

УДК 621.52

А.О. Сугак, студентка гр. ПБ-351мп, к.т.н., доц. Вислоух С.П.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОРІЄНТАЦІЇ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. У роботі вдосконалено математичну модель процесу орієнтації вісесиметричних деталей типу «вал–втулка» з урахуванням пружнопластичних деформацій та температурних ефектів. Показано, що нагрів деталей та перевищення критичного рівня контактних напружень спричиняють залишкові деформації, які впливають на стійкість процесу вставлення. Для оцінки стохастичних відхилень параметрів застосовано метод Монте-Карло.

Ключові слова: орієнтація деталей, вісесиметричні деталі, пружнопластичні деформації, температурні ефекти, метод Монте-Карло, автоматизоване складання.

ВСТУП

Автоматизоване складання виробів вимагає високої точності орієнтації деталей та контролю в процесі їх поєднання. Невеликі відхилення у кутовому положенні або ексцентриситеті осей деталей типу «вал–втулка» можуть призвести до нестабільного руху, нерівномірного розподілу контактних навантажень або часткового заклинювання. Це вимагає формування умов стійкого самонаведення деталей.

Розроблена математична модель [1] враховувала контактні сили за нелінійною моделлю Герца, тертя та стохастичні збурення початкових параметрів. Чисельне моделювання у середовищах MATLAB/Simulink і Python дозволило визначити критичні значення ексцентриситету та кутового відхилення, за яких самовирівнювання стає неможливим. Разом з тим модель розглядала деталі як ідеально пружні тіла і не враховувала вплив температурного стану деталей на контактну взаємодію.

Проте у реальних умовах приладобудівного виробництва деталі нерідко надходять на складання нагрітими після попередніх технологічних операцій, а тертя в процесі самого вставлення додатково підвищує температуру в зоні контакту. За певного рівня контактних напружень у приповерхневих шарах виникають залишкові (пластичні) деформації, що змінюють геометрію поверхні контакту та умови орієнтації [1]. Тому актуальним є подальше вдосконалення моделі з урахуванням цих ефектів та розроблення адаптивних стратегій керування.

ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ РОБІТ

Питання технологічної підготовки приладобудівного виробництва та моделювання складальних процесів детально розглянуто в [2], де наведено методичні основи формалізації опису об'єктів складання та технологічних процесів й створення автоматизованої системи проектування технологічних процесів механоскладальних робіт на їх основі. Для цього розглядаються інформаційні зв'язки в виробі та технології його складання.

У роботах [3, 4] розглянуто основні закономірності процесу поєднання вісесиметричних деталей із використанням вертикальної схеми складання.

Визначено геометричні параметри відносного розташування деталей та кінематичні закономірності процесу складання при контакті в трьох точках.

Сучасні огляди з моделювання складальних процесів [5, 6] вказують на ефективність симуляційного підходу, важливість уніфікованого опису взаємодії деталей при автоматизованих операцій, а також необхідність побудови багаторівневих моделей, що відтворюють нелінійну поведінку системи з урахуванням реальних технологічних відхилень.

Публікації з інтелектуального виробництва [7] демонструють важливість точних моделей механічної взаємодії, що дозволяють передбачити поведінку системи при контакті та зміщеннях. Сучасний огляд автоматизованого складання типу «вал–втулка» [8] систематизує методи аналізу контактних сил та адаптивні стратегії керування, наголошуючи, що традиційні методи позиційного керування не забезпечують достатньої надійності в умовах жорстких допусків та змінних технологічних відхилень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Математична модель, що надана в [1], описує рух вала у втулці через ексцентриситет $e(t)$ та кутове відхилення $\theta(t)$ під дією подаючого зусилля F_z , контактних сил і моментів. До базової моделі введено два додаткові ефекти.

Перший – пружньопластична поведінка матеріалу. При перевищенні контактними напруженнями межі плинності σ_T у приповерхневих шарах виникають залишкові деформації, що змінюють ефективний зазор між валом і втулкою та умови подальшої орієнтації.

Другий – температурний ефект. Підвищення температури деталей змінює їхні пружні характеристики $E(T)$, коефіцієнт тертя $\mu(T)$ та спричиняє термічне розширення, що зменшує ефективний зазор з'єднання. Джерелами теплоти є вплив попередніх технологічних операцій (шліфування, термічна обробка) та тертя безпосередньо у процесі вставлення.

Для оцінки ймовірнісних характеристик процесу застосовано метод Монте-Карло: початкові параметри e_0 , θ_0 та T_0 задаються як випадкові величини з нормальним розподілом, що відповідає реальним технологічним допускам приладобудівного виробництва. За результатами серії чисельних реалізацій визначаються ймовірність успішного вставлення, розподіл залишкових деформацій та вплив температурного стану деталей на межі стійких режимів орієнтації.

Моделювання показало, що нагрів деталей, типовий для приладобудівного виробництва після абразивної або термічної обробки, суттєво звужує допустимий діапазон початкового ексцентриситету порівняно з ізотермічним випадком. Підвищення коефіцієнта тертя додатково обмежує зони стійкої орієнтації, що узгоджується із результатами попередньої моделі [1].

ВИСНОВКИ

У роботі вдосконалено математичну модель процесу орієнтації вісесиметричних деталей у автоматизованому приладобудівному виробництві. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Врахування пружньопластичних деформацій та температурного розширення змінює ефективний зазор з'єднання і звужує діапазон допустимих початкових умов вставлення, що особливо важливо у приладобудуванні, де деталі нерідко надходять на складання нагрітими.

2. Стохастичний аналіз методом Монте-Карло підтверджує, що ймовірність успішного вставлення залежить від температурного стану деталей та дисперсії початкових геометричних відхилень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Сугак, А.О. Моделювання процесу орієнтації деталей в автоматизованому складальному виробництві : дипломна робота ... бакалавра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Сугак Альона Олександрівна. – Київ, 2025. – 110 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/75401>
- [2] Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 488 с.
- [3] Юрковець В.І., Вислоух С.П. Кінематичний аналіз процесу складання вісесиметричних деталей // Збірник праць XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 06-07 грудня 2022 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2022. – С. 128-133
- [4] Юрковець В.І, Вислоух С.П., Антонюк В.С. Моделювання послідовності складання вісесиметричних деталей // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine ndustry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 110–116. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).15.
- [5] Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D. Simulation in manufacturing: review and challenges. Procedia CIRP. 2014. P. 213–229. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114008312>
- [6] Qin Y., Qi Q., Shi P., Scott P.J., Jiang X. Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. P. 1295–1328. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06445-w>
- [7] Zhang L., Zhou L., Ren L., Laili Y. Modeling and simulation in intelligent manufacturing. Computers in Industry. 2019. Vol. 112. 103123. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361519302660>
- [8] Liu Y. et al. Advances in robotic peg-in-hole assembly: a comprehensive review. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s10033-025-01349-w> [0]

Наук. керівник – доц. Вислоух С.П.