

УДК 621.865.8

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7>**В. О. КРАВЕЦЬ**

інженер кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0005-6867-4858

О. М. КРАВЕЦЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-7468-0956

С. В. ЛАПКОВСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-9870-9231

В. К. ФРОЛОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-3697-286X

М. М. ГЛАДСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-4547-7131

В. П. ПРИХОДЬКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-1852-3777

АНАЛІЗ РОЗМІРНИХ ЗВ'ЯЗКІВ РОБОТИЗОВАНОЇ СКЛАДАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Використання складальних промислових робіт у виробництві – безальтернативний засіб підвищення продуктивності та якості сучасного складального виробництва. Вже багато років роботизоване складання входить у трійку найпоширеніших роботизованих технологічних операцій. Стаття присвячена вирішенню задач розмірного аналізу роботизованих складальних систем, адже наразі розмірний аналіз є ефективним засобом забезпечення проведення як якісного, так і кількісного аналізу технологічності роботизованих складальних систем і технологічних процесів складання. Метою даної статті є вирішення задачі визначення та розрахунку розмірних зв'язків при роботизованому складанні. У статті розглянуто розмірні зв'язки, що виникають при роботизованому складанні, на прикладі складання циліндричного з'єднання. Для складальної роботизованої системи визначено зв'язки між розмірними ланками та отримано відповідний розмірний ланцюг, що характеризує зв'язок між захватним пристроєм складального промислового робота та відхиленням від співвісності деталей, що складаються. При автоматичному функціонуванні роботизованої складальної системи необхідно забезпечити встановлення складальним промисловим роботом кожного вала у втулку без регулювання та підналагодження, тому співвісність вала та втулки повинна забезпечуватись методом повної взаємозамінності. При повній вза-

ємозамінності значення допуску замикаючої ланки повинно дорівнювати сумі полів допусків складових ланок. Розмірний аналіз роботизованого складання було проведено доволі спрощено – тільки для випадку зміщення осі вала від осі втулки, оскільки на практиці можливий і перекис осей деталей. Наведений аналіз розмірних зв'язків при роботизованому складанні дозволяє узгодити розміри елементів складальної системи, обґрунтувати вимоги щодо точності використовуваного складального робота, деталей та пристроїв.

Ключові слова: промисловий робот, складання, роботизована система, розмірні зв'язки, розмірний ланцюг, метод досягнення точності.

V. O. KRAVETS

Engineer at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0005-6867-4858

O. M. KRAVETS

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-7468-0956

S. V. LAPKOVSKY

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-9870-9231

V. K. FROLOV

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-3697-286X

M. M. GLADSKYI

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-4547-7131

V. P. PRYKHODKO

Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-1852-3777

ANALYSIS OF DIMENSIONAL CONNECTIONS OF ROBOTIC ASSEMBLY SYSTEM

The use of assembly industrial robots in production – is an irreplaceable means of increasing the productivity and quality of modern assembly production. For many years now, robotic assembly has been in the top three most common robotic technological operations. The article is devoted to solving the problems of dimensional analysis of robotic assembly systems, because currently dimensional analysis is a very effective means of ensuring both qualitative and quantitative analyzes of robotic assembly systems and assembly technological processes. The purpose of this article is to solve the problem of determining and calculating dimensional relationships during robotic assembly. The article examines the dimensional relationships that arise during robotic assembly using the example of the assembly of a cylindrical joint. For the assembling robotic system, the relationships between the dimensional links were determined and the corresponding dimensional chain was obtained, which characterizes the relationship between the gripper of the

assembling industrial robot and the deviation from the collinearity of the assembled parts. With the automatic operation of the robotic assembly system, it is necessary to ensure that the industrial assembly robot installs each shaft in the sleeve without adjustment and sub-adjustment, therefore, the alignment of the shaft and sleeve must be ensured by the method of complete interchangeability. With complete interchangeability, the tolerance value of the closing link must be equal to the sum of the tolerance fields of the component links. Dimensional analysis of robotic assembly was carried out quite simply – only for the case of displacement of the axis of the shaft from the axis of the bushing, since in practice it is also possible to misalign the axes of the parts. The given analysis of dimensional relationships during robotic assembly allows you to agree on the dimensions of the assembly system elements, justify the requirements for the accuracy of the used assembly robot, parts and devices.

Key words: industrial robot, assembly, robotic system, dimensional relationships, dimensional circuit, method of achieving accuracy.

Постановка проблеми

Важко знайти таку галузь промисловості, в якій не використовуються промислові роботи. Багатоаспектний аналіз розвитку виробництва розвинених країн доводить, що залучення промислової робототехніки – безальтернативний шлях суттєвого підвищення продуктивності та якості сучасного виробництва. За даними звіту IFR (International Federation of Robotics – Міжнародна федерація робототехніки) за 2022 рік [1; 2] роботизоване складання входить у трійку найпоширеніших роботизованих технологічних операцій (рис. 1).

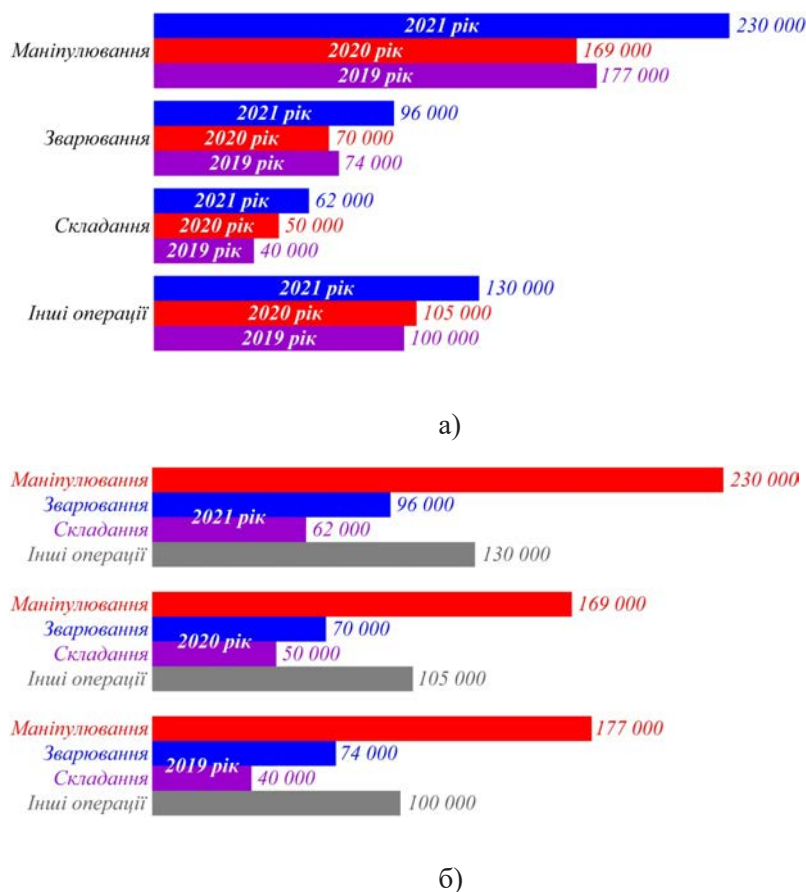


Рис. 1. Річна кількість використаних промислових роботів:
а – за видами операцій, б – за роками

Таким чином, дослідження роботизованих складальних систем та роботизованих складальних процесів (РСП) є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розмірний аналіз (РА) є ефективним сучасним засобом для якісного та кількісного аналізу існуючих і синтезу нових роботизованих складальних систем і РСП. Останніми роками вирішенню питань розмірного аналізу було присвячено багато публікацій як зарубіжних, так і українських авторів [2–10].

Так, робота [2] присвячена аналізу розмірних зв'язків, що виникають при встановленні промисловим роботом заготовки в токарний патрон металорізального верстата з ЧПК на прикладі роботизованого комплексу

металооброблення. У роботі [3] наведено методологічні та теоретичні основи і алгоритми РА при моделюванні технологічних процесів виробництва деталей, використання їх для оцінки можливостей і прогнозування забезпечення необхідної точності, визначення розмірних характеристик, що необхідні для реалізації технологічних процесів у виробництві. Робота [4] присвячена питанням створення системи прогнозування масиву характеристик технологічного процесу виготовлення на етапі проектування. Створення такої системи надасть можливість зміщення процесів вирішення множини задач зі стадії освоєння виробництва на стадію синтезу нового технологічного процесу, на якому пошук оптимальних рішень не пов'язаний з великою кількістю значних матеріальних витрат. Роботи [5–8] присвячені основним теоретичним питанням побудови технологічних процесів складання виробів машинобудування. В даних роботах наведені методологічні основи застосування теорії розмірних ланцюгів і типові задачі, що виникають при проектуванні технологічних процесів складання. У роботах [9; 10] розглядаються розмірні та геометричні допуски, які безпосередньо впливають як на функціональність, так і на вартість виробу, адже саме процес визначення прийняттого компромісу між цими характеристиками – одна із найпопулярніших інженерних задач. Автори даних робіт провели оцінку методів аналізу допусків і використали їх при аналізі конструкцій складних механічних вузлів. Досліджено та порівняно результати, які отримані різними методами: моделюванням методом Монте-Карло, методом діаграм допусків, уніфікованою моделлю торсора Якобі, аналізом векторної петлі та іншими. Аналіз результатів підтвердив існування значних варіацій при використанні різних методів, що надало можливість вказати на необхідність обґрунтування вибору відповідного методу. Результати аналізу публікацій та останніх досліджень стосовно РА та систематизація інформації, яка була отримана, дозволяє зробити наступний висновок: завдання визначення та розрахунку розмірних ланцюгів при роботизованому складанні вирішено не в повній мірі.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є вирішення задачі визначення та розрахунку розмірних ланцюгів при роботизованому складанні.

Метою РА складання є забезпечення необхідної якості виробу та можливості роботизувати складання.

Основні задачі РА складання наступні:

- виявлення розмірних зв'язків на всіх етапах здійснення РСП;
- вибір методів та засобів здійснення РСП;
- визначення вимог до деталей, що складаються;
- визначення вимог до точності роботи використовуваних складальних засобів.

Загальну послідовність РА РСП показано на схемі, яка наведена на рис. 2.

РА включає наступні етапи.

1. Аналітично чи експериментально визначають вимоги щодо точності положення та руху виконавчих поверхонь виробу або складальної одиниці, виходячи з їх службового призначення.

2. Визначають конструкторські розмірні зв'язки побудовою розмірних ланцюгів, де вихідною інформацією є вимоги до точності виробу.

3. Обирають метод досягнення точності (МДТ): повна, неповна, групова взаємозамінність, регулювання або підгонка з урахуванням економічно досяжної точності виготовлення ланок при заданому обсязі виробництва та можливостей роботизації.

4. Розраховують допуски розмірів деталей, що з'єднуються, які необхідно витримати при виготовленні деталей для того, щоб було можливо досягти вимог точності при складанні обраним МДТ.

5. Обирають методи та засоби орієнтування та транспортування деталей, що складаються. Оцінюють технологічність конструкції деталей.

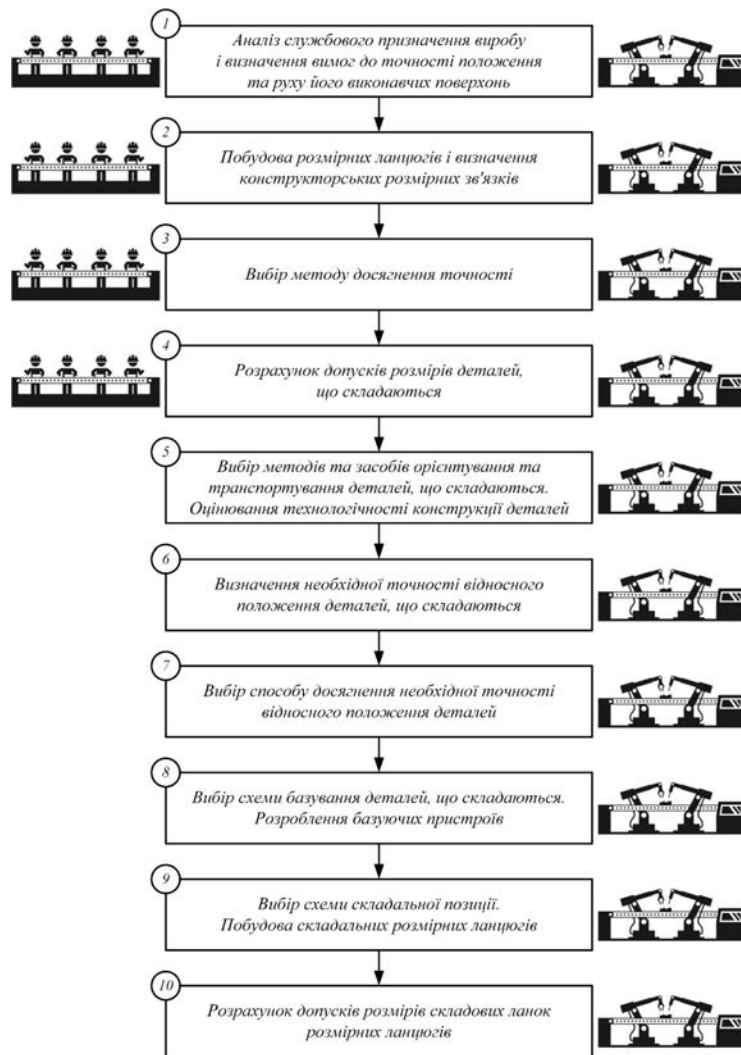


Рис. 2. Загальна послідовність РА РСП

6. Визначають необхідну точність відносного положення деталей, що з'єднуються перед складанням, з урахуванням можливостей збільшення допусків завдяки використанню фасок.

7. Обирають спосіб досягнення необхідної точності відносного положення деталей (з координацією положення деталей робочими органами складального промислового робота (СПР) або пошуковою системою).

8. Обирають схему базування деталей, що складаються, та розробляють пристрої, які реалізують необхідну схему з урахуванням забезпечення свободи переміщень і поворотів деталей по окремих координатних осях.

9. Обирають схему складальної позиції і будують складальні розмірні ланцюги; при цьому вихідною інформацією є допустимі відхилення відносного положення локальних систем координат деталей, що з'єднуються.

10. Розраховують допуски розмірів складових ланок розмірних ланцюгів, якими можуть бути:

- просторові відхилення положення поверхні кожної деталі, що з'єднується, відносно її технологічних баз при складанні;

- розміри елементів маніпулятора СПР.

Перші чотири етапи характерні та обов'язкові при проектуванні технологічного процесу виготовлення виробу з будь-яким ступенем автоматизації. Для роботизованого складання (РС) слід враховувати особливості вибору та реалізації МДТ, а також технологічність конструкції виробу. Інші етапи для умов ручного складання не потрібні. Вони необхідні тільки для РС.

В результаті проведеного РА РСП можна виявити:

- допустимі відхилення розмірів поверхонь, що з'єднуються, які необхідні для реалізації обраного МДТ;

- допустимі відхилення розташування поверхонь деталі, що з'єднується, відносно її технологічних баз, які використовуються при складанні;

- параметри фасок по поверхнях, що з'єднуються, – для покращення умов складання;
- вимоги до поверхонь, які використовуються в якості технологічних баз при РС, наприклад, з метою зменшення похибки базування деталі, що з'єднується, в захватному пристрої СПР;
- вимоги до конструкції деталі – для полегшення її орієнтації.

Таким чином, РА складання дозволяє:

- виявити взаємозв'язок розмірів деталей, що з'єднуються, та елементів складальної системи;
- обґрунтувати необхідну точність розмірів, що забезпечують РС, та необхідні параметри складальної одиниці.

Виявлення та розрахунок складальних розмірних зв'язків рекомендується проводити в наступній послідовності:

- 1) в положенні кожної деталі, що складається, визначити гранично допустимі відхилення відносно базової деталі, при яких забезпечується з'єднання;
- 2) побудувати розмірні ланцюги, в яких допустимі відхилення є вихідними ланками;
- 3) скласти рівняння розмірних ланцюгів та визначити можливі поля розсіювання складових ланок;
- 4) обрати МДТ вихідних ланок розмірних ланцюгів з урахуванням його реалізації у роботизованому виробництві;
- 5) провести розрахунок допусків складових ланок та обрати методи та засоби реалізації РСП з урахуванням необхідної точності складових розмірів розмірного ланцюга.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методику РА РСП розглянемо на прикладі складання циліндричного з'єднання, яке здійснює СПР, а саме – складання вала та втулки (рис. 3).

Розмірний ланцюг, наведений на рис. 3, складається з наступних ланок:

A_1 – позиціонування захватного пристрою СПР;

A_2 – відхилення осі отвору від осі зовнішньої поверхні втулки, яка є основною базою втулки;

A_3 – розмір, що пов'язує положення пристрою, який базує втулку, з СПР.

Необхідний зазор у з'єднанні досягається методом повної взаємозамінності.

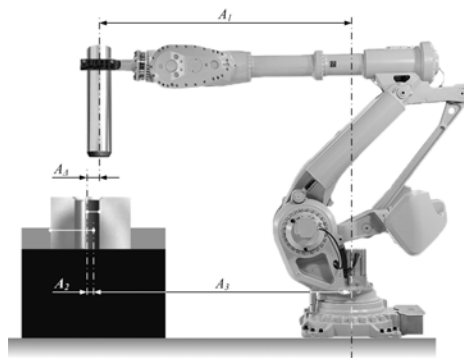


Рис. 3. Роботизоване складання вала та втулки

Вал захоплюється СПР, позиціонується співвісно з отвором втулки, СПР встановлює вал в отвір втулки, внаслідок чого здійснюється складання. Розміри вала та втулки показані на рис. 4.

Для того, щоб вал був встановлений у втулку, необхідно забезпечити співвісність вала та отвору втулки. Максимально допустиме відхилення від співвісності визначається за формулою (1):

$$\Delta_{\max} = \frac{D_{\min} - d_{\max}}{2} + C_o + C_g, \quad (1)$$

де D_{\min} – мінімальний діаметр отвору втулки; d_{\max} – максимальний діаметр вала; C_o – ширина фаски отвору; C_g – ширина фаски вала.

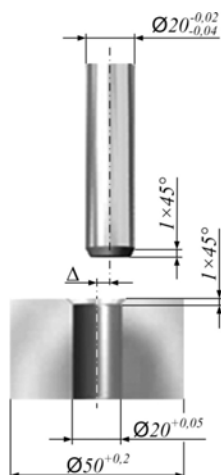


Рис. 4. Розміри вала та втулки, що з'єднуються

Підставивши у формулу (1) вказані на рис. 4 розміри деталей, що з'єднуються, отримаємо:

$$\Delta_{\max} = \frac{20 - (20 - 0,02)}{2} + 1 + 1 = 2,01 \text{ мм.}$$

З отриманого значення Δ_{\max} : видно, що більшу частину максимально допустимого відхилення забезпечують фаски на деталях. Без використання фасок максимально допустиме відхилення становить 0,01 мм.

Допустиме відхилення A_{Δ} від співвісності вала та отвору у розмірному ланцюзі складальної системи (рис. 3) становить $A_{\Delta} := 0 \pm 2,01$ мм.

При налагодженні СПР в режимі навчання співвісне положення вала у захватному пристрої СПР та отвору втулки досягають, регулюючи розмір A_I . Остаточний розмір A_I заноситься у пам'ять системи керування СПР.

Таким чином, на етапі налагодження СПР значення розміру A_D досягається методом регулювання вручну.

При роботизованому встановленні вала у втулку точність розміру A_I повинна забезпечуватися методом повної взаємозамінності. У цьому випадку номінальні значення складових ланок розмірного ланцюга до уваги не беруться, оскільки здійснене початкове налагодження. Отже, рівняння розмірного ланцюга перетворюється на тотожність, а рівняння допусків приймає наступний вигляд:

$$T_A = T_1 + T_2 + T_3, \quad (2)$$

де T_A – допуск замикаючої ланки A_{Δ} ; T_1 – допуск ланки A_I ; T_2 – допуск ланки A_2 ; T_3 – допуск ланки A_3 .

Якщо не використовувати при складанні фаски деталей (рис. 4), то $T_A = 0,02$ мм; $T_2 = 0,2$ мм (допуск співвісності $\pm 0,1$ мм); $T_3 = 0,01$ мм – допуск на теплові деформації. У цьому випадку отримаємо:

$$0,02 = T_1 + 0,2 + 0,01,$$

де T_1 – допуск позиціонування захватного пристрою СПР.

Вирішивши рівняння, отримаємо $T_1 = -0,19$ мм.

Отримане значення T_1 показує, що при допуску відхилення від співвісності отвору та зовнішньої поверхні втулки $T_2 = 0,2$ мм РС здійснити неможливо, адже значення допуску T_1 завжди має бути більше 0, тобто при даному значенні T_1 ні при якому значенні T_2 не можна забезпечити виконання операції РС даного виробу.

Однією з можливостей реалізації РСП є підвищення вимоги до співвісності отвору та зовнішньої поверхні втулки. Це підвищить вартість виготовлення втулки, але дозволить роботизувати складання.

Існує і інша можливість реалізації РСП. Можна змінити базування втулки у пристрої і орієнтувати втулку не по зовнішньому, а по внутрішньому діаметру, наприклад, за допомогою підпружиненого конуса (рис. 5). У цьому випадку із розмірного ланцюга A виключається розмір A_2 – відхилення співвісності отвору від зовнішньої поверхні втулки, і тоді рівняння допусків набуде наступного вигляду:

$$0,02 = T_1 + 0,2 + 0,01,$$



Рис. 5. Орієнтування втулки по внутрішньому діаметру за допомогою підпружиненого конуса

Отже, якщо використовувати СПР із похибкою позиціонування не більше $\pm 0,005$ мм, то РС здійснити можливо.

Даний розрахунок було зроблено для випадку, коли фаски на деталях не використовуються. При використанні фасок $T_{\Delta max} = 2\Delta_{max} = 4,02$ мм. У цьому випадку рівняння допусків набуде наступного вигляду:

$$4,02 = T_I + 0,2 + 0,01,$$

звідки $T_I = 3,81$ мм.

Тобто, при використанні фасок, які значно збільшують допустиме відхилення від співвісності деталей (від 0,02 до 4,02 мм), можна застосовувати СПР з похибкою позиціонування $\pm 1,9$ мм. Навіть у завантажувальних роботах ця похибка становить ± 1 мм. Тобто, такий завантажувальний робот цілком можна використовувати для РС комплексу деталей, що розглядається.

Однак необхідно пам'ятати, що через використання фасок при РС принаймні одна з двох деталей, що складаються, повинна мати можливість вільно переміщуватися у горизонтальній площині на відстань, яка дорівнює ширині фасок, тобто, у даному випадку, на 2 мм. З цієї метою втулку не слід жорстко затискати по зовнішній поверхні, як у випадку, коли фаски не використовувались. Втулку слід встановити у пристрій з радіальним зазором 2 мм. У процесі встановлення роботом вала у втулку остання може зміщуватися в зазорі під дією бічних сил, які прикладені до поверхонь фасок. Фаски повинні бути виконані під такими кутами, щоб запобігти самогальмуванню, і, як наслідок, заклинюванню деталей під час складання. Разом з тим, орієнтація втулки по бічній циліндричній поверхні із зазором у гнізді пристрою є джерелом додаткової похибки встановлення – відхилення від співвісності, яке повинне враховуватися у розмірному ланцюгу A окремою ланкою. Ця ланка розмірного ланцюга є, по суті, рухомим компенсатором при досягненні точності замикаючої ланки розмірного ланцюга – допустимого відхилення від співвісності Δ_{Δ} завдяки використанню фасок можна лише частково. В процесі розрахунку необхідного діаметру базуючого гнізда під втулку в пристрої потрібно також врахувати допуски діаметрів втулки та отвору базуючого гнізда.

Кращі умови для РС можна створити, якщо втулка буде центруватися в отворі пристрою і, в той же час, матиме необхідну свободу відносних бічних переміщень. Цю вимогу можна забезпечити, якщо симетрично підпружинити втулку з боків встановленням, наприклад, трьох пружин під кутами 120° . Оскільки в цьому випадку доведеться оснащувати всі базуючі гнізда пристрою для центрування втулок такими пружинами або використовувати додатковий завантажувально-розвантажувальний пристрій для встановлення втулок у спеціальне «плаваюче» пристосування, то доцільніше забезпечити підпружинене в бічних напрямках захоплення вала, який встановлюється у втулку.

Жорсткість пружних елементів обирають, з одного боку, виходячи з необхідної надійності центрування, а з іншого – з допустимого значення бічної сили при роботизованому встановленні вала по фасках. Максимальне значення можливого зміщення необхідно визначати, як було показано, розрахунком розмірного ланцюга. Знаючи жорсткість і значення можливого зміщення, можна розрахувати та сконструювати необхідний пристрій для базування втулки.

Висновки

На цьому прикладі проаналізовано лише зміщення осей вала та втулки при їх роботизованому складанні. Аналогічним чином можна розглянути способи досягнення необхідного кута схрещування осей вала та отвору у втулці. Може знадобитись таке кріплення вала в захватному пристрої СПР, яке забезпечувало б можливість не тільки радіального зміщення вала при встановленні у втулку, але і повороту осі вала в двох вертикальних площинах. При цьому розрахунки суттєво ускладнюються. Таким чином, розмірний аналіз при роботизованому складанні дозволяє узгодити розміри елементів складальної системи, обґрунтувати вимоги до точності використовуваного СПР, деталей та пристроїв. При ручному складанні такий аналіз не потрібен, при роботизованому складанні – необхідний. Роботизація складання обов'язково потребує розрахунку розмірних зв'язків.

Список використаної літератури

1. *World Robotics 2022*. IFR International Federation of Robotics, 2022, 52 p. URL: https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf (дата звернення 09.02.2024).
2. Кравець, В., Кравець, О., Адаменко, Ю., Лапковський, С., Кореньков, В., & Фролов, В. (2023). Аналіз розмірних зв'язків роботизованого комплексу. *Технічні науки та технології*, 3 (33), 40–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-40-52](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52)
3. Приходько, В.П. (2021). *Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
4. Паливода, Ю.Є., Дячун, А.Є., Капаціла, Ю.Б., & Ткаченко, І.Г. (2018). *Розмірні ланцюги*. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
5. Кремнев Г.П., Новіков Ф.В., Жовтобрюх В.О., & Стрельбіцький В.В. (2021). *Основи технології складання*. ЛІРА.
6. Савуляк, В.В. (2014). *Складальні процеси в машинобудуванні*. ВНТУ.
7. Ковалевський, С.В., Онищук, С.Г., & Борисенко, Ю.Б. (2013). *Теоретичні основи технології виробництва деталей і складання машин у важкому машинобудуванні*. ДДМА.
8. *2D tolerance stack-up analysis with examples*. wasyresearch.com. URL: <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/> (дата звернення 09.02.2024).
9. Kosec, P., Škec, S., & Miler, D. (2020). A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(1), 44–56. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.348>
10. Ramnath, S., Haghghi, P., Chitale, A., Davidson, J.K., & Shah, J.J. (2018). Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly. *Procedia CIRP*, 75, 208–213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>

References

1. *World Robotics 2022*. IFR International Federation of Robotics, 2022, 52 p. URL: https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf
2. Kravets, V., Kravets, O., Adamenko, Yu., Lapkovskiy, S., Korenkov, V., & Frolov, V. (2023). Analiz rozmirnykh zviazkiv robotyzovanoho kompleksu. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 3 (33), 40–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-40-52](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52)
3. Prykhodko, V.P. (2021). *Rozmirne modeliuвання та analiz tekhnolohichnykh protsesiv*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
4. Palyvoda, Yu.Ie., Diachun, A.Ie., Kapatsila, Yu.B., & Tkachenko, I.H. (2018). *Rozmirni lantsiuhy*. Ternopilskiyi natsionalnyi tekhnichniyi universytet imeni Ivana Puliuia.
5. Kremniev H.P., Novikov F.V., Zhovtobriukh V.O., & Strelbitskiy V.V. (2021). *Osnovy tekhnolohii skladannia*. LIRA.
6. Savuliak, V.V. (2014). *Skladalni protsesy v mashynobuduvanni*. VNTU.
7. Kovalevskiy, S.V., Onyshchuk, S.H., & Borysenko, Yu.B. (2013). *Teoretychni osnovy tekhnolohii vyrobnytstva detalei i skladannia mashyn u vazhkomu mashynobuduvanni*. DDMA.
8. *2D tolerance stack-up analysis with examples*. wasyresearch.com. URL: <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>
9. Kosec, P., Škec, S., & Miler, D. (2020). A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(1), 44–56. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.348>
10. Ramnath, S., Haghghi, P., Chitale, A., Davidson, J.K., & Shah, J.J. (2018). Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly. *Procedia CIRP*, 75, 208–213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>