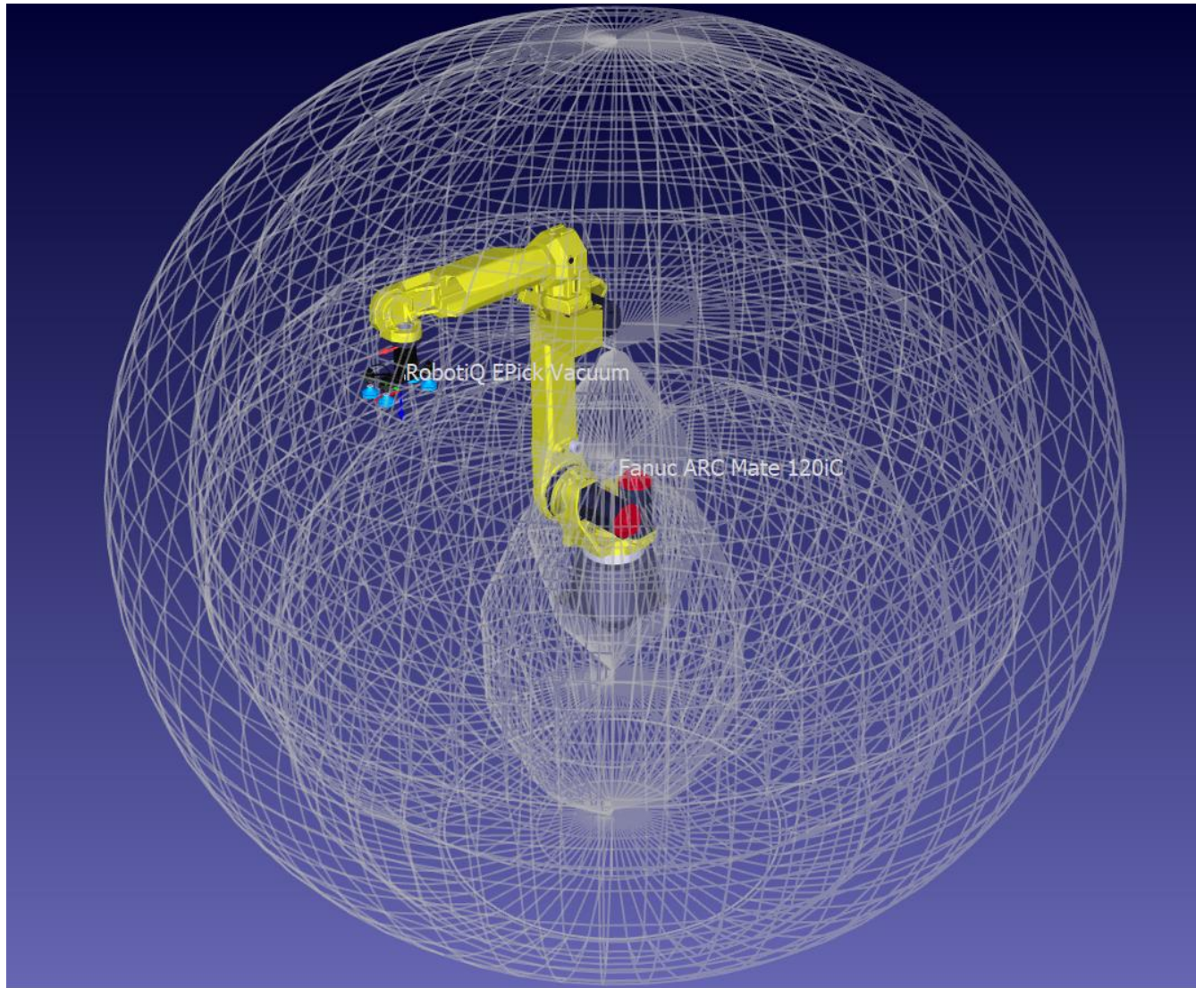


Рисунок 3.1 Робоча зона робота з пневматичними захватами

При транспортуванні металевих листів особливості охорони праці посилюються через специфіку фізичних властивостей вантажів. Металеві листи мають велику площу, малу товщину, підвищений ризик коливань і деформацій, які можуть виникати при різких рухах робота або нестабільному вакуумному контакті.

Кромки листів часто залишаються гострими після різання, рубання чи штампування, що збільшує ймовірність проколів або порізів при неконтрольованому падінні. Висока площа листа також створює додаткові аеродинамічні ефекти під час швидких переміщень, зокрема «парусність», що може вивести захват за межі допустимих прискорень. В умовах роботи з листами великих форматів ускладнюється і прогнозованість точки прикладення ваги, що збільшує ризик небезпечного перекосу, якщо робот не компенсує пружні деформації деталі. Тому вимоги ISO 10218-2 та ISO/TR 20218-1, що стосуються кінцевих ефекторів роботів, прямо регламентують застосування датчиків вакууму, двоконтурних систем утримання, обмеження швидкості при транспортуванні тонких листів та використання систем моніторингу збоїв вакууму з негайним блокуванням руху робота [58, 61].

Порівняння безпеки різних типів пневматичних захватів демонструє, що вакуумні системи при роботі з листовими матеріалами мають як переваги, так і природні обмеження. Перевагою є рівномірний розподіл навантаження, відсутність жорсткого затискання, відсутність концентраторів напружень на деталі, а також швидке та безконтактне захоплення. Проте безпека вакуумного захвату безпосередньо залежить від якості присосок, їх шорсткості, дефектності кромки, стабільності вакууму та коректності параметрів системи. Будь-яке забруднення поверхні листа (масло, пил, окалина) знижує коефіцієнт герметизації, що може викликати раптове падіння деталі. Тому міжнародні стандарти передбачають обов'язкове використання системи контролю вакууму з двома рівнями тривоги: попереджувальним (досягнення межового значення вакууму) та аварійним (критичне падіння вакууму), з автоматичним гальмуванням робота [62].

Механічно-пневматичні захвати, що використовують притискні елементи або пневмоциліндри з фіксацією, забезпечують вищий рівень безпеки при роботі з металевими листами з низькою якістю поверхні або в умовах забруднення. Вони

менш чутливі до шорсткості деталі, не залежать від площі реального контакту та мають більшу вантажопідйомність. Проте вони створюють локальні зони високого тиску, що може призвести до деформації тонких листів або пошкодження кромки. Також такі захвати складніші у плані кінематичної інтеграції та вимагають додаткового контролю зусилля затискання. Стандарти ISO 4414 та ISO 13849-1 визначають вимоги до пневматичних систем, що застосовуються у такого типу захватах: двоканальні системи живлення, захист від раптової втрати тиску, клапани безпечної зупинки та можливість аварійного розблокування без ризику для оператора [60, 63].

У практиці роботизованих осередків особливе значення має застосування методик оцінювання ризиків, визначених у ISO 12100. Вони передбачають систематичне виявлення небезпечних ситуацій, пов'язаних з використанням пневматичних захватів, включаючи ризики стискання, падіння вантажу, неконтрольованих рухів, викиду фрагментів при руйнуванні присоски, а також ризики пов'язані з обслуговуванням та регулюванням системи. Оцінювання ризику має враховувати ймовірність відмови вакуумного контуру, деградацію присосок з часом, механічне старіння еластомерів та ймовірність руйнування системи при швидкому зростанні тиску. Для кожного з цих ризиків стандарт ISO 12100 передбачає відповідні заходи зниження - технічні, організаційні та експлуатаційні [64].

Суттєвим аспектом охорони праці при транспортуванні металевих листів є контроль траєкторії руху робота та безпечних зон у робочому просторі. Згідно з ISO 10218-2, роботизовані системи повинні бути оснащені фізичними огороженнями, світловими бар'єрами або лазерними сканерами для запобігання входженню персоналу у небезпечну зону під час роботи пневматичного захвату. У випадку роботи з крупногабаритними листами рекомендовано формувати просторові «буферні зони», що враховують можливі коливання та деформації листа, які можуть

вийти за межі номінальної робочої області робота. У разі аварійного падіння металевого листа система має зупинитися негайно, а зона падіння повинна бути визначена у плані охорони праці таким чином, щоб виключити перебування людей на потенційній траєкторії падіння вантажу [59, 61].

Надійність пневматичних систем визначається також станом і якістю з'єднань у пневмолініях, зокрема герметичністю шлангів, надійністю фітингів, правильністю вибору діаметрів та наявністю зворотних клапанів, що запобігають раптовому падінню вакууму. ISO 4414 висуває жорсткі вимоги до конструкції пневмоліній, включно з можливістю очищення, відсутністю переломів, самовільного роз'єднання та перевищення тиску. Додатково стандарт вимагає наявності пристроїв для ручного спуску повітря при ремонті та обслуговуванні, що запобігає неконтрольованим рухам захвату через залишковий тиск у системі [60].

Під час експлуатації вакуумних присосок суттєвими є ризики пов'язані з їх старінням і деградацією матеріалу. Еластомери, що застосовуються у присосках, піддаються циклічним деформаціям, дії температури, мастильних матеріалів і абразивних частинок. Це призводить до зростання шорсткості робочої кромки, утворення мікротріщин, зменшення коефіцієнта герметизації та збільшення часу досягнення робочого вакууму. У системах охорони праці міжнародні стандарти передбачають обов'язкове ведення журналу технічного огляду присосок, періодичну заміну комплектуючих, а також використання засобів діагностики стану вакуумного контакту на основі вимірювань профілю тиску або моделей штучного інтелекту для прогнозування деградації [62–63].

У роботизованих осередках із підвищеним рівнем автоматизації важливим стає інтеграція систем функціональної безпеки, що відповідають вимогам ISO 13849-1. Для пневматичних захватів це включає подвійні канали вимірювання вакууму або тиску, моніторинг розбіжностей між сенсорами, апаратну реалізацію безпечної зупинки (safe stop), а також наявність режимів безпечної швидкості при

роботі з вантажами зі складною геометрією. Стандарти встановлюють рівні SIL та PL, які визначають імовірність небезпечної відмови системи керування. Для операцій транспортування металевих листів рекомендовано не нижче PL d, що означає високий рівень надійності та захисту від одиничних відмов [59–60].

Застосування пневматичних захватів у поєднанні з універсальними роботами також потребує врахування ергономічних та організаційних аспектів охорони праці. Оператор повинен мати доступ до системи лише через контрольовані інтерфейси, що виключають некоректні команди та помилкове увімкнення режимів тестування. Під час переналагодження захвату або заміни присосок робот повинен перебувати у режимі безпечної зупинки, що виключає випадковий рух кінцевого ефектора. Згідно з ISO 10218-1, усі налаштування мають виконуватися лише після розрядження пневматичної системи, щоб уникнути раптових рухів через залишковий тиск. Важливим елементом є навчання персоналу, що включає знання про поведінку листових матеріалів, типові дефекти присосок, ознаки зниження вакууму та правила дій при аварійних ситуаціях [61–64].

Окремим елементом охорони праці є планування роботи універсальних роботів із врахуванням аварійних сценаріїв. Система керування має містити алгоритми відпускання вантажу лише у визначених зонах, заборону переміщення з недостатнім вакуумом, а також механізми обмеження швидкості при роботі з нестабільними або гнучкими деталями. У ряді випадків ISO/TR 20218-1 рекомендує використовувати комбіновані захвати, де вакуумна система доповнюється механічною страховкою, що зменшує імовірність падіння листа та підвищує рівень безпеки для оператора та обладнання [62].

3.2. Безпека у надзвичайних умовах при використанні пневмосистем для пневматичних захватів універсального робота

Безпечна експлуатація пневмосистем універсальних роботів у середовищах із підвищеними ризиками є ключовою умовою стабільності виробництва, оскільки від працездатності вакуумних або механізованих пневматичних захватів безпосередньо залежить точність позиціонування заготовок, запобігання падінню вантажу та збереження працездатності обладнання. Під час маніпулювання металевими листами, які мають значну площу, високу масу, схильність до прогинання та гострі кромки, на пневматичні системи діють складні комбінації механічних і пневматичних навантажень. В екстрених ситуаціях, пов'язаних із втратою вакууму, раптовим коливанням тиску в магістралі, ударними навантаженнями, некоректною роботою сенсорів або стороннім впливом довкілля, універсальний робот має виконувати алгоритм безпечного переходу в аварійний стан відповідно до міжнародних стандартів функціональної безпеки. Оскільки пневматичний захват не є пасивним елементом, а активним компонентом динамічної системи, його надійність у надзвичайних умовах визначає загальний ризиковий профіль роботизованого осередку [58].

Транспортування металевих листів за допомогою вакуумних присосок формує особливі вимоги до безпеки через високе співвідношення площі контакту до маси та чутливість до мікроскопічних витоків. Вакуумна система працює на принципі створення різниці тисків Δp , яка генерує утримувальну силу $F_v = \Delta p \cdot A \cdot \eta$, де A є площею присоски, а η є коефіцієнтом герметизації, що залежить від шорсткості поверхні, чистоти металу та стану ущільнювальної кромки. У надзвичайних умовах, коли відбувається раптове часткове або повне падіння вакууму через пошкодження шлангів, забруднення присоски або втрату енергоживлення, зменшення Δp відбувається впродовж десятків мілісекунд, що різко знижує F_v . Металевий лист, особливо з великою площею, втрачає стабільність

утримання і може з'їхати або обертатися навколо точки контакту. Це створює ризик удару по робочому обладнанню, деформації деталі, відриву загострених країв або неконтрольованого падіння, що несе небезпеку для персоналу, який працює в зоні взаємодії з роботизованим комплексом [59]. Тому міжнародні стандарти, зокрема ISO 10218-1/2 і ISO/TS 15066, передбачають наявність чергових пневматичних контурів або резервних захватних схем, які гарантують мінімальну залишкову силу утримання у разі критичного падіння тиску.

Особливістю транспортування листового металу є нерівномірність реального контакту через хвилястість, сліди корозії, окалину, зварювальні бризки або мастильні забруднення. Ці фактори формують мікрорельєф, який знижує коефіцієнт η і збільшує ймовірність мікропротікання. У нормальному режимі система компенсує невеликі витоки за рахунок постійної роботи вакуумного генератора, однак у надзвичайних ситуаціях навіть незначні дефекти стають критичними. У випадку великих листів або товстих металевих деталей ризик підвищується через більші згинаючі моменти та інерційні навантаження, що зростають при різкому змінюванні траєкторії робота. В екстрених умовах робот повинен переходити до уповільненого режиму або шляхом контрольованого демпфування зупиняти рух, мінімізуючи механічний вплив на захват, що відповідає вимогам ISO 13850 щодо аварійного зупинення та ІЕС 62061 щодо структурної безпеки систем керування [60].

Пневматичні захвати різних типів демонструють різну поведінку в надзвичайних умовах, і це є критичним чинником при виборі захвату для складальних операцій. Вакуумні присоски мають найвищу чутливість до тискових коливань, оскільки їх утримувальна здатність повністю залежить від Δp . Універсальні присоски з гофрованою кромкою кращі для нерівних поверхонь, але їхня чутливість до забруднень зростає, що негативно позначається на безпеці у разі потрапляння мастильних речовин або пилу [61]. Плоскі присоски з мінімальною

глибиною кромки мають високу жорсткість, однак гіршу адаптивність до поверхні, тому у разі втрати вакууму відпускання відбувається миттєво, що посилює ризики. Пневматичні механічні захвати, які застосовують паралельні або клинові напрямні, мають значно вищу залишкову силу утримання у надзвичайних умовах, оскільки не залежать від тиску і зберігають контакт за рахунок механічного замикання. Проте їх використання для перенесення масивних металевих листів є обмеженим через недостатню площу контакту та ризик пластичних пошкоджень поверхні [62].

Порівняння безпеки різних типів пневматичних захватів має спиратися на не лише на їх конструктивні особливості, але й на поведінкові характеристики у випадках порушення стандартних пневматичних режимів. Вакуумні захвати чутливі до різкого падіння тиску, але при правильно сконфігурованій системі з резервним накопичувачем вакууму та зворотними клапанами забезпечують контрольоване утримання протягом критичного часу, достатнього для переходу робота у безпечний режим. Механічні пневмозахвати є менш залежними від стану пневмомагістралі, проте у надзвичайних умовах вони створюють ризик защемлення та неконтрольованого навантаження на приводи, що також враховано в ISO 12100 щодо оцінювання ризиків технічних систем [63]. Гібридні системи, де вакуумний захват доповнюється механічними елементами утримання у крайових режимах, забезпечують найвищу живучість і використовуються у складальних операціях підвищеної небезпеки, наприклад при роботизованому завантаженні листів у штампувальні преси.

Міжнародні стандарти задають фундаментальні вимоги до структури безпеки роботизованих осередків. ISO 10218-1 регламентує вимоги до конструкції промислових роботів, включно з резервуванням каналів управління та захистом від неконтрольованих рухів у разі відмови приводу. ISO 10218-2 визначає вимоги до інтеграції роботів у виробничі комплекси, вказуючи на необхідність контролю стану вакууму, застосування зворотних клапанів, датчиків утримувальної сили та

систем сигналізації. ISO/TS 15066, орієнтований на колаборативні сценарії, встановлює обмеження на допустимі сили та тиски у разі контактної взаємодії з людиною, що є важливим при роботі із листовими матеріалами, які можуть спричинити порізи або ударні травми. Стандарт ISO 4414, який регламентує пневматичні системи керування, вимагає наявності засобів запобігання раптовому руху в разі відмови тиску, що безпосередньо стосується поведінки пневматичних захватів у надзвичайних умовах [64].

Оцінювання ризиків у надзвичайних умовах пов'язане з аналізом потенційних сценаріїв відмови. До типових належать: раптове падіння тиску у магістралі; пошкодження вакуумної присоски; забруднення ущільнювальної кромки; відмова вакуумного генератора; блокування пневматичного клапана; некоректні сигнали від сенсорів; перевантаження захвату через ударне навантаження або інерційні сили. Кожний із цих сценаріїв має бути змодельований згідно з ISO 13849-1, що вимагає визначення рівня безпеки PL і відповідних архітектурних заходів, включно з дублюванням компонентів, діагностикою і періодичним тестуванням [65]. Особливо важливою є перевірка часу реакції системи на втрату утримувальної сили. Оскільки вакуумні присоски зберігають утримання лише за рахунок перепаду тиску, необхідно визначити мінімальний залишковий час до повної втрати контакту, що залежить від дефектності кромки, швидкості витоків та початкового Δp . У надзвичайних умовах система керування роботом повинна виконати уповільнення, яке обмежує прискорення, щоб уникнути збільшення інерційних сил, які можуть перевищити залишкову утримувальну здатність присоски.

Поведінкові моделі вакуумних захватів у надзвичайних умовах показують, що основним фактором ризику є різке зменшення коефіцієнта η через забруднення або мікропошкодження. На практиці навіть незначні дефекти робочої кромки здатні прискорити падіння Δp у кілька разів у порівнянні з номінальним виток, що викликає неконтрольоване прискорення листа відносно робота. Це підтверджується

дослідженнями поведінки вакуумних ущільнень при динамічних навантаженнях [61]. Тому у високоризикових операціях використовують багатооточувальні схеми, де кілька присосок працюють паралельно, забезпечуючи надмірність утримання. У разі відмови однієї присоски зниження F_v компенсується іншими точками, що відповідає вимогам ISO 13849-1 щодо мінімізації наслідків одиничної відмови.

Порівняння безпеки вакуумних і механічних пневмозахватів у контексті надзвичайних умов демонструє, що перші мають природну перевагу у точності позиціонування та роботі з великими листами, тоді як другі забезпечують більшу залишкову здатність утримання при втраті тиску. Проте саме вакуумні системи краще інтегруються з роботизованими осередками, де потрібна плавність рухів, рівномірний розподіл навантажень і мінімізація точкових напружень у тонких металевих листах. Для мінімізації ризиків у надзвичайних умовах виробники застосовують спеціальні конструкції присосок із рельєфними кільцевими ущільненнями, багатокамерними внутрішніми каналами і жорсткими опорними ребрами, які забезпечують часткове утримання навіть при падінні тиску. У поєднанні з резервними пневмоканалами та енергонезалежними зворотними клапанами це створює комплексну систему безпеки, що відповідає принципам функціональної безпеки IEC 61508.

ВИСНОВКИ

1. Пневматичні захвати для універсальних робіт у складальних операціях доцільно розглядати як елемент, що одночасно формує силову взаємодію з деталлю і визначає кінематику циклу через обмеження прискорень та часові затримки пневмосистеми. Механічні пневмозахвати забезпечують високу повторюваність базування і короткий час спрацьовування, тоді як вакуумні захвати дають технологічну гнучкість для плоских виробів і пакування, але є більш чутливими до стану контактних гумових елементів та якості поверхні. На практиці продуктивність вакуумного палетайзингу визначається не лише рівнем вакууму, а і герметичністю присоски, витокami та допустимими прискореннями, що прямо пов'язує якість гумових присосок із тактом і безвідмовністю. Інженерний розрахунок показує, що деградація присосок зменшує утримувальну силу та збільшує час формування вакууму, змушуючи знижувати прискорення і вводити додаткові витримки, що зменшує продуктивність приблизно на десятки відсотків навіть без аварійних падінь. Водночас підвищення діаметра і якості присосок із урахуванням шорсткості та стану поверхні забезпечує запас утримання, стабілізує цикл і знижує ризик інцидентів, що є визначальним для надійності палетайзингу та загальної ефективності роботизованої лінії.

2. Оптимальний вибір вакуумних присосок для універсальних робіт у складальних операціях базується на комплексному аналізі геометричних і матеріальних властивостей деталей, режимів роботи маніпулятора, допустимих швидкостей і прискорень та вимог до довговічності. Високоякісні полімерні або силіконові присоски забезпечують підвищену адаптивність, стабільність вакууму та надійність роботи обладнання. Їх вибір безпосередньо впливає на продуктивність, оскільки визначає швидкість досягнення робочого вакууму, силу утримання і частоту незапланованих зупинок. Інженерні розрахунки, подібні до наведеного вище, дозволяють кількісно оцінити вплив типу присоски на час циклу та надійність палетайзингу, що є основою для обґрунтованого проєктування та модернізації роботизованих складальних систем.

3. Критерії якості вакуумних присосок для пневматичних захватів універсальних робіт включають герметичність прилягання, еластичність матеріалу, опір витокам, швидкість формування вакууму, довговічність та стабільність параметрів утримання. Інженерні розрахунки показують, що навіть незначні дефекти присосок можуть призвести до значного зниження продуктивності та надійності системи палетайзингу. Тому вибір типу присоски повинен здійснюватися з урахуванням геометрії та шорсткості деталей, вимог до точності позиціонування та динаміки маніпулятора. Високоякісні присоски з оптимізованою геометрією та матеріалом забезпечують стабільну роботу роботизованих комплексів, мінімізують аварійні зупинки та сприяють підвищенню продуктивності всього виробництва.

4. Основні експлуатаційні дефекти вакуумних присосок включають мікротріщини, проколи, зношування кромки, залишкову деформацію та деградацію матеріалу. Вони суттєво впливають на продуктивність пневматичних захватів та стабільність роботизованих складальних операцій. Шорсткість поверхні деталей відіграє ключову роль у формуванні дефектів, оскільки створює локальні концентратори напружень та підвищує ризики витoku повітря. Інженерний аналіз показує, що навіть невеликі дефекти можуть спричиняти втрату до 25 відсотків сили утримання, що знижує динамічні можливості маніпулятора, подовжує час циклу і підвищує ризики аварійних зупинок. Вибір типу присоски та її матеріалу має здійснюватися з урахуванням характеру поверхонь та умов експлуатації, що забезпечує довговічність і стабільну роботу палетайзингових та складальних систем.

5. Узагальнюючи, технології виготовлення вакуумних присосок мають розглядатися як інструмент управління експлуатаційною якістю захвату. Режимми нагріву і охолодження, енергонасиченість процесу, якість прес-форми та післяобробка формують дефектність і шорсткість, які прямо впливають на герметичність контакту, утримувальну силу та час вакуумування. Для роботизованих складальних операцій і палетайзингу це означає прямий вплив на продуктивність циклу, а для осередків із

наступними технологічними операціями, зокрема зварюванням, додатково виникає вплив на точність базування і стабільність якості з'єднань. Інженерний приклад показав, що навіть при формально вищій продуктивності виготовлення присоски у жорстких режимах може формуватися критична дефектність, яка знижує утримувальну здатність нижче вимог надійного палетайзингу. Тому оптимізація технологічного процесу виготовлення присосок повинна виконуватися за критерієм мінімізації дефектів і стабілізації шорсткості робочої кромки, оскільки саме це забезпечує прогнозовану продуктивність і безвідмовність роботи універсального робота у складальних операціях.

4. результати кластеризації підтверджують, що параметри *energy_density*, *cooling_rate* та *max_temperature* формують фізично осмислені групи режимів, безпосередньо пов'язані з дефектністю та стабільністю роботи присосок. Чітке розмежування кластерів у цих проєкціях дає змогу виділити технологічні вікна, у яких забезпечуються мінімальний *defect_size*, прогнозована шорсткість кромки та стабільний час вакуумування. Це створює підґрунтя для керованого вибору режимів виготовлення і підвищення надійності вакуумних захватів у роботизованих операціях.

5. Для сухих листів з мінімальними відхиленнями в геометрії доцільно застосовувати набір А, але із жорстким регламентом контролю стану кромки присосок оскільки будь-яке зростання мікровитоків швидко “з’їдає” виграш у часі через повторні захоплення. Якщо ж поверхні можуть бути з мастилом, із пилом, або простій лінії дорогий (наступною є роботизована зварювальна операція), набір В дає істотно вищу експлуатаційну стійкість за рахунок резервування, вищих порогів вакууму та м’якшої динаміки, навіть якщо номінальний цикл довший.

6. Охорона праці при використанні пневмосистем для універсальних роботів базується на комплексному підході, що включає відповідність міжнародним стандартам, ретельний аналіз ризиків, правильний вибір типу пневматичного захвату, підтримання належного технічного стану присосок та елементів пневмоліній, а також

впровадження систем функціональної безпеки з високим рівнем надійності. Особливості транспортування металевих листів формують додаткові вимоги до жорсткості конструкції, швидкості переміщення, конфігурації захвату та систем діагностики вакууму. Порівняльний аналіз різних типів пневматичних захватів показує, що вибір найбезпечнішої системи залежить від фізичних властивостей вантажу, умов робочого середовища, рівня автоматизації та вимог до точності і продуктивності. Виконання міжнародних нормативів - насамперед ISO 10218, ISO 4414, ISO 13849 та ISO 12100 - забезпечує системний контроль ризиків та створює передумови для безпечної, надійної та ефективної експлуатації роботизованих осередків із пневматичними захватами.

7. Безпека у надзвичайних умовах при використанні пневмосистем для пневматичних захватів універсального робота визначається не лише конструктивними особливостями захвату, але й здатністю системи керування забезпечувати передбачуваний перехід у безпечний стан, а також відповідністю всієї системи міжнародним стандартам. Вакуумні захвати, хоча й чутливі до втрати тиску, за умови впровадження резервних контурів, сенсорного моніторингу, коректного технічного обслуговування та розрахунку залишкової сили утримання здатні забезпечити високий рівень безпеки навіть у надзвичайних умовах. З іншого боку, механічні пневмозахвати демонструють більшу незалежність від тиску, але через ризик защемлення і надмірних навантажень потребують додаткових заходів захисту. У підсумку комплексне застосування принципів оцінювання ризиків, відповідності міжнародним стандартам і конструктивної надмірності дозволяє сформувати надійні роботизовані системи для транспортування металевих листів у складних та потенційно небезпечних виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проць Я. О. Захватні пристрої промислових роботів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2008. 196 с.
2. Журавель В. В. Гідравліка, пневматика та гідропневмопривод : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 204 с.
3. Tai K., El-Sayed A.-R., Shahriari M., Biglarbegan M., Mahmud S. State of the Art Robotic Grippers and Applications. *Robotics*. 2016. Vol. 5, no. 2. Article 11. 20 p. DOI: 10.3390/robotics5020011.
4. Persson B. N. J., Tiwari A. Physics of suction cups. *Soft Matter*. 2019. Vol. 15. P. 9482–9499. DOI: 10.1039/C9SM01679A.
5. Gabriel F., Baars T., Römer U., Dröder K. Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. *Production Engineering*. 2020. Vol. 14, no. 5–6. P. 545–554. DOI: 10.1007/s11740-020-00990-9.
6. Gabriel F., Baars T., Römer U., Dröder K. Grasp Point Optimization and Leakage-Compliant Dimensioning of Energy-Efficient Vacuum-Based Gripping Systems. *Machines*. 2021. Vol. 9, no. 8. Article 149. 13 p. DOI: 10.3390/machines9080149.
7. ISO 9409-1:2004. Manipulating industrial robots. Mechanical interfaces. Part 1: Plates. Geneva : ISO, 2004. 6 p.
8. ISO 8573-1:2010. Compressed air. Part 1: Contaminants and purity classes. Geneva : ISO, 2010. 9 p.
9. ISO 10218-1:2025. Robotics. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Industrial robots. Geneva : ISO, 2025. 95 p.
10. Parker Hannifin Corporation. ISO 8573-1 Purification and testing of compressed air. White paper. 2020. 12 p.

- 11.Ярошенко В. М., Корецький А. І. Пневматичні системи в роботизованому виробництві: монографія. Київ: Либідь, 2020. 284 с.
- 12.Pettersson M., Olsson R. Industrial Vacuum Gripping Systems: Design and Applications. London: Springer, 2019. 228 p.
- 13.Lin C., Huang P. Vacuum Leakage Characteristics in Rubber Suction Interfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 171–182.
- 14.Shiffler M. Engineering Principles of Vacuum Cup Design. *Vacuum Technology & Coating*. 2022. Vol. 23. P. 44–52.
- 15.Lawson B., Keller J. Adaptive Suction Grippers for Complex Surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 65. P. 101–112.
- 16.Möller A., Kristiansen E. Silicone-Based Gripper Materials for High-Cycle Automation. *Materials & Design*. 2021. Vol. 198. P. 109–118.
- 17.Bogue R. Vacuum Handling Systems in Robotics: A Review. *Industrial Robot*. 2020. Vol. 47. P. 781–789.
- 18.Hoffmann T., Reichelt M. Aging Effects in Polyurethane Suction Cups under Industrial Conditions. *Polymer Engineering and Science*. 2019. Vol. 59. P. 908–917.
- 19.Park J., Lee S. Reliability Assessment of Vacuum Gripper Systems for High-Speed Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021. Vol. 18. P. 1331–1342.
- 20.Müller K., Schroeder P. Contact Mechanics of Soft Vacuum Cups for Robotic Assembly. *Journal of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 89. P. 1–12.
- 21.Ярошенко В. М., Корецький А. І. Пневматичні системи в роботизованому виробництві: монографія. Київ: Либідь, 2020. 284 с.
- 22.Shiffler M. Engineering Principles of Vacuum Cup Design. *Vacuum Technology & Coating*. 2022. Vol. 23. P. 44–52.

- 23.Lin C., Huang P. Vacuum Leakage Characteristics in Rubber Suction Interfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 171–182.
- 24.Lawson B., Keller J. Adaptive Suction Grippers for Complex Surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 65. P. 101–112.
- 25.Bogue R. Vacuum Handling Systems in Robotics: A Review. *Industrial Robot*. 2020. Vol. 47. P. 781–789.
- 26.Möller A., Kristiansen E. Silicone-Based Gripper Materials for High-Cycle Automation. *Materials & Design*. 2021. Vol. 198. P. 109–118.
- 27.Park J., Lee S. Reliability Assessment of Vacuum Gripper Systems for High-Speed Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021. Vol. 18. P. 1331–1342.
- 28.Hoffmann T., Reichelt M. Aging Effects in Polyurethane Suction Cups under Industrial Conditions. *Polymer Engineering and Science*. 2019. Vol. 59. P. 908–917.
- 29.Müller K., Schroeder P. Contact Mechanics of Soft Vacuum Cups for Robotic Assembly. *Journal of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 89. P. 1–12.
- 30.Pettersson M., Olsson R. *Industrial Vacuum Gripping Systems: Design and Applications*. London: Springer, 2019. 228 p.
- 31.Pettersson M., Olsson R. *Industrial Vacuum Gripping Systems: Design and Applications*. London: Springer, 2019. 228 p.
- 32.Möller A., Kristiansen E. Silicone-Based Gripper Materials for High-Cycle Automation. *Materials & Design*. 2021. Vol. 198. P. 109–118.
- 33.Lin C., Huang P. Vacuum Leakage Characteristics in Rubber Suction Interfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 171–182.
- 34.Shiffler M. Engineering Principles of Vacuum Cup Design. *Vacuum Technology & Coating*. 2022. Vol. 23. P. 44–52.

- 35.Hoffmann T., Reichelt M. Aging Effects in Polyurethane Suction Cups under Industrial Conditions. *Polymer Engineering and Science*. 2019. Vol. 59. P. 908–917.
- 36.Park J., Lee S. Reliability Assessment of Vacuum Gripper Systems for High-Speed Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021. Vol. 18. P. 1331–1342.
- 37.Müller K., Schroeder P. Contact Mechanics of Soft Vacuum Cups for Robotic Assembly. *Journal of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 89. P. 1–12.
- 38.Lawson B., Keller J. Adaptive Suction Grippers for Complex Surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 65. P. 101–112.
- 39.Pettersson M., Olsson R. *Industrial Vacuum Gripping Systems: Design and Applications*. London: Springer, 2019. 228 p.
- 40.Möller A., Kristiansen E. Silicone-Based Gripper Materials for High-Cycle Automation. *Materials & Design*. 2021. Vol. 198. P. 109–118.
- 41.Lin C., Huang P. Vacuum Leakage Characteristics in Rubber Suction Interfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 171–182.
- 42.Shiffler M. Engineering Principles of Vacuum Cup Design. *Vacuum Technology & Coating*. 2022. Vol. 23. P. 44–52.
- 43.Lawson B., Keller J. Adaptive Suction Grippers for Complex Surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 65. P. 101–112.
- 44.Hoffmann T., Reichelt M. Aging Effects in Polyurethane Suction Cups under Industrial Conditions. *Polymer Engineering and Science*. 2019. Vol. 59. P. 908–917.
- 45.Park J., Lee S. Reliability Assessment of Vacuum Gripper Systems for High-Speed Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021. Vol. 18. P. 1331–1342.

46. Müller K., Schroeder P. Contact Mechanics of Soft Vacuum Cups for Robotic Assembly. *Journal of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 89. P. 1–12.
47. Bogue R. Vacuum Handling Systems in Robotics: A Review. *Industrial Robot*. 2020. Vol. 47. P. 781–789.
48. Rodgers B. *Rubber Compounding: Chemistry and Applications*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 624 p. DOI:10.1201/b18931.
49. Gent A. N. *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. 3rd ed. Munich : Hanser Publishers, 2012. 433 p. DOI:10.3139/9783446428713.
50. Мельник Л. І. Технологія переробки еластомерів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 258 с.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. Drossel W.-G., Ihlemann J., Landgraf R., Oelsch E., Schmidt M. Media for Dimensional Stabilization of Rubber Compounds during Additive Manufacturing and Vulcanization. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 6. Art. 1337. 12 p. DOI:10.3390/ma14061337.
55. Abhilash M., Naveen Prakash G. V., Kasthuriangan S. Cryogenic Deflashing for Rubber Products. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 144. Art. 03004. 5 p. DOI:10.1051/matecconf/201814403004.

56. Clemitson I. R. Polyurethane Casting Primer. Boca Raton : CRC Press, 2011. 326 p. DOI:10.1201/b11488.
57. Dow Corning Corporation. Injection Molding of XIAMETER™ Liquid Silicone Rubber : technical brochure. Midland : Dow Corning, 2009. 20 p.
58. ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots. Geneva : ISO, 2011. 74 p.
59. ISO 10218-2:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration. Geneva : ISO, 2011. 82 p.
60. ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power – General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : ISO, 2010. 64 p.
61. ISO/TR 20218-1:2018. Robotics – Safety design for industrial robot systems – Part 1: End-effectors. Geneva : ISO, 2018. 28 p.
62. ISO 13849-1:2015. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design. Geneva : ISO, 2015. 98 p.
63. ISO 13849-2:2012. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 2: Validation. Geneva : ISO, 2012. 90 p.
64. ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. Geneva : ISO, 2010. 68 p.
58. ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots. Geneva : ISO, 2011. 52 p.
59. Persson B. N. J., Tiwari A. Physics of suction cups. Soft Matter. 2019. Vol. 15. P. 9482–9499. DOI:10.1039/C9SM01679A.
60. IEC 62061:2021. Safety of machinery – Functional safety of safety-related control systems. Geneva : IEC, 2021. 270 p.
61. Gabriel F., Baars T., Römer U., Dröder K. Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. Production

- Engineering. 2020. Vol. 14, № 5–6. P. 545–554. DOI:10.1007/s11740-020-00990-9.
- 62.Zhang Y., Gao Y., Wang L. Design and failure analysis of pneumatic grippers under dynamic loading. Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 64. P. 127–139. DOI:10.1016/j.jmapro.2021.01.056.
- 63.ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. Geneva : ISO, 2010. 84 p.
- 64.ISO 4414:2010. Pneumatic fluid power – General rules and safety requirements for systems and their components. Geneva : ISO, 2010. 78 p.
- 65.ISO 13849-1:2015. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design. Geneva : ISO, 2015. 124 p.