

УДК 621.865

О.М.Фендьо, В.Б.Савків

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМЕНЕВИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ І МАНІПУЛЯТОРІВ

У статті «Дослідження технічних характеристик струменевих захоплювальних пристроїв промислових роботів і маніпуляторів» авторів О.М.Фендьо, В.Б.Савків., на основі аналізу технологічного обладнання, транспортно-завантажувальних пристроїв, особливостей технологічних процесів і ефективності виробництва, визначено технічні вимоги до струменевих захоплювальних пристроїв. Запропоновано аналітичні залежності для розрахунку технічних і експлуатаційних характеристик струменевих захоплювальних пристроїв.

Ключові слова: автоматизація, струменевий захоплювальний пристрій, об'єкт маніпулювання, струмінь повітря, аеродинамічний ефект, сопло.

Постановка проблеми. Ефективне виконання технологічних операцій в умовах автоматизованого виробництва є важливим критерієм, що дозволяє досягнути високої якості продукції, зменшити матеріалоемність, підвищити продуктивність. Складовою частиною автоматизації технологічного процесу є застосування допоміжного технологічного обладнання, зокрема автоматичних пристроїв завантаження-розвантаження і транспортування. Крім того, в цілому ряді технологічних процесів висуваються вимоги, щодо безконтактного захоплення і утримування об'єктів виробництва в процесі маніпулювання.

Аналіз результатів досліджень. Аналіз практики експлуатації захоплювальних пристроїв промислових показує, що вони повинні забезпечувати надійне захоплення й утримання деталей, стабільність базування, запобігати ушкодженню або руйнуванню деталі, проводити захоплення деталей у широкому діапазоні розмірів, форми і маси. Переважно для захоплення плоских об'єктів (крім об'єктів виготовлених з феромагнітного матеріалу) використовують вакуумні захоплювальні пристрої. Їх недоліками являються низька довговічність, неможливість утримування забруднених (ЗОР, маслом, стружкою) і нагрітих деталей, а також низькі силові характеристики. Область застосування вакуумних захоплювальних пристроїв обмежена з ряду наступних причин: вимагають повної герметизації порожнини вакуумування і наявності апаратури для створення розрідження; не задовольняють вимогам надійності фіксації об'єктів, а виконання присосів з еластичного матеріалу не дозволяє здійснити точне позиціонування об'єктів [1].

На відміну від вакуумних, перспективним є застосування високопродуктивних і надійних струменевих захоплювальних пристроїв, що дозволяють захоплювати об'єкти різної форми, ваги та властивостей, підвищують точність позиціонування об'єктів маніпулювання [2-5].

Мета роботи. Методика проектування струменевих захоплювальних пристроїв повинна враховувати вимоги технологічного процесу, а також фізико-механічні властивості та конструктивні особливості об'єктів маніпулювання, що вимагає дослідження технічних характеристик даних захоплювачів та розробки технічних вимог до їх конструкції.

Основна частина. Запропоновані конструкції (рис. 1 а, б) робочих органів маніпулятора дозволяють проводити автоматичне захоплення і утримання плоских об'єктів, здійснювати їх переміщення і базування у відповідності з вимогами, що висуваються до точності і надійності виконання технологічних операцій.

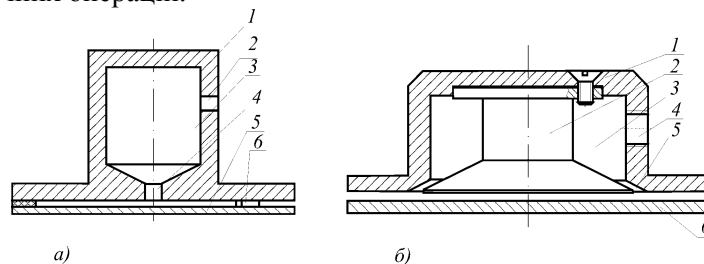


Рис. 1. Конструктивні схеми струменевих захоплювальних пристроїв: а) сопловий, б) ежекційний

Струменевий захоплювач соплового типу (рис. 1, а) представляє собою корпус 1, у якому через отвір 2 в робочу камеру 3 підводиться стеснене повітря. Виконане на осі корпуса сопло 4 з'єднує робочу камеру з атмосферою. Принцип роботи соплового струменевого захоплювача полягає у виникненні зон розрідження у проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта маніпулювання 5. Стиснуте повітря від джерела тиску потрапляє в робочу камеру і створює в ній область підвищеного тиску. В результаті на виході з сопла в напрямку об'єкта витікає вільний струмінь повітря який діє на нього силами в'язкого тертя прилипаючого до поверхні потоку повітря, а також реактивною відштовхуючою силою. Зменшення відстані між торцями захоплювача та об'єкта призводить до значного зростання швидкості плоского радіального потоку (в цілому і питомої кінетичної енергії  $\rho V^2/2$ ), і як результат - до падіння статичного тиску у радіальному проміжку до величини меншої за атмосферний. Максимальна глибина та ширина зони розрідження, а отже і максимальна піднімальна сила виникають при відстані між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта  $h=0,2\dots 0,4$  мм. При  $h \approx 0,08$  мм присмоктуюча дія струменя зникає, а наступне зменшення величини  $h$  приводить до утворення в радіальному зазорі пружної пневматичної подушки.

Від бічних зміщень у власній площині, притягнутий до захоплювача об'єкт фіксується за рахунок сил тертя до виступаючих вище торця сопла (на величину  $h > 0.2$  мм) базуючих елементів (фрикційні накладки 6, штифти і т. п.), або за допомогою бічних упорів.

Ежекційний струменевий захоплювач (рис. 1, б) містить корпус 1 з отвором 4 для підводу стиснутого повітря, конічну вставку 2, що жорстко кріпиться до корпуса утворюючи робочу камеру 3. Бічна поверхня конічної вставки разом з фаскою порожнини корпуса утворюють замкнуту кільцеву конічну щілину 5, що з'єднує робочу камеру з атмосферою.

При подачі в робочу камеру 3 захоплювача стисненого повітря від магістралі воно витікає через щілину 5 в атмосферу у вигляді суцільного кільцевого потоку. Витікаючи із щілини кільцевий повітряний струмінь, розширюється в плоскому радіальному проміжку між взаємодіючими плоскими поверхнями захоплювача та об'єкта маніпулювання. Таке розширення повітряного потоку, за рахунок явища ежекції, призводить до утворення розрідження на поверхні об'єкта маніпулювання в зоні навпроти конічної вставки, і як результат до виникнення аеродинамічного ефекту притягування об'єкта.

Як правило, завантажувально-розвантажувальні операції починаються із захоплення об'єкта маніпулювання роботом, причому спосіб фіксації об'єкта у захоплювачі у великій мірі визначає точність його базування (центрування) і тим самим визначає подальші дії роботизованої системи. При визначенні положення захоплення об'єкта маніпулювання відомої форми необхідно забезпечити наступні вимоги: слід виключити можливість пошкодження захоплювального пристрою та об'єкта в моменти захоплення і розвантаження; робот повинен мати можливість перемістити захоплювальний пристрій у зону захоплення, а потім з захопленим об'єктом без зіткнень перейти у зону розвантаження; захоплювальний пристрій повинен надійно утримувати захоплений об'єкт маніпулювання, протидіяти силам, що виникають при переміщеннях і складальних операціях, щоб забезпечити початкову точність його базування.

Вибір можливих початкових положень захоплення може здійснюватись із міркувань геометричної форми об'єкту, способу захоплення, похибки позиціонування робота або усунення невизначеності. Додатковим критерієм, що враховується при виборі місця захоплення на об'єкті маніпулювання, являється мінімальність моментів інерції відносно осі захоплювального пристрою. В якості критерію оптимальності можна використовувати, наприклад, степінь надійності базування, який зводиться до визначення зміщення центру тяжіння об'єкта відносно осі захоплювального пристрою.

При обслуговуванні технологічних процесів обробки і особливо складання, часто необхідна додаткова точність встановлення об'єктів. Тому до струменевих захоплювальних пристроїв ставиться цілий ряд спеціальних вимог, зокрема вимоги до точності базування об'єктів на власному торці і точності центрування об'єктів відносно осі захоплювача [1].

Аналіз процесу встановлення об'єктів у затискні пристрої технологічного обладнання або у отвори інших об'єктів при складальних операціях, показує, що точність та надійність виконання цих операцій визначається такими основними похибками: сумарною похибкою позиціонування всіх виконавчих механізмів маніпулятора, приведеною до фактичного положення об'єкта маніпулювання, що відрізняється від заданої керуючою програмою робота; похибкою базування (центрування) об'єкта відносно торця (осі) захоплювача; похибкою установки (розміщення)

затискного пристрою. Всі ці три складові похибок представляють собою систему "робот-захоплювач- об'єкт". В ідеальному випадку, коли осі всіх трьох елементів співпадають, відповідні похибки  $\delta_1=\delta_2=\delta_3=0$ . У реальному випадку, точність повторного позиціонування маніпулятора  $\delta_1$  є величиною відміною від нуля і являє собою радіус сфери, описаної навколо сукупності точок кінцевого положення, в які маніпулятор попадає із одного і того ж початкового положення при однакових навантаженнях і початкових умовах, при керуванні однією і тією ж програмою. Типові значення точності  $\delta_1$  повторного позиціонування маніпулятора можуть лежати в діапазоні від 2мм (для важких роботів) до  $\pm 0,01$ мм (для роботів, що обслуговують верстати з ЧПК) і навіть до 0,005мм (для легких прецизійних роботів). При розташуванні осей захоплювача, об'єкта та затискного пристрою у одній площині, похибки  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  і  $\delta_3$  додаються і складають максимальну похибку. Очевидно, що такий розподіл похибок не завжди обов'язковий, і носить імовірнісний характер.

При нормальному законі розподілу похибок густина розподілу

$$P_p(x) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_p^2}}, \quad (1)$$

де  $P_p(x)$  – ймовірність для випадкової величини попасти в точку  $x$ ;  $\sigma_p$  – середнє квадратичне відхилення розподілу похибок позиціонування робота, тобто, та точка в якій повинен знаходитись об'єкт.

Густина розподілу похибок базування об'єкта відносно осі захоплювача

$$P_0(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (2)$$

де  $\sigma_0$  – середнє квадратичне відхилення похибок базування об'єкта у захоплювачі.

Сумарна похибка від дії трьох факторів

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_0^2 + \sigma_\epsilon^2}, \quad (3)$$

де  $\sigma_\epsilon$  – середнє квадратичне відхилення похибок установки затискного пристрою.

Очевидно, що

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (4)$$

Отже, якщо

$$\sum \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 3\sigma_c, \quad (5)$$

то робот виконує своє завдання і об'єкт маніпулювання буде встановлений у затискний пристрій.

Якщо, ж

$$\sum \delta > 3\sigma_c, \quad (6)$$

то операція передбачена програмою може бути не виконана. В такому випадку слід добиватись вищої точності базування об'єкта в захоплювальному пристрої, або застосовувати роботи з вищою точністю повторного позиціонування.

Похибка базування об'єктів на торці захоплювального пристрою залежить від жорсткості розташованих на ньому базуючих елементів, їх сумарної площі та величини сили притягування. Її можна підрахувати за формулою:

$$\delta_\delta = \frac{Fh}{ES_{\text{н\ddot{a}}}}, \quad (7)$$

де  $F$  – величина присмоктуючої сили;  $h$  – висота базуючих елементів;  $E$  – модуль поздовжньої пружності матеріалу базуючих елементів (фрикційних накладок);  $S_{\text{сум}}$  – сумарна площа поперечного перерізу базуючих елементів.

Вимоги до конструктивного виконання базуючих елементів 6 (рис. 1, а) на торці захоплювального пристрою повинні попереджувати утворення вихрових зон при обтіканні їх потоком стисненого повітря. Базуючі елементи виконуються у вигляді кутових секторів з

величиною кута  $\varphi \leq 10^\circ$ . Кількість базуючих елементів обмежена, так як збільшення їх кількості приводить до зниження силових характеристик захоплювача. Якщо вихідна площа радіального проміжку зменшується, при розташуванні базуючих елементів, не більше як на 10%, то силові характеристики захоплювача практично не змінюються.

Переважно промислові роботи являються частиною виробничого процесу і призначені для обслуговування дорогого основного обладнання, тому повинні бути надійними, зручними для технічного обслуговування і безпечними у роботі. Ті ж вимоги відносяться і до струменевих захоплювачів, як складової частини робота.

Надійність струменевих захоплювачів забезпечується на етапі проектування, тому необхідно детально вивчити умови у яких вони будуть працювати. Зокрема необхідно оцінити можливий шкідливий підлягають шкідливому впливу, що визначається екстремальними температурами, вологістю, ударами і вібраціями, агресивними аерозолями, абразивними частинками у поєднанні з вибухонебезпечним середовищем, різними хімічними речовинами та іншими факторами. Відмінною особливістю струменевих захоплювачів є інтенсивний обдув об'єкта маніпулювання, що дає їм можливість ефективно працювати з нагрітими заготовками (термічні цехи, ливарні цехи та ін.), та при розвантаженні металообробних верстатів де небезпеку складають залишки металевих стружки та змащувально-охолоджувальної емульсії.

Надійність струменевих захоплювачів доцільно визначати експериментальним шляхом. Експериментальні дослідження на надійність полягають у визначенні величини ймовірності безвідмовної роботи захоплювального пристрою. Для цього використовувався робот із струменевим захоплювачем, за допомогою якого переносились із попередньо підготовленого набору об'єкти вагою 5 Н і діаметром рівним 0,1 м. Для аналізу ймовірності безвідмовної роботи захоплювачів та середнього час напруцювання на відмову використовувались наступні формули:

$$P = \frac{Z - \bar{I}}{Z} \cdot 100\%, \quad T_{\bar{I}a} = \frac{Z}{\bar{I}} \cdot T_y \quad (8)$$

де  $Z$  – кількість циклів випробовувань;  $\bar{I}$  – кількість відмов;  $T_y$  – тривалість циклу роботи РТК.

При 1000 циклів переносу, отримано дві відмови, отже  $P=99,8\%$ .

Однією з характеристик струменевих захоплювачів являється їх ККД, що визначає частину енергії, яка затрачається на корисну роботу, тобто безпосередньо на процес захоплення. Для здійснення цього процесу необхідна корисна потужність  $N_{\text{кор}}$  яка рівна

$$N_{\text{ei}\delta} = A/t, \quad (9)$$

де  $A$  – робота, здійснювана захоплювачем при підніманні об'єкта вагою  $G_o = m_o \cdot g$  з відстані  $H$  під дією аеродинамічного ефекту;  $t$  – час піднімання об'єкта.

Потужність  $N_{\text{сп}}$ , що споживається захоплювачем від джерела стиснутого повітря, регламентується магістральним тиском  $P_m$  і об'ємними витратними характеристиками  $Q$ , тобто

$$N_{\bar{m}} = P_i Q. \quad (10)$$

В даному випадку ККД струменевих захоплювачів вказує на затрати споживаної потужності в процесі захоплення і формула для його розрахунку визначається відношенням корисної потужності до споживаної:

$$\eta_{\text{сaa}} = \frac{N_{\text{ei}\delta}}{N_{\bar{m}}} = \frac{m_{ii} gH}{P_i Qt}. \quad (11)$$

Формула буде справедливою, якщо припустити, що тиск  $P_m$  і об'ємна витрата  $Q$  повітря в процесі захоплення практично не змінюються і за час  $t$  тривалості цього процесу добуток  $P_m \cdot Q = \text{const}$ .

Для струменевих ежекційних захоплювачів ККД знаходиться в межах  $\eta_{\text{зап}} = 0,05 \dots 0,2$ . У кожному конкретному випадку ККД струменевих захоплювачів змінюється і його необхідно визначати або експериментальним шляхом, або на основі розрахунків.

Для безпечної експлуатації струменевих захоплювачів необхідно, щоб вони забезпечували максимальні силові характеристики. При переміщенні маніпулятора від однієї точки до іншої на об'єкт маніпулювання діють відцентрові сили та сили викликані прискоренням і гальмуванням маніпулятора. Тому, при розрахунку конструктивних параметрів захоплювачів ці фактори слід враховувати, щоб забезпечити надійне утримання об'єктів маніпулювання та уникнути можливих травм робочого персоналу і пошкодження периферійного обладнання. З іншого боку силові

характеристики струменевих захоплювачів не повинні бути настільки великими, щоб викликати деформацію або руйнування більш крихких об'єктів.

На основі аналізу маси і розташування центру тяжіння об'єкта маніпулювання визначається кількість і розташування точок контакту, які забезпечують надійне його перенесення. Статичне і динамічне навантаження та моменти інерції об'єкта маніпулювання і струменевого захоплювача відносно приєднувального фланця робота узгоджуються із його робочими характеристиками.

Струменевий захоплювач повинен бути по можливості легким, тому що його маса суттєво впливає на функціонування робота. Значення граничного навантаження, тобто маси яка може бути закріплена на приєднувальному фланці маніпулятора, включає в себе масу захоплювача. Величина навантаження впливає на швидкість виконання робочих рухів робота, що є важливим з точки зору тривалості робочого циклу, тобто чим менше навантаження тим з більшою швидкістю може переміщуватись робот. Зменшення габаритів струменевого захоплювача дозволяє знизити його масу та економить робочий простір роботизованої комірки. Що стосується промислового робота, то розрахунок його граничного навантаження пов'язаний з розрахунком моменту інерції останньої ланки маніпулятора, тобто загального навантаження, яке знаходиться на певній відстані від поверхні приєднувального фланця. Бажано, щоб струменевий захоплювач забезпечував можливість роботи з об'єктами маніпулювання різної форми, що зменшить потребу у його заміні та знизить затрати на придбання оснащення. Проте, слід зазначити, що зменшення габаритів струменевих захоплювачів в деякій мірі звужує спектр утримуваних ним об'єктів маніпулювання, у відповідності з цим розроблені методи, які задовольняють обидві вимоги. В конструкції струменевих захоплювачів можна передбачити можливість їх швидкого ручного переналагодження на об'єкти різних розмірів. Для переходу на об'єкти з іншим розміром і формою, можна використати змінні кільця, накладки, насадки та ін. Можлива і автоматична заміна струменевих захоплювачів в залежності від класу об'єктів маніпулювання, причому кожен із змінних захоплювачів забезпечує роботу з певною частиною об'єктів з всього діапазону. Таке рішення зменшує масу та габарити струменевих захоплювачів та їх кількість.

Поряд з аналізом об'єктів маніпулювання для визначення оптимальних параметрів оснащення необхідно провести і аналіз процесу його обробки. Слід передбачити багатофункційність струменевих захоплювачів. Наприклад, захоплювачі можуть виконувати в процесі маніпулювання операції миття об'єктів, їх сушіння (при подачі гарячого повітря) та розігрів (наприклад заготовок із термопласту при подачі їх в прес для штамповки). При необхідності струменеві захоплювачі дозволяють проводити пневматичний контроль та орієнтацію об'єктів в процесі маніпулювання.

На конструкцію струменевих захоплювачів впливають і зовнішні умови роботи. Необхідно оцінити можливий вплив температури, вологості, наявних у повітря забруднень, а також дії кислот і лугів, вібрації і ударів.

Висновки. Як показав аналіз, переважаючими технічними вимогами до струменевих захоплювачів є вимоги технічного і експлуатаційного характеру, зокрема вимоги до: маси і габаритів; здатності до переналагодження та автоматичної заміни захоплювачів або окремих його елементів; надійності фіксації і утримання об'єктів; багатофункціональності та ін. Дослідження технічних і експлуатаційних характеристик струменевих захоплювачів є попереднім етапом проектування, і проводяться з метою розробки максимально ефективних та економічних в експлуатації захоплювачів.

1. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник / Козырев Ю.Г. – М.: Машиностроение, 1983. – 376 с.
2. Davis S, et al. An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables. *Robot and Comput-Integr, Manuf* (2007), doi:10.1016/j.rcim.2006.11.002.
3. Babur Ozelik, Fehmi Erzincanli, Fehim Findik. Evaluation of handling results of various materials using a non-contact end-effector. *Industrial Robot: An International Journal*. Volume 30, Number 4, 2003 pp. 363-369.
4. Проць Я. Газодинамічний аналіз струменевих захоплювачів "сопло з плоским торцем" / Я.Проць, В.Савків // Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя. – 1999. – Т. 4. – Число 1. – С. 55-61.
5. Проць Я.И. Газодинамический анализ струйных захватов плоских заготовок / Проць Я.И., Савків В.Б. // Оптимизация производственных процессов. Вып. 1. – Севастополь: Издательство СевГТУ. – 1999. – С. 63-68.