

УДК 629.7.004.94.001.12

doi: 10.32620/akt.2024.6.08

**В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ, К. В. МАЙОРОВА, І. О. ВОРОНЬКО,
О. О. КАПНУС, О. С. СКИБА**

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

УВ'ЯЗУВАННЯ ПРИ ПРОТОТИПУВАННІ СКЛАДНИХ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ З РОЗ'ЄМАМИ ТА СТИКАМИ НА ОСНОВІ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ

Предметом вивчення в статті є процеси прототипування складних авіаційних деталей високої точності із роз'ємами та стиками, які виконуються методами зворотного інжинірингу. Основна увага приділена забезпеченню геометричної точності, яка є критично важливою для функціональності та надійності авіаційної техніки. У статті аналізуються методи виготовлення деталей, такі як лиття, оброблення на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК) та адитивне виробництво. **Метою** є розроблення технології зворотного інжинірингу для деталей високої точності, яка включає методи мінімізації похибок геометричних параметрів роз'ємів і стиків при виготовленні прототипів. **Завдання:** аналіз підходів до визначення точності виготовлення деталей та їхніх стиків; розроблення методики розрахунків розмірних ланцюгів для оцінки похибок ув'язування геометричних параметрів; порівняння точності виготовлення деталей-прототипів методом лиття та металевого 3D-друку; запропонування способів підвищення точності прототипування із застосуванням системи калібрів та контркалибрів. **Використовуваними методами** є: теорія технологічних розмірних ланцюгів для розрахунку похибок; експериментальний аналіз процесів лиття та металевого 3D-друку для оцінки точності; розроблення схем технологічних операцій для забезпечення високої точності стиків. **Отримані такі результати:** точність виготовлення прототипів методом адитивного виробництва наближається до точності лиття, але потребує додаткових методів для зменшення відхилень; система калібрів та контркалибрів дозволяє зменшити похибки стиків від $-0,121$ до $+0,121$ мм, що забезпечує відповідність технічним вимогам авіаційних компонентів. **Висновки:** Наукова новизна роботи полягає у розробці методики визначення та мінімізації похибок ув'язування деталей за допомогою інтеграції системи калібрів і контркалибрів. Запропонована методика є ефективною для забезпечення точності виготовлення складних авіаційних деталей із роз'ємами та стиками. Результати підтверджують можливість використання адитивних технологій для виготовлення деталей високої точності.

Ключові слова: реверс інжиніринг (PI), геометрична точність, адитивне виробництво, розмірні ланцюги, стики та роз'єми деталей, система калібрів і контркалибрів, прототипування авіаційних деталей.

Вступ

Допуски на розміри повинні бути визначені та представлені таким чином, щоб гарантувати функціональність деталі при мінімізації витрат на виготовлення. Зворотне проектування – реверс-інжиніринг (PI) – складається зі встановлення загальної геометрії, етапів оброблення і побудови поверхні, а також призначення допусків на номінальні розміри та контролю.

Мотивація дослідження полягає у необхідності забезпечення високої точності виготовлення складних авіаційних деталей із роз'ємами та стиками, які є критично важливими для функціональності авіаційної техніки.

Сучасний стан досліджень демонструє, що геометрична точність виготовлення авіаційних деталей

визначається сукупністю властивостей процесу створення поверхонь деталей і відповідністю цього процесу та його результатів встановленим вимогам.

Виробничий досвід та аналіз відкритих джерел показує, що основними виробничими факторами впливу на геометричну точність авіаційних деталей є якість обладнання та інструменту, фізико-хімічні, механічні та інші властивості початкових матеріалів і заготовок, досконалість створеного технологічного процесу та якість виконання оброблення і контролю [1].

В загальному машинобудуванні показник геометричної точності деталей тісно пов'язаний з точністю оброблення [2]. Отримані при обробленні розмір, форма та розташування поверхонь визначають фактичні зазори і натяги при складанні деталей у виріб і, як слідство, визначають технічні параметри



авіаційної техніки (АТ), що впливають на працездатність, експлуатаційну надійність і економічні показники виробництва в цілому [3]. Тому геометрична точність виготовленої авіаційної деталі має відповідати вимогам з конструктивних допусків і технічних вимог на виготовлення згідно умов роботи деталі в АТ. Фактично реальна геометрична точність виготовленої поверхні авіаційної деталі відрізняється від номінальної (еталонної) поверхні, що задається у разі РІ – аналітичним еталоном (АЕ) авіаційної деталі [4]. Тобто похибкою виготовлення поверхонь деталі є відхилення отриманого при обробленні геометричного значення від заданого [5].

Тому саме вивчення процесу РІ дає основну долю інформації щодо відхилень розмірів та необхідних припусків при виготовленні прототипу [6]. Однак точність форм і стиків, їх розміщення є одним із складових проблеми, які зазвичай вирішує проєктант в ході зворотного проєктування.

Таким чином, метою статті стало розроблення технології зворотного інжинірингу (РІ) для виготовлення авіаційних деталей високої точності із роз'ємами та стиками, яка забезпечує мінімізацію геометричних похибок на всіх етапах прототипування. Для досягнення мети застосовано підхід, заснований на аналізі точності технологічних розмірних ланцюгів та інтеграції системи калібрів і контркалибрів.

1. Аналіз літературних джерел та стан питання

У багатьох роботах вилучені результати вимірювань оброблення поверхні використовуються для оцінки її якості та встановлення даних про допуск розмірів. В роботі [7] пропонується по слідам механічного оброблення відновлювати технологію отримання поверхонь та призначати допуски на отримання заготовки, що виготовляється РІ. Також цей метод пропонується інтегрувати в систему зворотного проєктування для подальшої автоматизації та визначення інформації про допуск розмірів. Проте в такому випадку визначення допусків має сенс тільки для останніх етапів оброблення, що не дає змогу прослідити всю історію отримання деталі. В роботі [8] для знаходження допусків на форми при РІ пропонується використовувати відомі стандарти, наприклад, ISO 14253-1:2017. Автори пропонують перевірену практичну та просту процедуру щодо повного визначення розмірів і допусків для будь-якої заготовки під час зворотного проєктування для промисловості за ISO 14253-1:2017. Однак не показано процедуру визначення розмірів і допусків для деталей стиків, що потребує додаткових досліджень. Це ж стосується і деталей, виготовлених адитивним способом. В свою

чергу процеси адитивного виробництва забезпечують технічні та економічні переваги порівняно з традиційними процесами фрезерування на верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК), штампування, лиття тощо. Проте існуючі обмеження зумовлені принципами процесу, мають бути докладно досліджені задля забезпечення надійного застосування. Зокрема це стосується обмеження геометричного відхилення компонентів, виготовлених адитивним способом. Отже, для адитивного виробництва мають бути методично розроблені реалістичні допуски розмірів. Виробничий досвід та експериментальні дослідження документують, що існуючі відхилення розмірів залежать від багатьох факторів [9]: геометричних чинників (похибки від налагодження обладнання, похибки друку при обраному режимі, температурних деформацій тощо), просторового вирівнювання і номінальних розмірів заготовки. Крім того, положення компонента має значення з точки зору геометричної точності лазерного спікання. Однак значна кореляція між ними не розпізнається. Отримані допуски класифікують адитивне виробництво порівняно з усталеними процесами в 11–16 ІТ-класах за DIN EN ISO 286-1. Тому досяжні допуски при адитивному виробництві можна прирівняти до процесів лиття, штампування, свердління та різання. Однак для отримання реалістичних допусків необхідні подальші експериментальні дослідження із послідовною зміною геометричних факторів, що враховують різні групи розмірів (габаритні, розміри поверхонь конструктивних елементів і геометричних тіл, що утворюють форму деталі) або більшу складність конструкції та властивості матеріалів. Наприклад, усадка як фактор процесу має суттєвий вплив на геометричну точність виробу. Тому мають проводитися дослідження факторів процесу та виробничих впливів щодо уточнення геометричної точності шляхом розроблення підходів та заходів з мінімізації відхилень розмірів. В результаті мають зменшитися розмірні відхилення, що дозволить скоротити ІТ-класи і для адитивного виробництва. Однак для успішного використання РІ коректне призначення допусків набагато складніше у зв'язку з відсутністю інформації про конструкцію та виробництво компонентів дослідного виробу [10]. Методологія [11] є продовженням набутих даних у [7-9], зосередившись на типі допусків, які широко використовуються в загальному машинобудуванні та майже завжди використовуються у зворотному інжинірингу. Однак вона дуже складна, оскільки орієнтована на обчислювальну реалізацію в середовищі 3D-CAD, призначення орієнтованих допусків серед всього діапазону Geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) та інтеграцію функціонально-орієнтованих моделей для оцінки отриманої геометрії з дослідного виробу за РІ.

Забезпечення укладання в допуск розмірів готового виробу вимагає виробників збільшувати точність виготовлення при використанні адитивних технологій. Так за методом наплавлення Fused Deposition Modeling (FDM) у роботі [12] було модифіковано розповсюджений матеріал polylactic acid (PLA) шляхом армування вуглецевим волокном (PLA-CF). Аналіз механічних властивостей дослідних тонкостінних зразків показав, що міцність на розтягування зразків товщиною 1,0-1,8 мм набагато вище, ніж у 4 мм зразків. Слід зазначити, що PLA має анізотропні властивості, тому його механічні властивості змінюються залежно від орієнтації друку і існування армування, в результаті чого він стає ортотропним. Армування різними волокнами та компонентами дозволяє зменшити кількість та розмір порожнин і зазорів, що в свою чергу збільшує масу, але і може суттєво підвищити точність форм деталей. Однак результати порівняльних досліджень відсутні, що потребує додаткового вивчення. На геометричну точність заготовок впливають також і параметри друку до використовуваного матеріалу. Було виявлено, що параметр густини заповнення відповідає не тільки за кількість матеріалу, який використовується для друку, але й за наявність порожнин та зазорів, що сприяють деградації матеріалу при розтягуванні. Крім того, у зоні склеювання вздовж напрямку максимальної тангенціальної напруги були мікротріщини, які також призводили до деградації матеріалу при навантаженні. Найбільш фундаментально досліджена точність друку заготовок при PI у роботі [13], у якій більшістю розглядалися матеріали, обладнання та параметри процесів для FDM. Крім того, були визначені фактори, що впливають на геометричну точність друку заготовок (розміри, форми та розташування). Метою цього дослідження було експериментальне визначення допусків розмірів з використанням стандартних параметрів. Для цього було розроблено методичну процедуру, що реалізовувала поділ геометричних елементів на типи: некриволінійні (кубоїди), прості криволінійні (циліндри) та подвійні криволінійні елементи (сфери). Цей поділ застосовувався для дослідження розмірних відхилень розмірів. Номінальний розмір та вирівнювання показали сильний вплив на розмірні відхилення. Класифікація одержаних значень допусків розмірів у системі IT відповідно до DIN EN ISO 286-1 показала, що процес FDM досягає класів між IT09 та IT14. Такі значення зів'язані зі спіканням, фрезеруванням, різанням та свердлінням щодо досяжних допусків розмірів. Результати вказують ще й на те, що необхідно також враховувати і положення зони допуску. Така комбінація класів IT та положень зони допуску дозволять провести корисну класифікацію очікуваних відхи-

лень, але слід враховувати і граничні умови при виробництві, що не було досліджено в роботі [13]. При врахуванні останнього зміна параметрів процесу та виробничих впливів призведе до різних відхилень розмірів. Це підкреслює, що для визначення геометричних відхилень при адитивному виробництві необхідний унікальний комплексний підхід. Далі необхідно варіювати специфікації певних геометричних ключових факторів, щоб розширити методичну процедуру та визначити відхилення для кількох геометричних форм. Покрокова зміна геометричних факторів та пов'язані з ним експериментальні випробування дозволять систематично встановлювати розмірні допуски, що потребує натурної апробації для кожного випадку та набору статистичних даних. У роботі [14] також розглядається проблема точності виробу, а саме оцінювання та кількісне визначення метрологічних характеристик лазерної порошкової плавки металевих порошоків. Представлено аналіз, виконаний на спеціально розроблених артефактах, надрукованих із використанням порошку AlSi10Mg та системи EOS M280 LPBF. Дослідження кількісно визначило внутрішньо- і міжмасштабні ефекти концентрації матеріалу деталі, зняття напруги, поведінку відхилень друку і видалення деталі, а також мікродробеструйного оброблення на відхиленнях 3D-профілю деталей. Це дозволило підтвердити існування внутрішньомасштабних ефектів, що створюють різні характеристики по всій деталі. Останнє впливає на утворення відхилень з різними номінальними розмірами. Помічено, що чим нижче концентрація матеріалу, тим менше кількість відхилень. Так, в роботі [15] наведено дослідження точності форми поверхонь за допомогою запропонованих моделі гібридної поверхні, функції B-сплайнів та радіальної базисної функції (the radial basis functions (RBFs)), а також інших поверхонь з адаптивними можливостями уточнення, які можуть покращити формоуявлення щодо числа змінних форми та досягнення точно відтвореної геометрії. Однак, якщо ці методи використовуються при інженерній оптимізації (наприклад, оптимізація потоку), то алгоритм може мати проблеми у виході з локальних мінімумів. Сітка контрольних точок B-сплайну адаптується точно до поточної форми, додаючи безліч точок у місцях розташування геометричних елементів. Проблема в тому, що в рамках інженерної процедури оптимізації форми інший алгоритм мав би використовуватися для адаптивного додавання та видалення нової точки у разі, коли деякі геометричні елементи мають бути додані чи видалені. Таким чином, особливо в інженерній оптимізації форми, запропоноване параметричне подання форми, яке пропонує постійний набір змінних форми, потребує подальшого удосконалення. Перевагою RBF у порівнянні з поверхнями на основі сплайнів є те, що

базисні функції можуть бути розміщені саме там, де потрібні модифікації.

У всіх розглянутих вище публікаціях більшою мірою ставиться проблема точності форм деталей. Проте для опису об'єктів високої точності в таких галузях, як авіабудування велике значення мають точність стиків, роз'ємів та інших сполучень. У публікаціях про РІ це питання або не згадується або мається на увазі як факт, що не має значення. В публікаціях частіше розглядаються деталі у вигляді простих геометричних форм або їх комбінацій. Проте багато деталей мають особливість призначення виконувати свої функції тільки при високій точності поверхонь або кількох поверхонь, за якими вони сполучаються або стикаються. Це можуть бути вузли кріплення, площини стиків, роз'ємів, системи отворів тощо. Такі елементи складно скануються, тому увага більше надається загальній формі. Проте для успішного РІ ці елементи мають велике значення, тим більше, що їх точність повинна бути на один-два квалітети вище ніж поверхня, що сполучається. Крім того такі деталі з'єднуються з іншими деталями конструкції, що при повному РІ означає створення прототипу, який має якості повної взаємозамінності. В тому випадку, коли немає змоги доступу до деталі, що контактує з досліджуваною, забезпечити повну взаємозамінність складно. Така задача не ставиться авторами або про неї згадують мимоходом. Прикладом таких деталей є лопаті вертольотів, лопаті компресорів та двигунів, поверхні органів керування літальних апаратів, деталі оптичних приладів, озброєння та інше. Часто для створення аналітичного еталону необхідні розміри вимірюють за допомогою координатно-вимірювальних машин (КВМ) [16] у зв'язку з тим, що КВМ має найбільшу точність замірів в порівнянні зі сканерами [17]. До всього ж автори досліджують точність створення прототипу при тому чи іншому варіанті РІ, де мало освітлюють сам процес вибору варіанту створення прототипу. Тому метою даного дослідження є створення технології звичайного РІ для деталей високої точності з роз'ємами та стиками за обраним варіантом прототипування.

2. Розрахунки похибки ув'язування при прототипуванні

Для аналізу процесів перенесення та отримання розмірів деталі при прототипуванні використані структурні схеми процесу, що зображують у вигляді ланцюгів і які складаються з об'єктів, носіїв розмірів та зв'язків між ними – етапів перенесення розмірів з одного об'єкту на інший [18]. Технологічним розмірним ланцюгом називається сукупність розмірів, що утворюють замкнений контур та безпосередньо приймають участь в утворенні остаточного розміру

деталі або складальної одиниці. Під час розрахунків очікуваної точності в якості складових ланок технологічного розмірного ланцюга використано похибки передачі первинного розміру, що дорівнює номінальному за аналітичним еталоном (АЕ), тобто технологічний розмірний ланцюг відображає зміни цього розміру на всіх етапах його перенесення під час як технологічного підготовки виробництва (ТПВ), так й виготовлення. Ця сукупність розмірів безпосередньо приймає участь в забезпеченні точності геометричних параметрів виготовленої деталі. Повна похибка ув'язування при прототипуванні – це сукупність ланок-похибок для всіх операцій процесу перенесення розмірів, де під терміном «ув'язування» розуміють процес узгодження геометричних параметрів деталей, складальних одиниць, елементів технологічного оснащення для виготовлення окремих деталей або складання. Такий підхід дозволив здійснити розрахунок за стандартною методикою теорії розмірних ланцюгів, що дозволяє вирішувати два завдання. Пряме завдання визначає номінальний розмір і похибку (допуск) всіх складових ланок за номінальним розміром і похибкою (допуском) ланки, що замикає. Зворотне завдання – за номінальним розміром і розміром похибки (допуску) складових ланок визначають номінальні розміри і похибку (допуск) ланки, що замикає. Для розрахунку розмірних ланцюгів використано імовірно-вірогідний метод як той, що дозволяє розрахувати на кожний номінальний розмір свій допуск. Тоді значення підсумкового поля розсіювання випадкової величини повної похибки процесу [19] визначається за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 K_i^2 \delta_i^2}, \quad (1)$$

де K_{Σ} , K_i – коефіцієнти відносного розсіювання похибок замикаючого та i -го складового ланок полів розсіювання;

δ_i – поле розсіювання похибок або допуски складових A_i ланок (трудомісткості) ланцюга;

$m-1$ – кількість складових ланок;

ξ_i – передатне відношення i -ї ланки.

Передатне відношення i -ї ланки має значення $+1$, у зв'язку з прямою передачею одиничної похибки на сумарну.

Підсумкове значення відхилення середини поля допуску похибки:

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\Delta_{0i} + \alpha_i \frac{\delta_i}{2} \right) - \alpha_{\Sigma} \frac{\delta_{\Sigma}}{2}, \quad (2)$$

де α_{Σ} , α_i – коефіцієнти відносної асиметрії кривих ро-

зсіювання похибок замикаючого та i -го ланок розмірного ланцюга відповідно;

δ_Σ – поле розсіювання похибки або допуск замикаючої ланки (похибки) ланцюга;

$\Delta_{0\Sigma}$, Δ_{0i} – координати середин полів розсіювання ланок (похибок) ланцюга.

Коефіцієнти K_i знаходять за формулою [19]:

$$K_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{н.з.р.i}} = \frac{6\sigma_i}{\delta_i}, \quad 1 \leq K_i \leq \sqrt{3}, \quad (3)$$

де σ_i , $\sigma_{н.з.р.i}$ – середньоквадратичні відхилення фактичного та нормального законів розсіювання i -ї ланки розмірного ланцюга. Для нормального закону розсіювання i -ї ланки розмірного ланцюга, як відомо, $\sigma_i = 6\sigma_{н.з.р.i}$. Для фактичного закону, що описується кривою Гауса, $K_i = 1$.

Коефіцієнт усунення центру групування похибок від середини поля розсіювання похибок визначається за формулою

$$\alpha_i = \frac{M_{\Delta_i} - \Delta_i}{0,5\delta_i}, \quad -1 < \alpha_i < +1, \quad (4)$$

де M_{Δ_i} – математичне очікування (середнє арифметичне, центр групування) похибок i -ї ланки.

3. Вибір варіантів прототипування деталей та розрахунк похибок (допусків)

У виборі варіантів виготовлення при прототипуванні металевих деталей розглянуто задачу створення з високою точністю їх роз'ємів та стиків. Для цього досліджено традиційні методи виготовлення штампування, лиття, оброблення на верстаті з ЧПК, а також надсучасний адитивний метод 3D-друку [20]. На рис. 1 наведено схему послідовності передачі інформації та утворення розмірів форми деталей для перелічених вище варіантів прототипування.

Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипа від деталі-оригінала для процесів точного лиття металів наведено у таблиці 1. Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипа від деталі-оригінала для процесів металевого 3D-друку наведено у таблиці 2. Дані з відхилення на етапах переносу розмірів взято з літературних джерел, що наведено у огляді, а також зі стандартів [21, 22]. Враховувалися також експериментальні дані досліджень точності, отримані науковцями за допомогою технології селективного лазерного плавлення [23], а також сучасних методів сканування та 3D-друку [24]. Інспектування отриманих деталей [25] впливає на

їхню якість, а розроблення методів оцінки точності та відхилень [26] покращує функціональні властивості виробів, що є критично важливим для машинобудування.

Розрахунки показують, що для лиття прототип буде мати точність виготовлення, яка обумовлюється зміною розмірів у порівнянні з деталлю-оригіналом від $-0,42$ до $+0,42$ мм. При цьому точність виготовлення, яка обумовлюється зміною розмірів у порівнянні досліджуваної деталі з деталлю-прототипом для РІ, складає від $-0,457$ до $+0,457$ мм, що є більше ніж для деталей лиття. Такі результати ще раз підтверджують, що на нинішньому етапі розвитку металевих АТ вони наближаються за суттю процесу до процесів точного лиття металів. У всякому разі для порівняння отримані розрахунки (табл. 1, 2) підтверджують приблизний характер відхилень, пов'язаних з коробленням, стисненням поверхонь, усадками та присутністю залишкових напружень. Таке уявлення про процес РІ має велике значення при розрахунках допусків і припусків на фінішне оброблення.

4. Пропозиції щодо збільшення точності прототипування деталей високої точності з роз'ємами та стиками

Для стиків отримана точність (табл. 1, 2) одержання прототипу є зовсім несприятливою, тому що для виробів точної механіки, наприклад, органів керування літальними апаратами точність прототипування повинна бути в кілька разів вище. Для вирішення цього питання пропонується використовувати систему калібрів та контркалибрів, що в свою чергу потребує адаптацію існуючої виробничої системи авіаційного підприємства до адитивного виготовлення. Суть пропозиції наведена у вигляді схеми ув'язування стиків об'єктів авіаційної техніки, що виробляються методами адитивної технології (рис. 2).

Відповідно до схеми (див. рис. 2) після сканування та створення АЕ в її структурі або окремо створюється АЕ стику, в якому може бути передбачено утворення контретапону, а саме відповідної частини, яка може стикуватися з деталлю, що розглядається. Після цього створюються фізичні елементи: робочий еталон стику та контретапон стику, який перевіряється на точність стикування з деталлю що розглядається.

В разі відповідності технічним умовам на стикування створюються пристосування для оброблення стиків на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) або кондукторні пристосування для оброблення отворів в разі використання плоских стиків з отворами. Кількість пристосувань залежить від конструкції стику, його просторових елементів тощо.

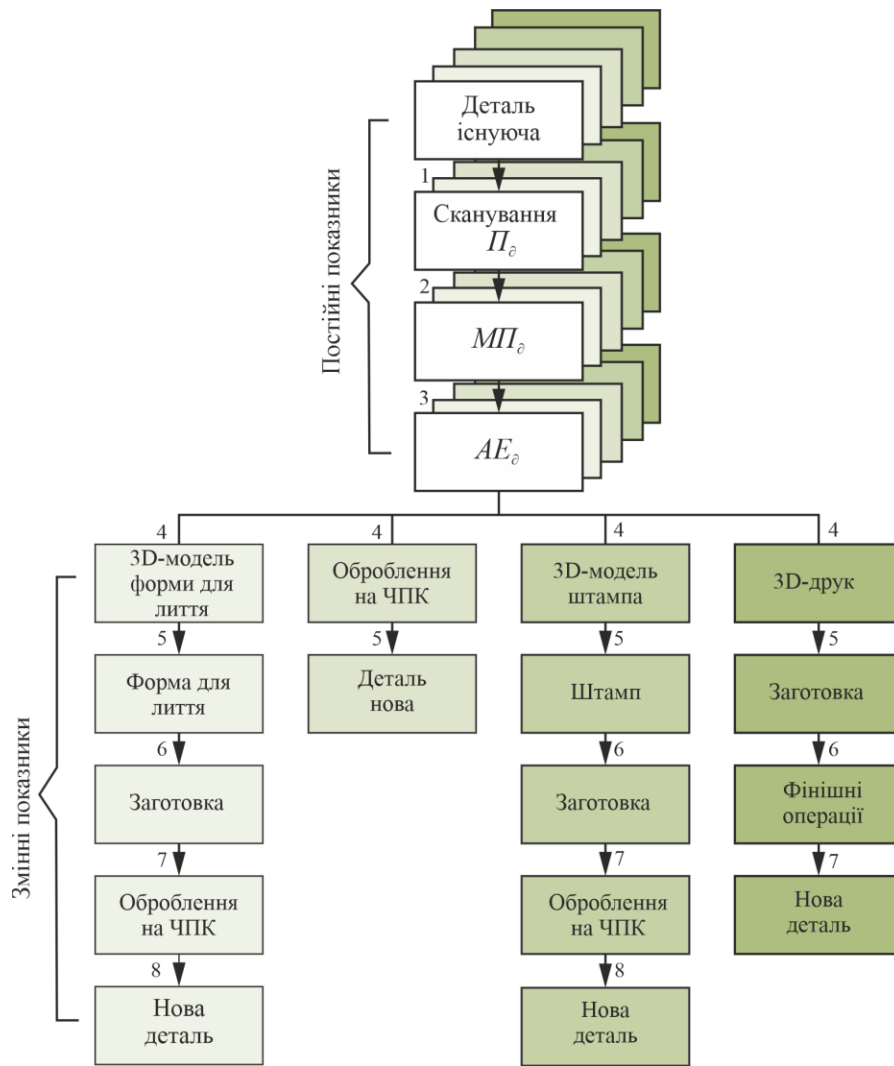


Рис. 1. Схема варіантів прототипування металевих виробів при реверс інжинірингу

Таблиця 1

Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу при литті в формі

Складова ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_{Σ}	Δ_i	Δ_{Σ}	Відхилення Д-Д _{прот}
Д-П _δ	+0,3 -0,3	0,6	0,36		0,0		
П _δ - МП _δ	+0,1 -0,1	0,2	0,04		0,0		
МП _δ - АЕ _δ	+0,1 -0,1	0,2	0,04		0,0		
АЕ _δ - МЛ	+0,2 -0,2	0,4	0,16		0,0		
МЛ - форма	+0,2 -0,0	0,2	0,04		+0,1		
Форма - Заготовка	+0,0 -0,2	0,2	0,04		-0,1		
Заготовка - ЧПК	+0,05 -0,05	0,1	0,01		0,0		
ЧПК - Д _{прот}	+0,05 -0,05	0,1	0,01		0,0		
Σ			0,69	0,84	0,0	0,0	+0,42 -0,42

Таблиця 2

Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу для процесів металевого 3D-друку

Складові ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_Σ	Δ_i	Δ_Σ	Відхилення $D-D_{\text{прот}}$
$D - P_\delta$	+0,3 - 0,3	0,6	0,36		0,0		
$P_\delta - MP_\delta$	+0,1 - 0,1	0,2	0,04		0,0		
$MP_\delta - AE_\delta$	+0,1 - 0,1	0,2	0,04		0,0		
$AE_\delta - 3D_{\text{принт}}$	+0,02 - 0,02	0,04	0,16		0,0		
$3D_{\text{принт}} - \text{Заготовка}$	+0,3 - 0,3	0,6	0,36		0,0		
$\text{Заготовка} - \text{ЧПК}$	+0,05 - 0,05	0,1	0,01		0,0		
$\text{ЧПК} - D_{\text{прот}}$	+0,05 - 0,05	0,1	0,01		0,0		
Σ			0,836	0,914	0,0	0,0	+0,457 -0,457

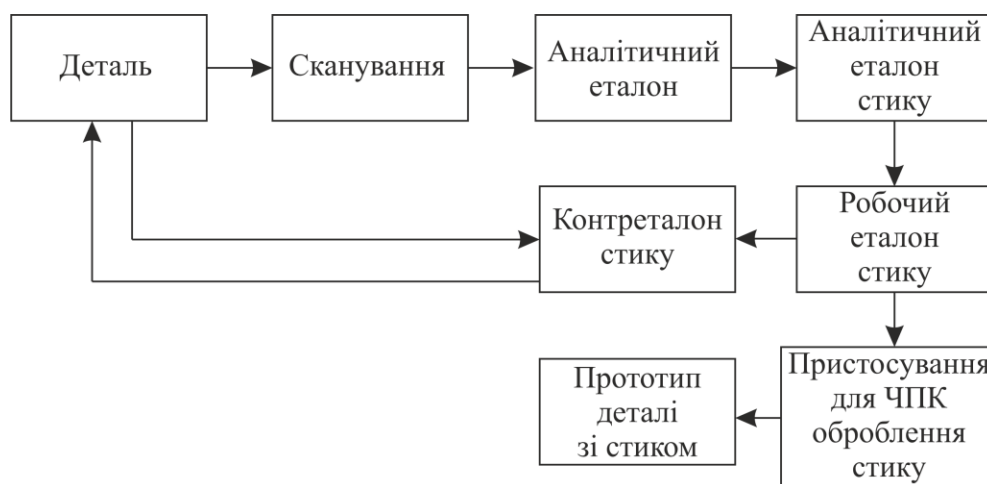


Рис. 2. Схема ув'язування стиків деталей при прототипуванні, що виробляються методами адитивної технології

Відповідно схеми ув'язування стиків об'єктів при прототипуванні (див. рис. 2) похибка ув'язування деталі та прототипу буде рівна сумі похибок на етапах переносу розмірів та узгоджень: деталь (D) – контреталон (KE); контреталон – робочий еталон (PE); робочий еталон – пристосування (PP) для оброблення стиків; пристосування для оброблення стиків – деталь-прототип ($D_{\text{прот}}$). Результати розрахунків похибок наведено в табл. 3.

Таким чином, похибки ув'язування стиків деталі і деталі-прототипа при використанні запропонованої технології за допомогою калібрів та контркалибрів складають від $-0,121$ до $+0,121$ мм, що в 3,78 разів менше ніж при використанні тільки сканування. Таке відхилення ув'язування за своїм розміром задовольняє технічні умови більшості точних пристроїв, що використовуються в органах управління літальними апаратами.

Таблиця 3

Результати розрахунків похибок при ув'язуванні стиків деталей при прототипуванні

Складова ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_Σ	Δ_i	Δ_Σ	Відхилення $D-D_{\text{прот}}$
Д-КЕ	+0,02 - 0,02	0,04	0,0016		0,0		
КЕ - РЕ	+0,02 - 0,02	0,04	0,0016		0,0		
ПР - РЕ	+0,02 - 0,02	0,04	0,0016		0,0		
ПР - $D_{\text{прот}}$	+0,05 - 0,05	0,1	0,01		0,0		
Σ				0,0148	0,0	0,0	+0,121 -0,121

5. Розроблення верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу високої точності

На рис. 3 показано варіанти кріплення лопатей за допомогою плоского стику з отворами та просторового стику типу замок або «хвіст ластівки».

Для оброблення стиків наведених деталей (див. рис. 3) використовувались пристосування, які були вироблені методами переносів розмірів з робочого еталону стику та пов'язаного з ним контретапону стику. Схема верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу наведена на рис. 4.

Таке верстатне пристосування складається з наступних елементів. На основній плиті 1 встановлені

базові ложементи 2 та 3, базовий упор 4 положення деталі 5, що обробляється. Деталь займає незмінне положення завдяки притиску 6. Пристосування базується на столі фрезерного верстата з ЧПК за допомогою отворів 7. Завданням фрезерної операції є обробка стику в системі координат верстата шляхом видалення припуску 8. В залежності від необхідної точності отвори стику 9 можуть бути виконані на верстаті з ЧПК або по кондукторній плиті (на схемі не показана). Для точного переносу розмірів використовувались процеси компенсації: перенос за допомогою твердіючих сумішей та компенсаційних припусків. Запропонована система (рис. 4) перевірена практично на виробі лопатей турбін з різними стиковими вузлами і показала позитивні результати за точністю, що задовільняли поле допуску на номінальний розмір.



а



б

Рис. 3. Варіанти кріплення лопатей: а – за допомогою плоского стику з отворами; б – просторового стику типу «замок»

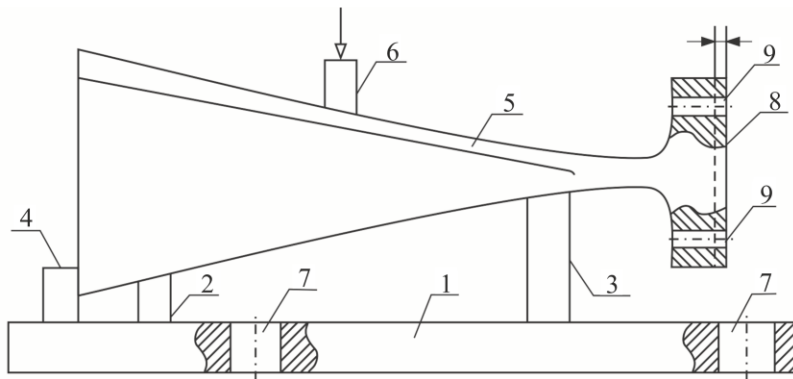


Рис. 4. Схема верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами лопаті-прототипу

6. Приклад реалізації та дискусія

Розглянемо практичну реалізацію запропонованого підходу прототипування на прикладі складної авіаційної деталі – гіпотетичного кронштейна з високою точністю роз'ємів та стиків. Такого типу деталі широко використовуються в авіації та мають складну форму, що включає отвори, роз'єми, площини стиків та інші функціональні елементи. У процесі створення прототипу виконуватимуться наступні етапи:

1. Сканування та створення аналітичного еталону (АЕ). Для відтворення геометрії деталі використовуватиметься координатно-вимірвальна машина (КВМ), що забезпечить високу точність вимірювання поверхонь та стиків. На основі отриманих даних буде побудовано 3D-модель аналітичного еталону.

2. Порівняємо два методи виготовлення – лиття та адитивне виробництво (3D-друк). Для лиття використовуватимемо традиційний підхід із виготовленням форм, тоді як 3D-друк можна виконати з металевого порошку AlSi10Mg на установці EOS M280 LPBF. Вибір AlSi10Mg в даному випадку дозволяє продемонструвати переваги адитивного виробництва у виготовленні авіаційних деталей з високими вимогами до точності, міцності та довговічності. Що до обладнання, то установка EOS M280 оптимізована для роботи з AlSi10Mg.

3. Використовуючи теорію технологічних розмірних ланцюгів, визначимо похибки на кожному етапі переносу розмірів для обох методів. Результати розрахунків показали, що очікувана похибка при литті становить від $-0,42$ до $+0,42$ мм, тоді як для адитивного виробництва — від $-0,457$ до $+0,457$ мм.

4. Для зменшення похибок у стиках можна розробити комплект калібрів та контркалибрів, які дозволять досягти точності стиків у межах від $-0,121$ до $+0,121$ мм.

5. Отримані прототипи можна перевірити за допомогою КВМ. Передбачається, що реалізація сис-

теми калібрів значно зменшить відхилення стиків порівняно з початковим станом.

Дискусія

Даний підхід до прототипування деталей високої точності покаже високу ефективність під час реалізації. Зокрема, система калібрів та контркалибрів здатна забезпечувати високу точність геометричних параметрів стиків.

Однак, впровадження такої системи потребує значних ресурсів, включаючи час на виготовлення калібрів, а також підготовку виробничих потужностей. У цьому контексті виникає питання економічності застосування такого підходу для серійного виробництва. Для невеликих партій чи унікальних компонентів використання системи калібрів є обґрунтованим, тоді як для масового виробництва можуть бути ефективнішими альтернативні методи забезпечення точності.

Крім того, запропонована методика продемонструвала обмеження щодо відхилень, пов'язаних із залишковими напруженнями в процесі 3D-друку. Цей фактор потребує подальшого вивчення, зокрема через варіювання параметрів друку (температурного режиму, швидкості, густини заповнення).

Нарешті, результати підкреслюють потенціал адитивного виробництва як технології, що наближається до точності лиття, але ще потребує подальших удосконалень. Інтеграція запропонованих рішень із сучасними 3D-CAD-системами може забезпечити автоматизацію процесів призначення допусків, що стане важливим кроком до широкого впровадження даної методики в авіабудуванні.

Висновки

Результати розрахунків підтверджують результати ряду інших авторів, що на нинішньому етапі розвитку металевих деталей АТ вони наближаються за

сутню до процесів точного лиття металів. При призначенні допусків та припусків металевих деталей, одержаних методами АТ, можна спиратися на досвід ливарного виробництва.

Запропоновано і практично підтверджено позитивність використання з метою підвищення точності ув'язування стиків об'єктів, що виробляються методами адитивної технології, систему калібрів та контркалибрів, комплект пристосувань для оброблення стиків, що отримані методом переносу розмірів з калібрів та контркалибрів. Така система дозволить отримати точність ув'язування в межах від $-0,121$ до $+0,121$ мм, що в 3,78 разів менше ніж при використанні тільки сканування та задовольняє відхилення ув'язування за своїм діапазоном технічні умови більшості точних пристроїв, які використовуються в органах управління літальними апаратами.

Подальші дослідження будуть спрямовані на:

- розроблення універсальних калібрів для різних типів стиків;
- аналіз впливу матеріалів на точність адитивного виробництва;
- вивчення економічної ефективності застосування запропонованої методики в умовах різного масштабу виробництва.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач досліджень – **В. Т. Сікульський, І. О. Воронько**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. С. Скиба, О. О. Капінус**; розрахунок та систематизація відхилень контурів деталі-прототипу при литті в форми – **В. Т. Сікульський**; розрахунок та систематизація відхилень контурів деталі-прототипу для процесів металевого 3D-друку – **К. В. Майорова**; оформлення ілюстрацій – **К. В. Майорова, І. О. Воронько**; розроблення верстатного пристосування – **В. Т. Сікульський**; підготовка чернетки – **В. Т. Сікульський**; написання – **К. В. Майорова**; аналіз результатів, формулювання висновків – **В. Т. Сікульський, І. О. Воронько**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Singh, S. *Handbook of a mechanical engineer [Text]* / Sadhu Singh. – 2nd ed. – S. Chand Publishing, 2011. – 2080 p.
2. Sadegh, A. M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers [Text] : Handbook* / A. M. Sadegh, W. M. Worek – 12th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2017. – 1400 p.
3. Avallone, E. A. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers [Text] : Handbook* / E. A. Avallone, T. Baumeister, & A. Sadegh – 11th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2007. – 1800 p.
4. *Implementation of Reengineering Technology to Ensure the Predefined Geometric Accuracy of a Light Aircraft Keel [Text]* / K. Maiorova, I. Vorobiov, M. Boiko, O. Komisarov, & V. Suponina // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – No. 6/1 (114). – P. 6-12. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246414.
5. Samadi, H. *Metrology and Manufacturing-Integrated Digital Twin (MM-DT) for Advanced Manufacturing: Insights from CMM and FARO Arm Measurements [Text]* / H. Samadi, Md M. Ahsan, & Sh. Raman. – arXiv, 2024. – arXiv:2411.05286v1. – (Preprint/arXiv). DOI: 10.48550/arXiv.2411.05286.
6. Joost, R. *New methodology for the characterization of 3D model reconstructions to meet conditions of input data and requirements of downstream application [Text]* / R. Joost, S. Mönchinger, & K. Lindow // *Proceedings of the Design Society*. – 2024. – No. 4. – P. 613-622. DOI: 10.1017/pds.2024.64.
7. Jamshidi, J. *Dimensional tolerance approximation for re-verse engineering applications [Text]* / J. Jamshidi, A. R. Mileham, & G. W. Owen // *International Design Conference – DESIGN 2006, [Dubrovnik], May 15–18, 2006 / University of Dubrovnik*. – Dubrovnik, 2006. – P. 855–862.
8. Sáenz-Nuñoa, M. A. *ISO Tolerance specification in reverse engineering [Text]* / M. A. Sáenz-Nuñoa, & R. Lorente-Pedreille // *Procedia Manufacturing: Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, June 28–30, 2017*. – Vol. 13. – P. 472-479. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.063.
9. *Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions [Text]* / T. Lieneke, G. A. O. Adam, S. Leuders, F. Knoop,

- S. Josupeit, P. Delfs, N. Funke, & D. Zimmer // Conference: 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, August 2015 – Texas, 2015. P. 371–384. Available at: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/2015-30-Lieneke.pdf>. (accessed 10.08.2024).
10. Implementation of Reengineering Technology to Reduce the Terms of the Technical Preparation of Manufacturing of Aviation Technology Assemblies [Text] / V. Sikulskiy, K. Maiorova, I. Vorobiov, M. Boiko, & O. Komisarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – No. 3/1 (117). – P. 25-32. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.258550.
11. Kaisarlis, G. J. A Systematic Approach for Geometrical and Dimensional Tolerancing in Reverse Engineering [Text] / J. G. Kaisarlis // Reverse Engineering – Recent Advances and Applications: Handbook / ed. by A.C. Telea – InTechOpen, 2010. – P. 133–160. ISBN 978-953-51-0158-1. DOI: 10.5772/32001.
12. Bochnia, J. A Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications [Text] / J. Bochnia, M. Blasiak, & T. Kozior // Materials. – 2021. – Vol. 14. – Article No. 7062. DOI: 10.3390/ma14227062.
13. Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling [Text] / T. Lieneke, V. Denzer, G. A. O. Adam, & D. Zimmer // Procedia CIRP 43: 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT), May 18–20, 2016 / ed. by Soderberg R. – Gothenburg, 2016. – P. 286-291. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
14. Zongo, F. Scale, Material Concentration, Stress Relief and Part Removal Effects on the Dimensional Behaviour of Selected AlSi10Mg Components Manufactured by Laser Powder Bed Fusion [Text] / F. Zongo, A. Tahan, & V. Brailovsk // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – Vol. 3, iss. 49. 18 p. DOI: 10.3390/jmmp3020049.
15. Superimposed RBF and B-spline parametric surface for reverse engineering applications [Text] / I. M. Kragić, S. Perišić, D. Vucina, & M. Curković // Integrated Computer-Aided Engineering. – 2019. – Iss. 1. – P. 17-35. DOI: 10.3233/ICA-190611.
16. Balasubramanian, M. P. Evaluation of Uncertainty in Angle Measurement performed on a Coordinate Measuring Machine [Text] / M. P. Balasubramanian, R. Vignesh, & R. Rajamani // Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization. Conference ICCAP 2021, December 7-8, 2021 / ed. by Adeli H. – Chennai, 2021. – 8 p. DOI: 10.4108/eai.7-12-2021.2314516.
17. Zha, J. A strategy to evaluate and minimize parallelism errors of a rotor system in a precision rotary table [Text] / J. Zha, H. Zhang, & Y. Chen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 3641-3648. DOI: 10.1007/s00170-019-04828-2.
18. Technology of airplane and helicopter manufacturing. Fundamentals of aircraft manufacturing [Text] : The course lecture summary in English and Russian for foreign students / V. Sikulskiy, Yu. Boborykin, S. Vasilchenko, A. Pyankov, & V. Demenko – Kharkiv : National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», 2006. – 206 p.
19. Технологія виробництва літальних апаратів (складально-монтажні роботи) [Текст] / В. С. Кривцов, Ю.А. Воробйов, Ю. М. Букін, Ю. В. Д'яченко, О. К. Горлов, О. М. Меццераков, С. Ю. Муронов, О. В. Шупуль, & В. В. Воронько – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2009. – 80 с.
20. Algorithm for Selecting the Optimal Technology for Rapid Manufacturing and/or Repair of Parts [Text] / V. Sikulskiy, K. Maiorova, O. Shypul, V. Nikichanov, O. Kapinus, & O. Tryfonov // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023 / Eds. by Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. – Springer: Cham, 2024. – P. 25-39. DOI: 10.1007/978-3-031-61415-6_3.
21. ISO 286-1. Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits [Text]. – [Entered into force on 2010-11-01]. – Geneva : ISO, 2010. – 48 p.
22. ISO 286-2 Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts [Text]. – [Entered into force on 2010-11-01]. – Geneva : ISO, 2010. – 59 p.
23. Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting [Text] / F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, F. Trevisan, E.P. Ambrosio, D. Manfredi, & P. Fino // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 88. – P. 451–458. DOI: 10.1007/s00170-016-8759-y.
24. Study of a Geometry Accuracy of the Bracket-Type Parts using Reverse Engineering and additive Manufacturing Technologies [Text] / K. Maiorova, V. Sikulskiy, I. Vorobiov, O. Kapinus, A. Knyr // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2022, [Kharkiv], 28–29 Oct. 2022. / Eds. by Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. – Springer: Cham, 2023. – P. 146–158. DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_13.
25. Optical inspection of cutting parts by 3D scanning [Text] / D. Lazarević, B. Nedić, S. Jović,

Ž. Šarkoćević, & M. Blagojević // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2019. – Vol. 531. – Article No. 121583. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121583.

26. Kondić, Ž. *Tolerance Analysis of Mechanical Parts [Text]* / Ž. Kondić, Đ. Tunjić, & L. Maglić // *Tehnički glasnik*. – 2020. – Vol. 14, iss. 3. – P. 265-272. DOI: 10.31803/tg-20200504092314.

References

1. Singh, S. *Handbook of a mechanical engineer*. 2nd ed. Chand Publishing, 2011. 2080 p.
2. Sadegh, A. M., & Worek, W. M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 12th ed. New York, McGraw-Hill Education, 2017. 1400 p.
3. Avallone, E. A., Baumeister, T., & Sadegh, A. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 11th ed. New York, McGraw-Hill Education, 2007. 1800 p.
4. Maiorova, K., Vorobiov, I., Boiko, M., Komisarov, O. & Suponina, V. Implementation of Reengineering Technology to Ensure the Predefined Geometric Accuracy of a Light Aircraft Keel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, no. 6/1 (114), pp. 6-12. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246414.
5. Samadi, H., Ahsan, Md M., & Raman, Sh. Metrology and Manufacturing-Integrated Digital Twin (MM-DT) for Advanced Manufacturing: Insights from CMM and FARO Arm Measurements. *arXiv*, 2024, arXiv:2411.05286v1. DOI: 10.48550/arXiv.2411.05286.
6. Joost, R., Mönchinger, S. & Lindow, K. New methodology for the characterization of 3D model reconstructions to meet conditions of input data and requirements of downstream application. *Proceedings of the Design Society*, 2024, no. 4, pp. 613-622. DOI: 10.1017/pds.2024.64.
7. Jamshidi, J., Mileham, A. R., & Owen, G. W. Dimensional tolerance approximation for reverse engineering applications. *International Design Conference – DESIGN 2006*, Dubrovnik, Croatia, University of Dubrovnik, 2006, pp. 855–862.
8. Sáenz-Nuñoa, M. A., & Lorente-Pedreilleb, R. ISO Tolerance specification in reverse engineering. *Procedia Manufacturing: Manufacturing Engineering Society International Conference 2017*, Vigo, Spain, 2017, pp. 472–479. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.063.
9. Lieneke, T., Adam, G. A. O., Leuders, S., Knoop, F., Josupeit, S., Delfs, P., Funke, N., & Zimmer D. Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. *Conference: 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, Austin, Texas, 2015, pp. 371–384. Available at: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/2015-30-Lieneke.pdf>. (accessed 10.08.2024).
10. Sikulskiy, V., Maiorova, K., Vorobiov, I., Boiko, M. & Komisarov O. Implementation of Reengineering Technology to Reduce the Terms of the Technical Preparation of Manufacturing of Aviation Technology Assemblies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, no. 3/1 (117), pp. 25-32. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.258550.
11. Kaisarlis, G. J. A Systematic Approach for Geometrical and Dimensional Tolerancing in Reverse Engineering. *Reverse Engineering – Recent Advances and Applications. InTechOpen*, 2010, pp. 133–160. DOI: 10.5772/32001.
12. Bochnia, J., Blasiak, M., & Koziar, T. A Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications. *Materials*, 2021, vol. 14, article no. 7062. DOI: 10.3390/ma14227062.
13. Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G. A. O., & Zimmer, D. Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP 43: 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, Gothenburg, 2016, pp. 286-291. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
14. Zongo, F., Tahan, A., & Brailovsk, V. Scale, Material Concentration, Stress Relief and Part Removal Effects on the Dimensional Behaviour of Selected AlSi10Mg Components Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, vol. 3, iss. 49. 18 p. DOI: 10.3390/jmmp3020049.
15. Kragić, I. M., Perišić, S., Vućina, D., & Curković, M. Superimposed RBF and B-spline parametric surface for reverse engineering applications. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2019, iss. 1, pp. 17-35. DOI: 10.3233/ICA-190611.
16. Balasubramanian, M. P., Vignesh, R., & Rajamani, R. Evaluation of Uncertainty in Angle Measurement performed on a Coordinate Measuring Machin. *Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization. Conference ICCAP 2021*, Chennai, 2021. 8 p. DOI: 10.4108/eai.7-12-2021.2314516.
17. Zha, J., Zhang, H., & Chen, Y. A strategy to evaluate and minimize parallelism errors of a rotor system in a precision rotary table. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, pp. 3641-3648. DOI: 10.1007/s00170-019-04828-2.
18. Sikulskiy, V., Boborykin, Yu., Vasilchenko, S., Pyankov, A., & Demenko, V. *Technology of airplane and helicopter manufacturing. Fundamentals of aircraft*

manufacturing. Kharkiv: National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», 2006. 206 p.

19. Kryvtsov, V. S., Vorobiov, Yu. A., Bukin, Yu. M., Dyachenko, Yu. V., Gorlov, O. K., Meshcheryakov, O. M., Mironov, S. Yu., Shipul, O. V., & Voronko, V. V. *Tekhnolohiia vyrobnytstva lital'nykh aparativ (skladal'no-montazhni roboty)* [Technology of Aircraft Production (Assembly and Installation Works)]. Khakov, National Aerospace University, Kharkiv Aviation Institute, 2009. 80 p. (In Ukrainian).

20. Sikulskiy, V., Shypul, O., Nikichanov, V., Kapinus, O., & Tryfonov, O. Algorithm for Selecting the Optimal Technology for Rapid Manufacturing and/or Repair of Parts. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2023*, Springer, Cham, 2024, pp. 25-39. DOI: 10.1007/978-3-031-61415-6_3.

21. ISO 286-1. *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1. Basis of tolerances, deviations and fits*. Geneva, ISO, 2010. 48 p.

22. ISO 286-2 *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2. Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts*. Geneva, ISO, 2010. 59 p.

23. Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Trevisan, F., Ambrosio, E. P., Manfredi, D. & Fino, P. Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 451–458. DOI: 10.1007/s00170-016-8759-y.

24. Maiorova, K., Sikulskiy, V., Vorobiov, I., Kapinus, O., & Knyr, A. Study of a Geometry Accuracy of the Bracket-Type Parts using Reverse Engineering and additive Manufacturing Technologies. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*, Springer: Cham, 2023, pp. 146–158. DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_13.

25. Lazarević, D., Nedić, B., Jović, S., Šarkoćević, Ž. & Blagojević M. Optical inspection of cutting parts by 3D scanning. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, vol. 531, article no. 121583. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121583.

26. Kondić, Ž., Tunjić, Đ., & Maglić, L. Tolerance Analysis of Mechanical Parts. *Tehnički glasnik*, 2020, vol. 14, iss. 3, pp. 265-272. DOI: 10.31803/tg-20200504092314.

Надійшла до редакції 08.10.2024, розглянута на редколегії 18.11.2024

COORDINATION IN PROTOTYPING HIGH-PRECISION COMPOSITE AVIATION PARTS WITH CONNECTORS AND JOINTS BASED ON REVERSE ENGINEERING

Valeriy Sikulskiy, Kateryna Maiorova, Iryna Voronko, Oleksandra Kapinus, Oleksandr Skyba

The **subject** of this article is the prototyping of complex high-precision aviation parts with connectors and joints, which is performed using reverse engineering methods. The focus is on ensuring geometric accuracy, which is critically important for the functionality and reliability of aviation equipment. This article analyzes methods for manufacturing parts, such as casting, machining on numerically controlled (CNC) machines, and additive manufacturing. The **goal** is to develop reverse engineering technology for high-precision parts that includes methods for minimizing geometric parameter errors of connectors and joints during prototype manufacturing. **Tasks**: analyze approaches to determining the accuracy of manufacturing parts and their joints; develop a method for calculating dimensional chains to assess errors in coordination of geometric parameters; compare the accuracy of the prototypes manufactured by casting and metal 3D printing; and propose methods to improve prototyping accuracy using a system of gauges and counter-gauges. The **methods** used are: the theory of dimensional chains for calculating errors; experimental analysis of casting and metal 3D printing processes to assess accuracy; development of technological operation schemes to ensure high joint precision. The following **results** were obtained: The accuracy of prototypes manufactured by additive manufacturing approaches was better than that of casting, but additional methods were required to reduce deviations. The system of gauges and counter-gauges allows for reducing joint alignment errors in the range of 0.121 to +0.121 mm, ensuring compliance with the technical requirements for aviation components. **Conclusions**: The scientific novelty of the work lies in the development of a methodology for determining and minimizing the coordination errors of parts, particularly connectors and joints, through the integration of a system of gauges and counter-gauges. The proposed methodology ensures precision manufacturing of complex aviation parts with connectors and joints. The results confirmed the feasibility of using additive manufacturing technologies for high-precision parts.

Keywords: reverse engineering; geometric accuracy; additive manufacturing; dimensional chains; connectors and joints of parts; system of gauges and counter-gauges; prototyping of aviation parts.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Воронько Ірина Олексіївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Капінус Олександра Олександрівна – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Скиба Олександр Сергійович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Valeriy Sikulskyi – Dr.Tech.Sc., Professor, Professor at the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.sikulskiy@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5944-4728.

Kateryna Maiorova – PhD, Docent, Head of the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kate.majorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791.

Iryna Voronko – PhD, Docent, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.voronko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-9689-6977.

Oleksandra Kapinus – PhD Student of the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.o.kapinus@khai.edu, ORCID: 0000-0002-0878-1900.

Oleksandr Skyba – PhD Student of the Aircraft Manufacturing Technologies Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.s.skyba@khai.edu, ORCID: 0009-0009-1255-2666.