

Міністерство освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»

МАЙОРОВА КАТЕРИНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 629.7.002.01:001.891(043)

НАУКОВІ ОСНОВИ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ ЗА УМОВИ
ОБМЕЖЕНОГО ЧАСУ

05.07.02 – проєктування, виробництво та випробування літальних апаратів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Харків – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Санін Анатолій Федорович,
Дніпровський національний університет
імені Олеса Гончара, декан фізико-технічного
факультету;

доктор технічних наук, професор
Гайдачук Олександр Віталійович,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
професор кафедри транспортних технологій;

доктор технічних наук, професор
Сорокін Володимир Федорович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри
автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Україна, 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17

Захист відбудеться «17» липня 2026 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04 у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Із дисертацією можна ознайомитися на офіційному веб-сайті Університету та в науково-технічній бібліотеці Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» за адресою: 61070, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.062.04,
кандидат технічних наук, доцент



Олексій ПАВЛЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні сформувалася стала тенденція до використання авіаційних конструкцій (АК), які були виготовлені в зарубіжних країнах. Останнє зумовило відсутність конструкторської і технологічної документації, що ускладнює і уповільнює реалізацію поточних ремонтів і технічного обслуговування власними силами країни-експлуатанта. Водночас у ризикових умовах війни оперативне повернення техніки до робочого стану стає пріоритетним за повного відновлення її ресурсу або суворого дотримання заводських регламентів. Це змушує країну-експлуатанта самостійно і якомога швидше виготовляти деталі, вузли та складальні одиниці (СО) АК для забезпечення автономного циклу обслуговування. Технологія реверс-інжинірингу (РІ), на відміну від традиційних методів із застосуванням ручних інструментів (штангенциркулів, мікрометрів, калібрів тощо), контрольно-вимірювальних приладів або контактних вимірювань на координатно-вимірювальній машині (КВМ), не призводить до довготривалості процесу, а завдяки використанню мобільних 3D-сканерів дає змогу «зняти» геометрію пошкодженого вузла безпосередньо на передовій або в польовому ангарі. Створену цифрову модель, як першоджерело інформації, можна миттєво відправити на 3D-принтер або верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК), що дасть змогу виготовляти деталі-прототипи за лічені години замість тижнів очікування поставок. Як наслідок, за необхідності швидкого прототипування деталей АК в умовах обмежених за часом їх виробництва технологія РІ стає незамінною.

Отже, використання РІ вирішує два завдання формоутворення: пряме – створення першоджерела інформації деталі АК і безпосереднє виготовлення за ним реального зразка; зворотнє – контроль цього зразка шляхом порівняння його оригінальної геометрії з відповідною геометрією установленого першоджерела інформації. Реалізація зворотного завдання РІ починається зі сканування оригінального зразка і створення єдиної «хмари точок» (англ. point cloud) файлу формату «*.STL» (надалі – портрет). Відхилення портрета від першоджерела інформації деталі саме й відображає похибку формоутворення, що у свою чергу свідчить про точність виготовлення. Водночас портрет досліджуваної деталі АК містить інформацію про геометрію, використовуючи яку, можна побудувати 3D-модель з поновленням втрачених елементів для пошкоджених або зношених деталей у тому числі, що у свою чергу, дає змогу створити єдине першоджерело інформації такої деталі, тобто її аналітичний еталон (АЕ).

Таким чином технологія РІ реалізується в такій послідовності: сканування деталі та опрацювання її портрета; опис моделі процесів і функцій деталі; створення АЕ деталі; створення 3D-моделі для вибраної технології виготовлення деталі або створення 3D-моделі і її перетворення в файл формату «*.STL» для виготовлення деталі 3D-друком або на верстаті ЧПК виготовлення деталі. Фактично відбувається перетворення отриманого з деталі портрета на еталонний портрет геометричної точності з «нульовими відхиленнями». З цього виходить, що стає достатнім використання портрета, геометрія якого уточнена і прийнята, в якості першоджерела інформації для прототипування деталі за адитивними або екстрактивними технологіями з одночасним забезпеченням вимог точності виготовленої деталі.

Надалі метод РІ з повним циклом утворення АЕ названо звичайним, а метод РІ, що дає змогу прототипувати деталі виключно з отриманого й доопрацьованого портрета (еталонного), оминаючи етапи зі створення АЕ, – сталим реверс-інжинірингом (англ. Sustainable reverse engineering). У такому разі звичайний РІ забезпечує відтворення першоджерела інформації з «нульовими відхиленнями», тоді як для сталого РІ така гарантія відсутня.

Водночас трендом наукомісткої техніки, наприклад складнопрофільних і опукло-вгнутих авіаційних деталей АК, є безперервне підвищення вимог до точності їх виготовлення за умов мінімізації витрат часу на виробництво переважно завдяки забезпеченню створення точної цифрової моделі. Вочевидь, саме у разі використання сталого РІ можна досягти меншої трудомісткості процесу й часу на виробництво деталей АК. Однак відкритим залишається питання щодо забезпечення точності виготовленої деталі АК за еталонним портретом. Це й зумовило необхідність розроблення науково обґрунтованих методів, підходів і моделей, які дають змогу поєднувати високу точність створення цифрових моделей, як першоджерела інформації і виготовлення АК із мінімізацією тривалості технічної та технологічної підготовки виробництва (ТПВ), що й визначило актуальність докторської дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за планами науково-дослідних робіт університету. В основу підготовки й подання дисертації покладено матеріали досліджень, виконаних авторкою в межах реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України, у яких авторка брала участь, як відповідальний виконавець: «Конвергенційна технологія суперфінішного оброблення деталей з наноповірхнями для підвищення ресурсу агрегатів та виробів аерокосмічної і військової галузей» (№ ДР 0122U000847); «Створення унікального центру високих технологій для стратегічних галузей промисловості України» (Програма «Горизонт 2020») (№ ДР 0124U004666); «Каталогізація цифрових макетів і двійників БПЛА країни-агресора для онтологічного інжинірингу авіаційних комплексів і систем розвідки» (№ ДР 0125U001922); як керівник: «Технологічні системи виробництва та відновлювального ремонту об'єктів і складових частин військової техніки, наданої іноземними партнерами або трофейної, для вирішення проблем імпортозаміщення та зміцнення обороноздатності України» (№ ДР 0123U102001), а також у межах господарчого договору №104/16-2021 від 13.09.2021 «Вдосконалення методу створення складових частин та технологічного оснащення для легких гелікоптерів з використанням технології реінжинірингу» (№ ДР 0121U114431).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення наукових основ виробництва авіаційних конструкцій із забезпеченням заданих показників точності та технологічності в умовах обмеженого часу із застосуванням методів реверс-інжинірингу.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз існуючих методів прототипування опукло-вгнутих і складнопрофільних деталей та вузлів авіаційної техніки і провести порівняльний аналіз технологічних особливостей застосовуваних процесів (сканування, КВМ, фотограмметрія тощо) за умови обмеженого часу виробництва.

2. Розробити методику вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту авіаційних деталей, що забезпечує умови мінімізації трудомісткості та часу виготовлення з урахуванням точності та програми випуску.

3. Теоретично дослідити процес швидкого прототипування деталей складних форм скануванням і обробленням отриманих файлів, а також вивчити раціональні методи побудови моделей (послідовність і прийоми побудови сталим та звичайним PI) для отримання уніфікованих форм поверхонь деталей.

4. Розробити процеси та пристрої для прототипування деталей, вузлів та стиків авіаційних конструкцій із жорсткими вимогами точності.

5. Провести експериментальні дослідження швидкого процесу прототипування, формоутворення 3D-моделей деталей та вузлів складних форм авіаційних конструкцій і розробити технологічні рекомендації щодо виконання процесу.

Об'єкт дослідження – процеси технічної підготовки виробництва авіаційних конструкцій із використанням технологій реверс-інжинірингу в умовах обмеженого часу.

Предмет дослідження – методи, закономірності та моделі процесів інтеграції реверс-інжинірингу у виробництво авіаційних конструкцій в умовах обмеженого часу.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано комплекс взаємопов'язаних методів дослідження. Для аналізу існуючих методів прототипування: методи системного аналізу та науково-технічний огляд сучасних технологій прототипування; експертно-аналітичні методи для визначення обмежень і переваг методів в умовах дефіциту часу; методи багатокритеріального порівняння за показниками точності, трудомісткості та тривалості процесів. Для теоретичного дослідження швидкого прототипування та побудови моделей: методи теоретичного аналізу та узагальнення процесів 3D-сканування і оброблення «хмар точок»; методи геометричного та параметричного моделювання; аналітичні методи опису похибок формоутворення. Для розроблення методу вибору раціональної технології: алгоритмічні методи формування правил вибору технологій залежно від точності та програми випуску. Для розроблення процесів і пристроїв прототипування: методи інженерного проектування та конструювання технологічних процесів і пристроїв; методи комп'ютерного моделювання (CAD/CAE) для перевірки працездатності технічних рішень. Для проведення експериментальних досліджень: експериментально-статистичні методи дослідження процесів швидкого прототипування; методи планування експерименту; методи метрологічного контролю та вимірювань геометричних параметрів і якості поверхні; методи статистичної обробки результатів експериментів; методи валідації та верифікації моделей за результатами експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі проведено комплекс досліджень, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми, яка полягає в необхідності прискореного виробництва в умовах жорстких обмежень із забезпеченням заданих показників точності та технологічності шляхом створення науково обґрунтованих методів і моделей реверс-інжинірингу авіаційних конструкцій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. **Уперше розроблено** науково обґрунтований підхід до вибору ефективного методу реверс-інжинірингу складних за формою деталей, вузлів і агрегатів авіаційних конструкцій, який ґрунтується на запропонованій класифікації ознак зазначених деталей, вузлів і агрегатів. Такий підхід дає змогу враховувати трудомісткість робіт зі створення першоджерела інформації та показники точності.

2. На основі зазначеного підходу до вибору ефективного методу реверс-інжинірингу й вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту деталей залежно від обсягу партії та вимог до точності **удосконалено** метод формоутворення деталей і складальних одиниць авіаційних конструкцій, який, на відміну від відомих методів, комплексно враховує технології штампування, адитивного виробництва, високошвидкісного оброблення на верстатах із ЧПК штампованої заготовки або фрезерування плити, а також забезпечує підвищення точності віртуального базування цифрових портретів дослідних деталей авіаційних конструкцій.

3. **Уперше** запропоновано та науково обґрунтовано спосіб реконструкції опукло-вгнутої геометрії великогабаритних деталей авіаційних конструкцій з установленням параметрів допустимих відхилень, який полягає в послідовному скануванні спряжених поверхонь із маркуванням за характерними геометричними ознаками з наступним обробленням отриманих портретів.

4. На основі зазначеного способу **вдосконалено** метод прототипування великогабаритних деталей авіаційних конструкцій, який, на відміну від існуючих, дає змогу виготовляти такі деталі за еталонним портретом, отриманим сталим реверс-інжинірингом, з попереднім випробуванням і контролем еталонних портретів на пропорційно зменшених дослідних зразках.

5. **Набула подальшого розвитку** технологія реверс-інжинірингу завдяки впровадженню безплазового ув'язування форм і розмірів на основі запропонованої моделі з використанням сучасних лазерних засобів, що підвищує точність складання та зменшує похибки контурів складальних одиниць авіаційних конструкцій. Така модель ув'язування однорідних складальних одиниць авіаційних конструкцій забезпечує скорочення термінів технологічної підготовки виробництва, підвищення точності прототипування та продовження життєвого циклу виробу.

6. **Розвинено** технологію виготовлення великогабаритних панелей авіаційних конструкцій, що потребує багатоетапного процесу формування. Для цього запропоновано використовувати автоматизоване формування таких панелей із поетапним контролем і коригуванням параметрів технологічного процесу за результатами порівняння еталонної геометрії панелі з її портретом у режимі реального часу.

Практичне значення отриманих результатів. Практичну цінність дисертаційної роботи становлять такі основні результати.

1. Для забезпечення науково обґрунтованих вимог щодо точності виготовлення деталі авіаційної конструкції під час прототипування за умови обмеженого часу запропоновано використовувати сталий метод реверс-інжинірингу з урахуванням того, що допуск форми поверхні становить більше $\pm 0,5$ мм на виготовлену деталь, допускається мати складну геометрію з радіусами скруглення від 0,5 мм, перемичками і зміною діаметрів циліндричних поверхонь «сходінками», діаметрами

отворів, більшими за 5 мм, і завглибшки не більше діаметра отвору, а також із кутами від 30° і відсутністю різьби.

2. За запропонованим підходом щодо визначення раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей авіаційних конструкцій під час їх прототипування рекомендовано таке. В умовах дрібносерійного виробництва деталей малих і середніх розмірів із допуском форми більше $\pm 0,5$ мм обґрунтованим є вибір технології штампування. За допуску форми менше $\pm 0,5$ мм в умовах того ж виробництва доцільно використовувати верстати із ЧПК або високошвидкісне оброблення штампованої заготовки або фрезерування плити на верстаті із ЧПК. В умовах одиничного виробництва та допуску форми понад $\pm 0,5$ мм рекомендовано використовувати 3D-друк із подальшим ручним зачищенням, а за допуску форми менше ніж $\pm 0,5$ мм – верстати із ЧПК або високошвидкісне оброблення під час фрезерування плити або штампованої заготовки.

3. Уперше для зменшення тривалості виробництва під час прототипування великогабаритних опукло-вгнутих деталей авіаційних конструкцій випробувано еталонний портрет як першоджерело інформації за методом сталого реверс-інжинірингу на прикладі лопаті турбіни насосної атомної гідроелектростанції. Запропоновано здійснювати попереднє випробування на пропорційно зменшених зразках таких деталей за даними еталонного портрета шляхом виготовлення адитивним або екстрактивним способом. Це дає змогу встановити як коректність призначених допусків на виготовлення деталі, так і обрати технологію виготовлення. Окрім цього визначено й рекомендовано значення параметрів допустимих відхилень форми деталей авіаційних конструкцій під час їх прототипування за методами реверс-інжинірингу.

4. Для збільшення точності виготовлення деталей авіаційних конструкцій високої точності з роз'ємами та стиками запропоновано модель ув'язування отворів плоского і просторового стиків, у тому числі за допомогою системи калібрів та контркалибрів із використанням спеціального пристосування. Їх використання дають змогу зменшити похибки розмірів стиків до $\pm 0,121$ мм. Розроблено та запропоновано верстатне пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу високої точності.

5. Удосконалено технологію формування великогабаритної панелі авіаційної конструкції, а саме панелі подвійної кривизни з плоскої заготовки з ребрами жорсткості. На відміну від раніше застосовуваних підходів запропоновано здійснювати поетапний контроль формування таких заготовок шляхом порівняння даних отриманого портрета заготовки (за зовнішнім контуром) з АЕ панелі та коригуванням наступних навантажень формування панелі з використанням програмного модуля в режимі реального часу. Це дає змогу підвищити ефективність роботи на дільницях з використанням CAD/CAM-технологій через повну автоматизацію процесу формування.

Результати дисертаційної роботи прийнято для впровадження у виробництво на ТОВ «ХМЗ «ФЕД» і АТ «АНТОНОВ». Створено науково-технічну базу, яка використовується для виконання науково-дослідних робіт і підготовки фахівців у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» (ХАІ). Наукові здобутки, отримані під час виконання дисертаційної роботи, стали

основою для плідної співпраці в наукових дослідженнях між ХАІ та Університетом Йилдирим Баязид в Анкарі (Ankara Yıldırım Beyazıt University).

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що авторкою самостійно було створено новий інструментарій вирішення науково-технічної проблеми, яка полягає у необхідності створення науково обґрунтованих методів і моделей реверс-інжинірингу авіаційних конструкцій (АК), спрямованих на виробництво в умовах жорстких обмежень із забезпеченням необхідного рівня точності та технологічності конструкцій, сформульовано мету й завдання дослідження, обґрунтовано загальну концепцію роботи, узагальнено результати дослідження, отримано нові наукові результати й положення, подані на захист.

В усіх роботах, виконаних у співавторстві, авторці належать формулювання мети досліджень, розроблення інструментарію дослідження, оброблення результатів, обговорення й формулювання висновків, а саме: удосконалено метод ремонту складових частин авіаційної техніки з полімерних композиційних матеріалів з експлуатаційними пошкодженнями шляхом установа залежностей геометричних і міцнісних параметрів дефектної зони [1, 21, 26]; розроблено алгоритм процесів формоутворення для виготовлення деталей АК під час технологічної підготовки виробництва з формуванням вимог до інформаційного супроводу [2, 19, 28]; визначено три необхідні умови для коректної постановки задачі формоутворення та введено поняття кромки як «лінія перетину двох поверхонь» деталі [3, 20, 31]; на основі теоретико-імовірнісного методу запропоновано оцінення трудомісткості виконання робіт зі створення АЕ під час вирішення прямого та зворотного завдань, а також розроблено математичні моделі розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ АК [4]; запропоновано систему калібрів і контркалибрів за даними АЕ для збільшення точності прототипування деталей роз'ємів і стиків АК [5]; експериментально досліджено геометричну точність зубчастого колеса на координатно-вимірювальній машині [6]; розроблено класифікатор авіаційних деталей та конструкцій, що підлягають виробництву або ремонту за РІ [7, 25]; удосконалено методологію контролю геометричної точності деталі складної форми (зубчастого колеса) та надано рекомендації щодо вдосконалення національної метрологічної інфраструктури [8]; надано рекомендації з впровадження та реалізації завдань формоутворення складно-профільних деталей на основі РІ у виробництві АК [9, 29]; запропоновано технологію з контролю і створення цифрової моделі деталі, а за нею – форми для виготовлення [10]; розроблено модель формування геометричної точності та шорсткості отворів під час їх свердління [11, 14, 33]; виконано розрахунки трудомісткості під час вирішення прямих і зворотних завдань формоутворення деталей АК із застосуванням РІ [12, 32]; запропоновано й випробувано принципову схему автоматизованого формування інтегральних панелей з керуванням форми за допомогою 3D-сканування, в якій реалізується зворотне завдання формоутворення як операції контролю [13, 22, 34]; створено нову методологію прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення, зменшення трудомісткості та термінів ТПВ [15, 35]; розроблено шляхи реалізації технології реверс-інжинірингу в існуюче налагоджене виробництво [16, 18]; розроблено інформаційні та технологічні системи супроводу життєвого циклу виробів АК під час вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення [17];

розроблено спосіб реконструкції опукло-вгнутих об'єктів щодо відтворення геометрії поверхонь деталі в «хмари точок» [36]; реалізовано РІ з наступним контролем виготовленої 3D-друком авіаційної деталі [23, 27]; удосконалено метод віртуального базування заготовки для оброблення на верстаті із ЧПК, що підвищує її точність виготовлення [24]; створено метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей АК при їх прототипуванні за РІ залежно від кількості (об'єму партії) та вимог допуску на точність деталей АК [30].

Робота [7] виконана без співавторства.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, розділи й результати роботи викладено й обговорено на наукових семінарах кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (м. Харків, Україна, 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019» (м. Херсон, Україна, 2019); I Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 60-річчю КЛК ХНУВС (м. Кременчук, Україна, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтеграція фундаментальних та прикладних наук у парадигмі постіндустріального суспільства «ЛОГОΣ»» (м. Барселона, Іспанія, 2020); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми та перспективи розвитку наукових досліджень» (м. Орлеан, Франція, 2021); I Міжнародної наукової конференції «Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень» (м. Харків, Україна, 2023); IV Міжнародній науково-теоретичній конференції «Передові відкриття сучасної науки: досвід, підходи та інновації» (м. Амстердам, Нідерланди, 2023 р.); VI Міжнародній науковій конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття» (м. Черкаси, Україна, 2023 р.); II Міжнародній науковій конференції «Актуальні питання розвитку галузей науки» (м. Чернігів, Україна, 2023 р.); XXX Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми науки і техніки – від теорії до практики» (м. Берн, Швейцарія 2024 р.). Доповіді на міжнародних конференціях, *матеріали яких індексуються базою Scopus: International Scientific and Technical Conferences on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering ICTM'2021, ICTM'2022, ICTM'2023, ICTM'2024* (м. Харків, Україна, 2021, 2022, 2023, 2024 pp.); 10th International Conference «New technologies, development and application» NT-2024 (м. Сараєво, Боснія і Герцеговина, 2024); 15th, 17th International Conferences on Mathematical Modeling and Simulation of Systems MODS'2023 (м. Чернігів, Україна, 2023); International Conference on Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems – IEMS-2025 (м. Запоріжжя, Україна, 2025).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 статтях, у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 7 статтях у наукових періодичних, виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, і в зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних *Web of Science Core Collection та/або Scopus*, з них 2 статті Q2, 5 статей Q3; 1 монографія, а також подано в 17 матеріалах конференцій, з них

8 проіндексовано в базі даних *Scopus*, 5 доповідей в Іспанії, Франції, Нідерландах і Швейцарії та отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки.

Повний обсяг дисертації становить 332 сторінки, у тому числі основного тексту 288 сторінок, 131 рисунок, 23 таблиці, список використаних джерел із 257 найменувань на 32 сторінках, 3 додатки на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано актуальність теми дисертації, мету й основні завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами, відзначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, наведено інформацію про апробацію та публікації результатів дисертації, структуру й обсяг роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи на основі порівняльного аналізу існуючих методів прототипування складних за формою деталей та вузлів АК і порівняльного аналізу технологічних особливостей застосовуваних процесів (сканування, вимірювання на координатно-вимірювальній машині (КВМ) тощо) визначено перспективи методів реверс-інжинірингу (PI) для різних груп деталей і складальних одиниць (СО) авіаційних конструкцій (АК), а також етапи побудови електронних моделей для їх швидкого виготовлення. Сучасне обладнання, що використовується за технологією PI, дає змогу відтворити геометрію АК майже з точністю до 0,01 мм, а наявність аналітичного еталона (АЕ) в автоматизованих системах CAD/CAM/CAE виключає необхідність матеріальних витрат на додаткове виготовлення шаблонної оснастки. Якщо є АЕ дослідного об'єкта, то це спрощує контроль на базі технологій PI скануванням дослідного об'єкта та порівнянням отриманого портрета з АЕ. За такою технологією можна лише визначити геометрію та форму дослідного об'єкта, але не зрозуміло, чи є вони достатніми для забезпечення адекватності контролю. Цей факт обґрунтовує доцільність проведення досліджень у цьому напрямку. Отже, метод PI визначається способом отримання тривимірної моделі – АЕ, як першоджерела ув'язування і визначення технології з подальшим виготовленням деталі.

Зростаюча складність конструктивних елементів об'єктів аерокосмічної галузі призвела до однозначності зв'язку якості із забезпеченням точності розмірів та форм певних деталей конструкції. Точність формоутворення диктується умовами роботи деталі у виробі. Сучасні потужні й високошвидкісні машини не можуть ефективно функціонувати за недостатньої точності виготовлення їх складових частин (деталей і складальних одиниць). Виготовлення реальної деталі означає необхідність оцінювання її відповідності еталону, тобто АЕ. Виконання цієї процедури потребує формування моделі геометрії реальної деталі або її фрагмента, тобто створення «хмари точок» (англ. point cloud), що називається «портретом». Відхилення портрета від еталонного зразка (3D-моделі деталі) саме й відображає похибку формоутворення. Прийнято розрізняти чотири види відхилень від заданої – еталонної геометричної форми поверхні: макровідхилення, хвилястість, субшорсткість і шорсткість. Остання входить до опису АЕ досліджуваної деталі АК та впливає на результати точності

контролю.

Методи аналізу технологічних процесів і конструкцій виробів нині базуються на описі об'ємів і поверхонь як основних елементів об'єктів виробництва. Уявлення про кромку, як об'єкт, що входить до математичної моделі деталі, виникає при моделюванні технологічного процесу оброблення деталей. Складність процесу формування кромки в АЕ полягає в тому, що вона є результатом перетину двох теоретичних поверхонь і має бути описана лінією. При перетині реальних поверхонь виходить реальна кромка деталі, що вже є не лінією, а перехідною поверхнею, до того ж складної геометричної форми. Тому кромку можна визначити як поверхню, що сполучає дві поверхні, які перетинаються та є дотичними до неї. Розміри й мікрорельєф кромки залежать від застосовуваних методів формоутворення та можливостей устаткування, від послідовності виконання технологічних операцій. Крім того, на кромці «акумуляються» дефекти поверхонь, які перетинаються, що зумовлені крайовими ефектами під час їх механічного оброблення. Тому необхідно враховувати також вплив якості сполучуваних поверхонь. Далеко не завжди є можливим забезпечити необхідну якість кромки лезовим обробленням, що особливо актуально для деталей зі складними внутрішніми й зовнішніми поверхнями, наприклад такими, як корпуси гідравлічних агрегатів, лопатки турбін, компресорів тощо. Отже, кромка утворена перетином поверхонь, які мають свою шорсткість і субшорсткість. У цьому разі можна навести такі можливі випадки утворення кромки, а саме: симетрично ортогональні, симетрично паралельні, паралельно ортогональні, ортогонально косі, симетрично косі, асиметрично косі (рисунок 1).

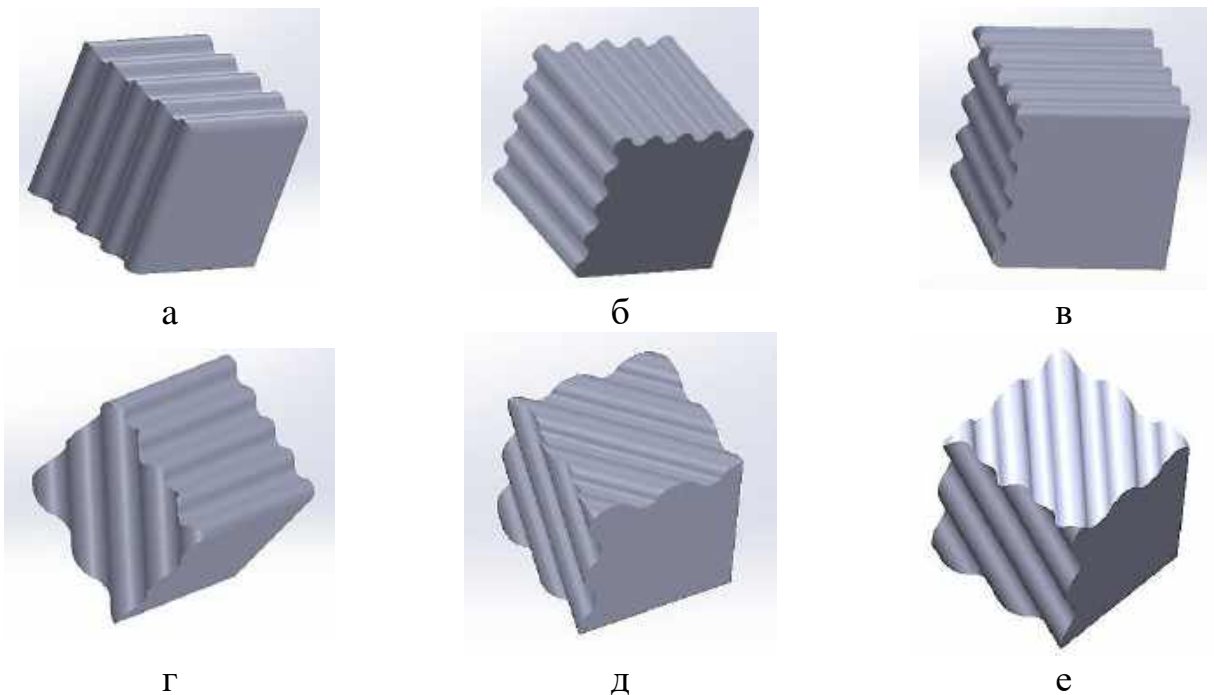


Рисунок 1 – Формування кромки за різних напрямків мікронерівностей ортогональних поверхонь, що симетрично перетинаються (а), симетрично паралельних (б), паралельно ортогональних (в), ортогонально косих (г), симетрично косих (д) і асиметрично косих (е)

Залежно від напрямку шорсткості на площинах, що перетинаються, лінія їх

перетину (кромка), матиме різні форми в просторі, а також низку відмінних характеристик. На рисунку 1, а і б показано напрямки шорсткості двох площин, що перетинаються, які мають величини шорсткості R_{a1} і R_{a2} (рисунок 2). Величина шорсткості кромки R_a^k матиме мінімальне значення при нульовому значенні R_{a2} . Відповідно, величина шорсткості кромки R_a^k буде мінімальною за нульового значення R_{a1} .

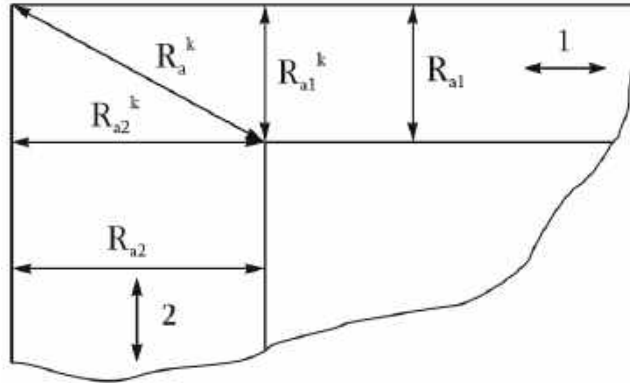


Рисунок 2 – Розташування полів шорсткості поверхонь, що перетинаються, і шорсткість кромки за симетрично ортогонального розташування шорсткості поверхонь

Величина шорсткості кромки R_a^k буде максимальною при максимальних значеннях шорсткості поверхонь R_{a1} і R_{a2} . Максимальну величину шорсткості кромки можна визначити за формулою:

$$(R_a^k)^2 = R_{a1}^2 + R_{a2}^2. \quad (1)$$

Виведені залежності для величин шорсткості кромки наведено в таблиці 1, де R_a^k – шорсткість кромки; R_{min}^k – мінімальний радіус заокруглення кромки.

Таблиця 1 – Основні характеристики кромки залежно від напрямку шорсткості поверхонь

Напрямок шорсткості поверхонь	Шорсткість кромки R_a^k	Мінімальний радіус заокруглення кромки R_{min}^k
Ортогональні поверхні, що симетрично перетинаються	$\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$	$3,5R_{a \max}$
Симетрично паралельні	$R_{a \max}$	$1,5R_{a \max}$
Паралельно ортогональні	$R_{a \max}$	$2,0R_{a \max}$
Ортогонально косі	$\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$	$3,5R_{a \max}$
Симетрично косі	$\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$	$2,0R_{a \max}$
Асиметрично косі	$\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$	$2,0R_{a \max}$

Таким чином, напрямок шорсткості на поверхнях, що утворюють кромку, впливає на величину шорсткості кромки. Тоді шорсткість кромки й мінімальний радіус кромки більшою мірою визначаються поверхнею з гіршою шорсткістю.

Аналіз результатів досліджень щодо забезпечення вимог до мікрорельєфу поверхневого шару під час механічного оброблення дав змогу зробити висновок про помітний вплив дотримання умов і технології виготовлення. Так саме, дотримання умов і технології виготовлення деталі АТ згідно з її 3D-моделлю (за даними АЕ) в умовах машинобудівного виробництва є необхідною умовою забезпечення якості деталей, яка дає змогу вирішити пряме та зворотне завдання РІ.

Пряме завдання формоутворення реалізує процес перетворення заготовки на деталь за інформацією про її АЕ на вибраному устаткуванні за допомогою інструменту стандартної форми. Під час вирішення зворотного завдання формоутворення необхідно встановити відповідність виготовленої деталі її АЕ в межах виконання операцій контролю, що містить оцінювання лінійно-кутових параметрів деталі, стану її поверхневого шару (мікрорельєфу і промислової чистоти). Завдання вирішується у два етапи: перший – отримання 3D-моделі реальної деталі або її портрета, другий – порівняння двох моделей: еталонної і портрета. Отже, коректність вирішення прямого та зворотного завдань, аналіз їх результатів є необхідною умовою забезпечення якості деталей. Варто звернути увагу на те, що багато підприємств-виробників розділяють технічну підготовку виробництва та безпосередньо виробництво АК, завдяки чому виправдовується думка про «нетрудозатратність створення АЕ». У будь-якому разі використання інформації у вигляді АЕ створює можливість для вирішення великої кількості завдань з обслуговування формоутворювальних систем, розроблення матеріальних і трудових нормативів технічної підготовки виробництва, впровадження технологічних процесів, нормалізації та уніфікації засобів технологічного оснащення (ЗТО), модернізації обладнання. Треба зазначити, що в сучасному світі технологію РІ успішно застосовують під час виготовлення АК, що підтверджено безліччю публікацій, проте практично немає кількісних характеристик, що характеризують створення АЕ.

Оцінювання реалізації РІ під час вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення за умови обмеженого часу виконано за результатами розрахунків трудомісткості виконання робіт зі створення АЕ АО на прикладі складальної одиниці (СО) – стабілізатора гелікоптера – при технічній підготовці виробництва. У цьому випадку було враховано, що складання (збирання) стабілізатора гелікоптера виконується в складальному пристосуванні з базуванням від каркаса. Нормування трудомісткості операцій реалізовано за методом експертного оцінювання. Для розрахунку трудомісткості зворотного завдання формоутворення за умови застосування РІ була розроблена операційна технологія технічної підготовки виробництва та нормовано операції для стабілізатора гелікоптера. Розрахунки показали, що загальна трудомісткість створення СО стабілізатора гелікоптера при вирішенні зворотного завдання в 1,5 раза менша, ніж під час створення тієї самої СО вирішенням прямого завдання. Якщо порівнювати розрахункову трудомісткість формування АЕ за прямим і зворотним завданнями, то в останньому випадку АЕ може бути виконано в 3,7 раза швидше, ніж під час вирішення прямого завдання.

Питання скорочення тривалості технічної підготовки виробництва деталей АК залишаються актуальними в науковому співтоваристві, що підтверджує значний обсяг проаналізованої літератури на цю тему. Багато авторів пропонують ефективні способи досягнення цього результату на різних етапах технічної підготовки виробництва, розглядаючи питання з різних позицій, проте аспект впливу РІ на цей процес залишається маловивченим. Безпосередньо технологію РІ нерідко розглядають в аспекті зниження трудомісткості в межах того чи іншого окремого процесу, наприклад на етапі контролю деталей. Проте її вплив на технічну й технологічну підготовку виробництва загалом не розглянуто досі. Тож пропонується не тільки ефективний спосіб упровадження актуальних технологій у процес ремонту та модернізації вже наявної АК з використанням методів РІ, а й напрямки конкретних досліджень з розрахунками точності, яку реально отримати при технічній і технологічній підготовці виробництва та виробництві досліджуваних деталей, СО АК. Отже, метою дисертаційної роботи є розроблення наукових основ виробництва АК із забезпеченням заданих показників точності та технологічності в умовах обмеженого часу із застосуванням методів РІ при утворенні основ нового інструментарію вирішення науково-технічної проблеми, яка полягає в необхідності прискореного виробництва в умовах жорстких обмежень із забезпеченням необхідного рівня точності та технологічності шляхом створення науково обґрунтованих методів і моделей РІ АК.

Основні наукові результати, наведені в першому розділі, опубліковано в працях автора [1, 7, 12, 17, 18, 21, 25, 26, 27, 28, 29].

Другий розділ роботи присвячено розробленню теоретичних основ створення деталі АК на базі методів РІ за умови обмеженого часу.

Ключовим моментом сучасного виробництва є перехід від дискретного до електронного опису виробу, тобто до створення АЕ АК. Проте в цьому випадку є складність узгодження існуючої технологічної підготовки виробництва (ТПВ) (особливо це стосується АК, які було виготовлено понад 20 років тому) із сучасними конструктивними й технологічними рішеннями відповідно до створеної нової модифікації, прототипування або ремонту. Для вирішення цієї проблеми на допомогу прийшли технології РІ, як комплекс методів, технологій і устаткування для реалізації схеми «ідея-макет-виріб» на відміну від звичайної для інженера схеми «ідея-креслення-виріб».

Під час вирішення прямого завдання формоутворення опис деталі як об'єкта виробництва починався з опису АЕ деталі (AE_D), що містив такі типи моделей: еталонну модель геометрії поверхні та допусків макровідхилень (EM_G); еталонну модель геометрії кромки деталі та допусків їх відхилень (EM_{Kp}); еталонні моделі мікрорельєфу поверхні деталі (шорсткість, хвилястість) та її кромки (EM_{Mikp}); еталонні моделі властивостей (густина матеріалу, твердість, тип покриття; зносостійкість тощо) деталі, її поверхонь та кромки (EM_B); еталонні моделі промислової чистоти (ПЧ) поверхні та кромки деталі ($EM_{Пч}$). Моделі покриттів, твердості поверхні, шорсткості та допусків побудовано на базі EM_G , що так само створено за допомогою топологічних операцій CAD-системи з окремих об'ємів (Solid) та/або поверхонь (Surface). У цьому випадку трудомісткість внесення інформації під час формування моделей є незначною порівняно з тривалістю

побудови EM_T . Застосування таких підходів дало змогу реалізувати використання на робочих місцях виробничих підрозділів AE_D замість креслень. Зазначимо, що скорочення трудомісткості залежало від кратності застосування AE_D у процесі супроводу процесів виготовлення та експлуатації виробу.

Після виготовлення деталі було оцінено рівень її відповідності еталону – реалізовано контроль. Для виконання цієї процедури побудовано дві моделі: модель еталона й модель деталі. Остання описувала реальну деталь, тобто була її портретом. Таким чином, портретом геометрії деталі PP_D була аналітична модель, побудована за результатами вимірювань, що описує форму й розміри реальної деталі або її фрагмента в системі координат AE_D . Для реалізації процедур контролю деталі її портрет містив такі моделі: портрет геометрії поверхонь (PP_n); портрет геометрії країв ($PP_{кр}$); портрети геометрії мікрорельєфу деталі (шорсткість, хвилястість) та її кромки ($PP_{Мікр}$); портрети властивостей (густина матеріалу, твердість, тип покриттів; зносостійкість тощо) деталі, її поверхонь та кромки (PP_B); портрети поверхневої чистоти (ПЧ) поверхні та кромки деталі ($PP_{ПЧ}$). Для опису виробництва АК було створено укрупнену модель процесів формоутворення (таблиця 2).

Таблиця 2 – Укрупнена модель процесів формоутворення АК на стадії ТПВ

Аналітичні еталони:				
заготовок	деталей	складального комплекту	складеного виробу	формоутворювального оснащення
1 AE_3	2 AE_D	3 $AE_{КОМП}$	4 $AE_{СВ}$	5 $AE_{ФО}$
Процеси формоутворення:				
заготовок	деталей	складального комплекту	складеного виробу	оснащення
6 MP_3	7 MP_D	8 $MP_{СВ}$		9 MP_O
Процеси вимірювань:				
заготовок	деталей	покупних виробів	складеного виробу	оснащення
10 $MP_{В3}$	11 $MP_{ВД}$	12 $MP_{ВПВ}$	13 $MP_{ВСВ}$	14 $MP_{ВО}$
Аналітичні портрети:				
заготовок	деталей	покупних виробів	складеного виробу	оснащення
15 P_3	16 P_D	17 $P_{ПВ}$	18 $P_{СВ}$	19 P_O
Виконання процедур контролю:				
20 порівняння P_3 та AE_3	21 порівняння P_D та AE_D	22 порівняння $P_{ПВ}$ та $AE_{КОМП}$	23 порівняння $P_{СВ}$ та $AE_{СВ}$	24 порівняння P_O та AE_O
27 рішення щодо якості заготовок	28 рішення щодо якості деталей	29 рішення щодо якості покупних виробів	30 рішення щодо якості складеного виробу	31 рішення щодо якості оснащення

У вищезазначеній моделі прийнято таке. Модель 1 – аналітичний еталон заготовки AE_3 постачання матеріалу та доведення його до стану заготовок, що є обов'язковою умовою початку процесів. Модель 2 – аналітичний еталон деталі (AE_D), відповідно до якого йде формоутворення AE_3 з метою виготовлення деталей. Модель 3 – комплектація деталей перед складанням, що завершується формуванням складальних комплектів, куди входять усі деталі та вузли після технологічного контролю цеху виробника та номенклатура від зовнішніх організацій, що описується аналітичним еталоном комплекту $AE_{КОМП}$. За застосування клепальних автоматів попереднє складання комплектів агрегатів виконується в спрощених складальних пристосуваннях. Виконання складальних операцій шляхом зміни форми з'єднувальних елементів (у ручному або автоматичному режимі), їх завершення означає закінчення формоутворення згідно з технологічними процесами складання об'єкта виробництва та описується аналітичним еталоном складеного виробу $AE_{СВ}$ – модель 4. На першому етапі пряме завдання формоутворення зводиться до отримання заготовок за наявними AE_3 . Для реалізації цього завдання вибираються обладнання, інструмент, спосіб кріплення матеріалу в стані постачання та розробляються моделі процесу отримання заготовок $МП_3$ – модель 6. Закінчення виконання $МП_3$ означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотнє завдання формоутворення – за результатами вимірювань будують аналітичні портрети заготовок $П_3$ – модель 15. Модель 20 – реалізація процедур контролю, де виконано порівняння моделей 15 і 1, тобто портрету $П_3$ і аналітичного еталону AE_3 :

$$|F(AE_3) - F(П_3)| \leq F(\Delta), \quad (2)$$

де $F(AE_3)$ – визначальні параметри AE_3 ; $F(П_3)$ – визначальні параметри портретів заготовок; $F(\Delta)$ – допустимі похибки визначальних параметрів.

Позитивні результати виконання умови (2) означають завершення вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення (модель 27) на цьому етапі.

На другому етапі пряме завдання формоутворення передбачає виготовлення деталей за інформацією з AE_D (модель 2). Для реалізації цього завдання вибирається обладнання, інструмент, спосіб кріплення заготовок та розробляються моделі процесу одержання деталей $МП_D$ – модель 7. Якщо як обладнання обрано верстат із ЧПК, то моделі процесів містять керувальні програми. Закінчення виконання моделей процесу означає вирішення прямого завдання формоутворення деталей. Потім необхідно вирішити зворотнє завдання формоутворення для виконання контрольних операцій. Якщо під час виготовлення деталей використовувалося обладнання із ЧПК, то раціонально виконати на цьому обладнанні вимірювальні процедури, замінивши формоутворювальний інструмент вимірювальним. Для виконання процедур вимірювання необхідно розробити відповідні моделі процесів вимірювання деталей $МП_{ВД}$ – модель 11. За результатами вимірювань будують аналітичні портрети деталей $П_D$ – модель 16. Модель 21 – реалізація процедури контролю виготовленої деталі шляхом порівняння даних моделей 2 і 16, тобто портрету $П_D$ і аналітичного еталону деталі AE_D :

$$|F(AE_D) - F(П_D)| \leq F(\Delta), \quad (3)$$

де $F(AE_D)$ – визначальні параметри AE_D ; 9

$F(\Pi_d)$ – визначальні параметри портретів деталей.

Третій етап не передбачав вирішення прямого завдання формоутворення за інформацією $AE_{КОМП}$ (модель 3), оскільки всі деталі виготовлено з виконанням процедур контролю. Для цього етапу передбачено вирішення зворотного завдання формоутворення щодо проведення контрольних операцій для покупних виробів (модель 22) за умовою (3), що дає змогу прийняти рішення про якість покупних виробів перед їх складанням (процедура 29).

На четвертому етапі метою прямого завдання формоутворення стало створення аналітичного еталона складеного виробу AE_{CB} – модель 4. Для реалізації цього завдання вибирають складальні пристрої та інструмент, після чого створюють модель складеного виробу $МП_{CB}$ – модель 8. Закінчення складання означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотне завдання – отримання аналітичного портрету складеного виробу та виконання процедур порівняння. Для виконання вимірювальних процедур необхідно розробити відповідні моделі процесів вимірювання $МП_{BCB}$ – модель 13. За результатами вимірювань будується аналітичний портрет складеного виробу Π_{CB} – модель 18. Модель 23 – процедура контролю шляхом порівняння моделей 4 і 18, тобто портрету Π_{CB} і аналітичного еталону складеного виробу AE_{CB} :

$$|F(AE_{CB}) - F(\Pi_{CB})| \leq F(\Delta), \quad (4)$$

де $F(AE_{CB})$ – визначальні параметри AE_{CB} ; $F(\Pi_{CB})$ – визначальні параметри Π_{CB} .

Виконання умови (4) означає, що вирішення завдання формоутворення на етапі складання виробу (процедура 30) успішно завершено. Якщо потрібно вирішити пряме завдання формоутворення шляхом складання об'єкта виробництва, то крім аналітичного еталона AE_{CB} для розроблення моделі процесу складання $МП_{CB}$ (модель 8) необхідно мати аналітичні зразки геометрії складального оснащення AE_O (модель 5).

Доведено, що вирішальну роль для скорочення термінів під час ТПВ АК відіграють процеси формоутворення, які реалізовано шляхом вирішення прямих та зворотних завдань на базі АЕ, як носія повної інформації про виріб (табл. 2). Складність ТПВ АК полягає в створенні коректного АЕ для всіх учасників виробничого процесу, від якого залежить взаємозв'язок конструкторських і технологічних етапів ТПВ. Показано, що зниження термінів загальної трудомісткості ТПВ АК є можливим саме шляхом використання єдиного АЕ для будь-яких алгоритмів при вирішенні прямих і зворотних завдань.

Аналіз таблиці 2 показав, що за необхідності прототипування деталей АК в умовах обмеженого часу етапи щодо створення АЕ потребують додаткового часу й затримують процеси визначення технології і виготовлення. Авторкою запропоновано працювати саме з отриманими портретами від 3D-сканування. Такі задачі не досліджувалися з погляду оптимізації процесів за мінімумом часу й достатньою точністю отримання результатів.

Уведено поняття двох методів РІ: сталого – виготовлення деталі за отриманим портретом («хмарою точок»), що було доопрацьовано і вибрано як еталонний; звичайного, що поєднує всі етапи до створення АЕ включно.

Досліджено приклади застосування сталого й звичайного РІ на складній за

формою деталі АК – корпусу рульової машини (рис. 3, 4 і 5) за умов забезпечення заданої точності з визначенням часу для кожного методу. Визначено 8 годин різниці за часом на користь сталого РІ, тобто трудомісткість робіт сталого РІ є меншою, ніж звичайного РІ. Доведено, що за умов допуску $\pm 0,5$ мм доцільним є використання звичайного РІ, а при більших за $\pm 0,5$ мм, – сталого РІ.

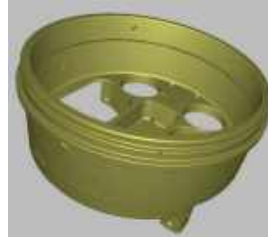


а

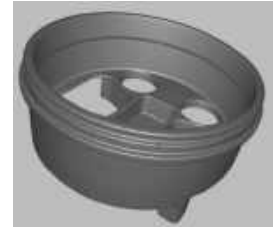


б

Рисунок 3 – Корпус рульової машини АК: а – внутрішній бік; б – зовнішній бік



а

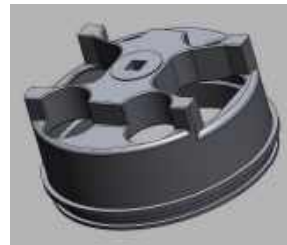


б

Рисунок 4 – Портрет корпусу рульової машини АК: а – реальний; б – еталонний



а



б

Рисунок 5 – Готовий АЕ корпусу рульової машини АК: а – з одного боку; б – з іншого

Розроблено метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту за умови обмеженого часу. Виявлено, що для деталей у кількості понад 10 шт. в умовах дрібносерійного виробництва (до 100 шт.) та точності більше $\pm 0,5$ мм обґрунтованим є використання технології штампування. За тією ж кількістю деталей, але точності менше $\pm 0,5$ мм, доцільно буде використовувати ЧПК або високошвидкісне оброблення (ВШО) штампованої заготовки або фрезерування плити на верстаті з ЧПК або ВШО. При кількості деталей менше 10 шт. та точності більше ніж $\pm 0,5$ мм рекомендовано використання 3D-принтера з подальшим ручним зачищенням. При тій же кількості деталей, але точності менше ніж $\pm 0,5$ мм доцільно застосовувати верстат з ЧПК або ВШО при фрезеруванні плити або штампованої заготовки.

Розрахунками доведено, що загальна трудомісткість операцій створення АЕ деталі становила 18 люд.-год. Час на підготовку до друку і безпосередньо друк дослідної деталі становив [+2; +15] люд.-год. За необхідності виконання фінішних операцій трудомісткість робіт становила [+4; +3] люд.-год, а загальна трудомісткість робіт з урахуванням усіх етапів РІ – [+27; +17] люд.-год. При задовільній якості надрукованої деталі як такої, де не потрібні фінішні операції, загальна трудомісткість має найменші показники – [+25; +18,5] люд.-год.

Зазначено, що на показники трудомісткості суттєво впливає необхідність виконання фінішних операцій з оброблення поверхонь, кромek тощо. Слід зауважити, що тривалість штампування заготовки в штампі порівняно з друком різко відрізнялася: зокрема, для друкування досліджуваної деталі потрібно 1–1,5 години, а для штампування в штампі не більше 30 с. Загальна трудомісткість робіт з урахуванням РІ для виготовлення дослідної деталі штампуванням становила [+45; +38] люд.-год, що в 1,8 раза більше ніж при виготовленні такої ж деталі 3D-друком.

При задовільній якості відштампованої деталі, коли можна знехтувати фінішними операціями зачистки, загальна трудомісткість несуттєво зменшувалася та становила [+44; +37,5] люд.-год.

Основні наукові результати, наведені в другому розділі, опубліковано в працях авторки [2, 3, 4, 18, 20, 24, 30].

Третій розділ роботи присвячено розробленню основ процесу формоутворення частково зруйнованих, пошкоджених або зношених деталей АО опукло-вгнутих форм методами РІ в умовах швидкого виробництва.

Доведено, що геометрична точність виготовленої деталі АО має відповідати вимогам до конструктивних допусків і до виготовлення згідно з умовами роботи деталі в АК. Визначено параметри допустимих відхилень геометрії деталі, що виготовлена або за портретом або за АЕ як першоджерел інформації.

Тобто у випадку, коли відсутні вказівки щодо допустимих відхилень форми та розташування поверхонь ці відхилення обмежуються полем допуску на розмір, що визначаються за відповідними довідниковими даними машинобудівної галузі. Останнє було використано під час апробації нової методології прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення. Вибрано досліджувану деталь – лопать турбіни насосної атомної гідроелектростанції (рисунок б).

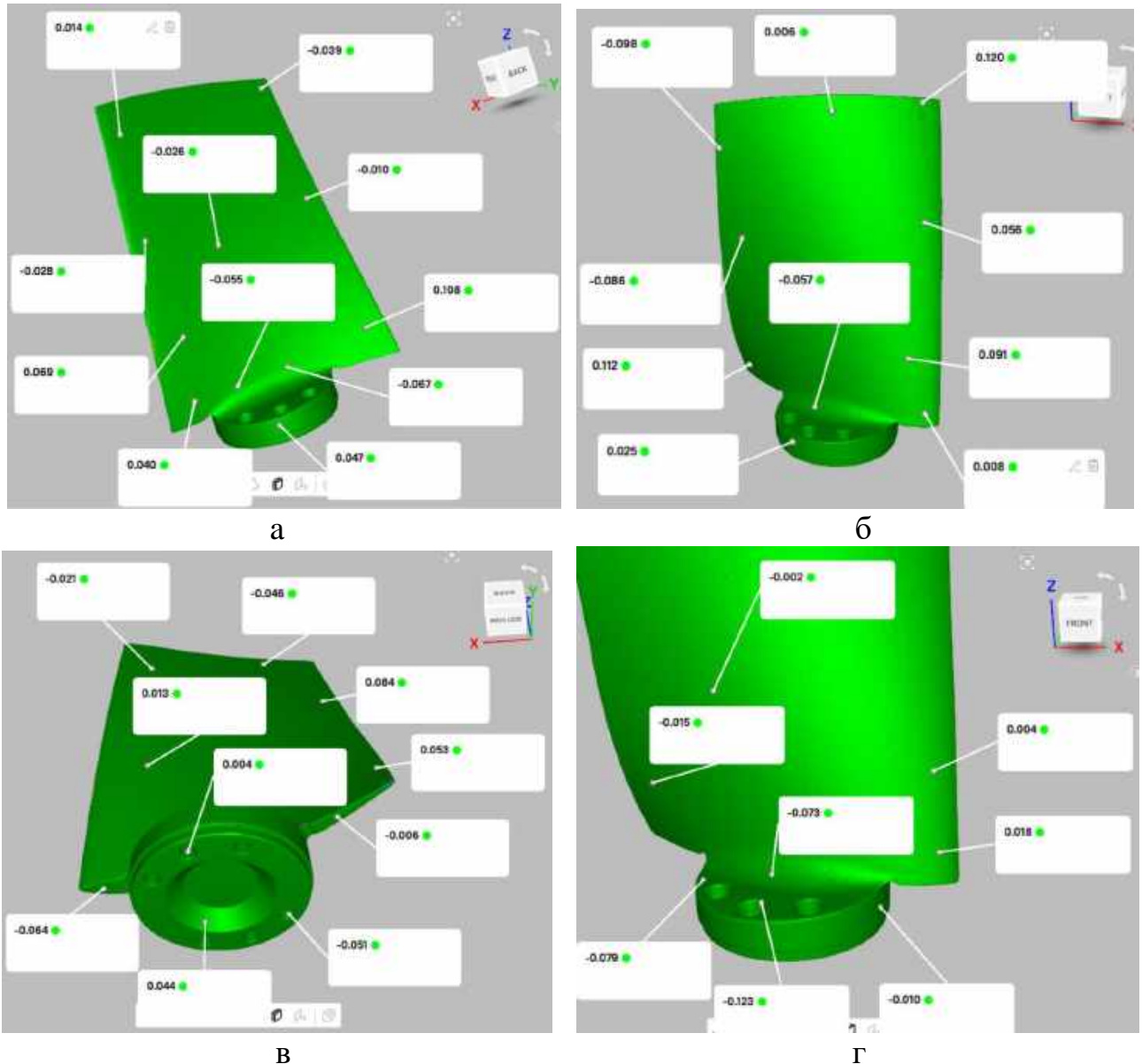


а – з одного боку; б – з іншого боку; в – зверху
Рисунок б – Лопать дослідної деталі

Гіпотеза дослідження полягала в припущенні, що контроль геометричної точності доопрацьованого (надалі – еталонного) портрета можна виконати за отриманим портретом із виготовленої досліджуваної деталі, яку було надруковано за

адитивними технологіями. При цьому для деталей великих розмірів така апробація можлива на пропорційно зменшених розмірах еталонного портрета за умови визначення допуску на номінальний розмір надрукованого зменшеного зразка. Зменшення є необхідним для мінімізації використання матеріалу на пробні зразки під час підбору режимів друку, шарів укладання пластику для забезпечення кутів і радіусів заокруглень тощо. Було прийнято рішення реалізувати 3D-друк зразка лопаті в зменшеному розмірі за файлом ідеального портрета. Відсоток зменшення файлу форматом «*.STL» вибирали з огляду на можливості 3D-пристрою (CREATVOT F430) і конструктивно-технологічного аналізу досліджуваної лопаті.

Порівняння портретів наведено на рисунку 7.



а – з боку вгнутої поверхні; б – з боку опуклої поверхні;

в – в зонах отворів; г – в зоні перетину площин

Рисунок 7 – Контроль та порівняння портрета зразка лопаті у зменшеному форматі з еталонним

Таким чином, розміри зразка лопаті були пропорційно зменшені до 25 % від

оригінальних і становили 150x100,571x57,763 мм порівняно з натурними розмірами лопаті 640,632x429,527x246,698 мм.

Вважалося, що лопать виготовлена за 12-м квалітетом. Тоді для зразка лопаті у зменшеному розмірі (в 4 рази від оригіналу) допуск на виготовлену деталь становив $\pm 0,25$ мм і $\pm 0,6$ мм для оригінальних розмірів деталі (за даними таблиць 3 і 4). Контроль показав, що відхилення розмірів, визначених під час експериментальних досліджень зі скануванні зразка лопаті в зменшеному розмірі та порівняння з ідеальним зменшеним портретом становили від $-0,123$ до $+0,120$ мм і входили до визначеного поля допуску $\pm 0,25$ мм. Отже, визначений допуск на оригінальні розміри лопаті $\pm 0,6$ мм є правильним і теоретичні засади запропонованого методу прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення є достовірними.

Виконано ув'язування під час прототипування складних деталей АК високої точності з роз'ємами та стиками на основі РІ. Зазначимо, що використання сталого РІ для таких деталей АК є недоцільним, оскільки точність, яку маємо забезпечити, становить менше $\pm 0,5$ мм. Проте розрахунки відхилення контурів деталі-прототипу від деталі-оригіналу показали, що для лиття у форми вони становлять $\pm 0,42$ мм, а для процесів металевого 3D-друку – $\pm 0,457$ мм. Отримана точність виготовлення прототипу є неприйнятною, оскільки для виробів точної механіки (органів керування літальними апаратами) вона має бути у кілька разів вищою. Тому було запропоновано й розроблено систему калібрів і контркалибрів. Суть пропозиції наведено у вигляді схеми ув'язування стиків АК, що виготовляються методами адитивної технології (рисунок 8).

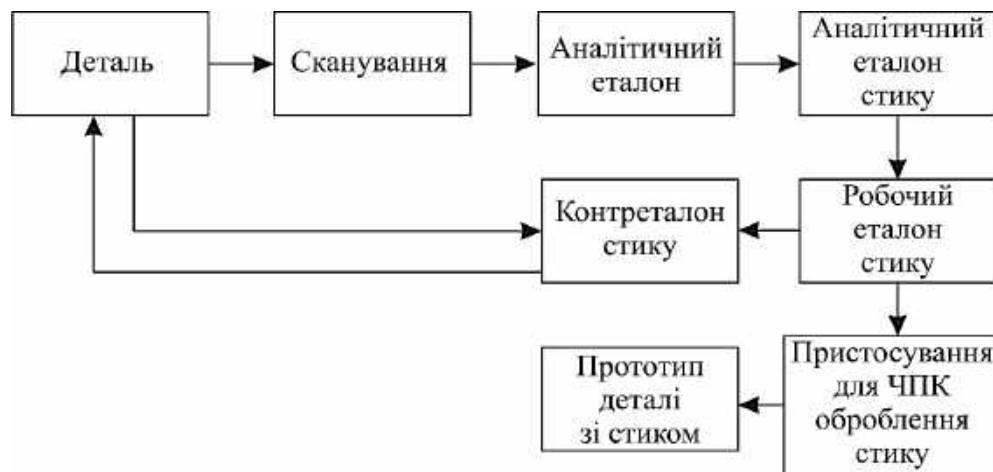


Рисунок 8 – Схема ув'язування при прототипуванні стиків деталей, що виготовляються методами адитивної технології

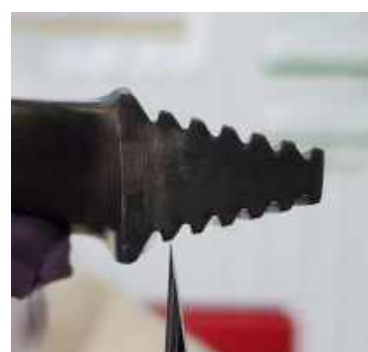
Відповідно до цієї схеми після сканування та створення АЕ в її структурі або окремо створюється АЕ стику, в якому може бути передбачено утворення контретапона, а саме відповідної частини, яка може стикуватися з деталлю, що розглядається. Після цього створюються фізичні елементи: робочий еталон та контретапон стику, який перевіряється на точність стикування з деталлю, що розглядається. У разі відповідності технічним умовам на стикування створюються пристосування для оброблення стиків на верстатах із ЧПК або кондукторні

пристосування для оброблення отворів у разі використання плоских стиків з отворами. Кількість пристосувань залежить від конструкції стику, його просторових елементів тощо.

Розраховані похибки ув'язування стиків деталі й деталі-прототипу за використання запропонованої технології, калібрів і контркалибрів становили $\pm 0,121$ мм, що в 3,78 раза менше ніж при використанні тільки 3D-сканування. Для оброблення стиків наведених деталей (рисунок 9) використовувалися пристосування, які були виготовлені методами перенесення розмірів із робочого еталона стику та пов'язаного з ним контреталона стику. Необхідна точність досягається завдяки використанню методу компенсації похибок видаленням вибраного припуску. Схему верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу показано на рисунку 10.

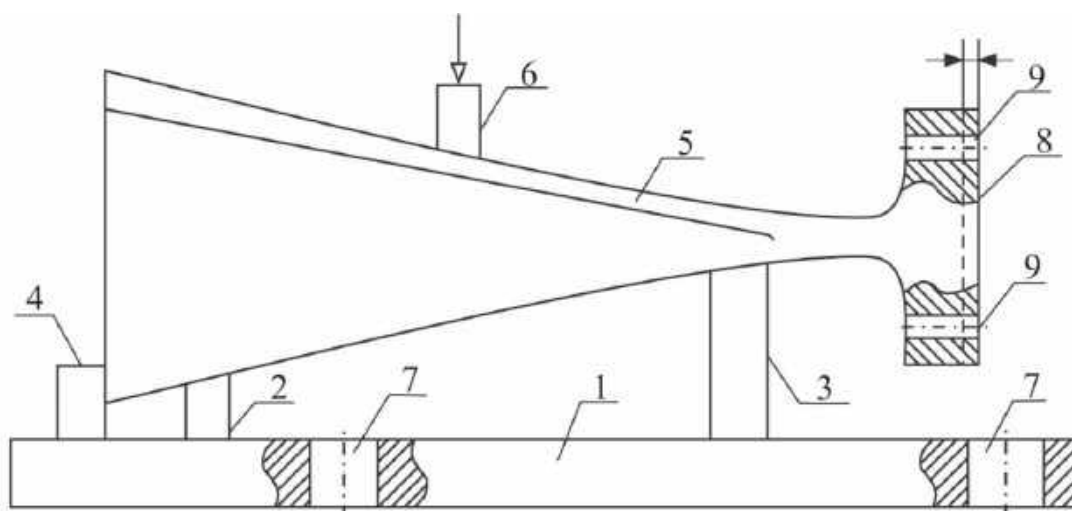


а



б

а – за допомогою плоского стику з отворами;
б – за допомогою просторового стику типу «замок»
Рисунок 9 – Варіанти кріплення лопатей



1 – основна плита; 2, 3 – ложементи; 4 – базовий упор; 5 – деталь;
6 – притискач; 7 – отвори на столі фрезерного верстату із ЧПК; 8 – припуск
для видалення (схематично); 9 – отвори стику

Рисунок 10 – Схема верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами лопаті-прототипу

На основній плиті 1 встановлено базові ложементи 2 і 3, базовий упор 4 положення деталі 5, що обробляється. Деталь займає незмінне положення завдяки дії притискача 6. Пристосування кріпиться на столі фрезерного верстата із ЧПК за допомогою отворів 7. Завданням фрезерної операції є оброблення стику в системі координат верстата видаленням припуску 8. Залежно від необхідної точності отвори стику 9 можуть бути виконані на верстаті із ЧПК або за кондукторною плитою. Для точного перенесення розмірів використовувалися процеси компенсації з використанням твердіючих сумішей і компенсаційних припусків. Запропоновану систему калібрів і контркалибрів перевірено практично на виробі лопатей турбін із різними стиковими вузлами й отримано позитивні результати за точністю, що задовольняли вимоги допусків на номінальні розміри.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [5, 15, 31, 32, 33, 35, 36].

У четвертому розділі роботи подано результати дослідження особливостей прототипування відсіків і агрегатів АК під час складально-монтажних робіт, а саме для стабілізатора (зовнішній контур) гелікоптера (рисунок 11), який раніше було виготовлено в стапелі з базуванням по поверхні каркаса і плазово-шаблонному методі ув'язування (ПШМ), на який втрачено документацію. Створено математичну модель (ММ) розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів і визначення похибок при його побудові. Така ММ урахувала всі похибки, що можуть виникати під час виготовлення та ув'язування контурів вузлів або агрегатів при ПШМ. Тому розроблено схему утворення відхилення дійсного положення контуру від теоретичного для каркаса стабілізатора (ескіз суміщених перерізів обводоутворювальних деталей каркаса стабілізатора та фіксаторів контуру в стапелі) (рис. 12).



Рисунок 11 – Дослідна авіаційна деталь зовнішнього контуру (стабілізатор)

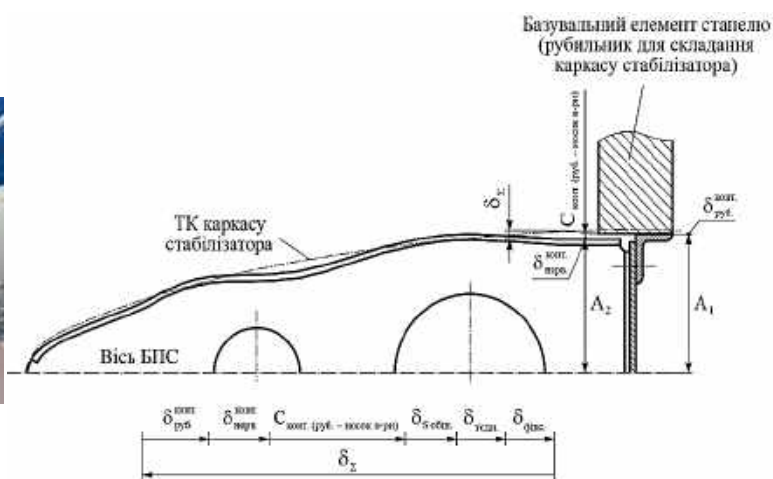


Рисунок 12 – Ескіз суміщених перерізів обводоутворювальних деталей каркаса стабілізатора та фіксатора контуру в стапелі

Складовими ланками основного розмірного ланцюга будуть: відстань між віссю будівельної площини стабілізатора (БПС) літака й віссю складального отвору СО в деталі 1 (A_1), відстань між контуром деталі 2 і віссю СО в цій деталі (A_2), товщина обшивки S (A_3). Величина відхилення дійсного положення контуру стабілізатора від теоретичного дорівнює похибці замикальної ланки A_Σ основного розмірного ланцюга,

що визначається за формулою:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{руб}^{конт} + \delta_{нерв}^{конт} + k_{\phi} C_{конт(руб-носок н-ри)} + \delta_{Собш} + \delta_{з'єдн} \quad (5)$$

де $\delta_{руб}^{конт}$ – похибка розміру A_1 монтажу фіксатора контуру (рубильника) стапеля складання каркаса стабілізатора;

$\delta_{нерв}^{конт}$ – похибка розміру A_2 , що виникає внаслідок неточності виготовлення нервюри носка стабілізатора;

$C_{конт(руб-носок н-ри)}$ – похибка ув'язування контурів рубильника та носіння нервюри, яка може бути зменшена шляхом використання притисків (ураховується коефіцієнтом фіксації k_{ϕ});

$\delta_{Собш}$ – похибка товщини обшивки, де відповідно до [9] товщина листа нормальної точності для виготовлення обшивки носка стабілізатора становить 1,2-0,15 мм, тобто $\delta_{Собш} = 0K - 0,15$ мм;

$\delta_{з'єдн}$ – похибка контуру стабілізатора, спричинена деформацією після виконання з'єднання, яка при складанні СО класифікаційної групи IX становить $\delta_{з'єдн} = (0,1K0,2)\delta_{\Sigma}$;

k_{ϕ} – коефіцієнт фіксації при складанні у стапелі, що дорівнює 0,394.

Для визначення значення похибок $\delta_{руб}^{конт}$, $\delta_{нерв}^{конт}$ і $C_{конт(руб-носок нервюри)}$ було побудовано допоміжні розмірні ланцюги, що врахували прийнятий метод ув'язування. Розрахунок точності складання стабілізатора та монтажу стапеля виконано з використанням ймовірнісного методу.

Граничні відхилення зовнішнього контуру носка нервюри становили:

$$\Delta_{в конт. нерв} = \Delta_{0 \Sigma нерв} + \frac{\delta_{\Sigma нерв}}{2} = 0,368 \text{ мм};$$

$$\Delta_{н конт. нерв} = \Delta_{0 \Sigma нерв} - \frac{\delta_{\Sigma нерв}}{2} = -0,068 \text{ мм}.$$

Граничні відхилення монтажу рубильника стапеля становили:

$$\Delta_{в конт. руб} = \Delta_{0 \Sigma руб} + \frac{\delta_{\Sigma руб}}{2} = 0,424 \text{ мм};$$

$$\Delta_{н конт. руб} = \Delta_{0 \Sigma руб} - \frac{\delta_{\Sigma руб}}{2} = -0,424 \text{ мм}.$$

Граничні відхилення похибки ув'язування контурів носка нервюри та фіксатора стапеля становили:

$$\Delta_{в C_{конт(руб-носок н-ри)}} = 1,08 \text{ мм} \text{ і } \Delta_{н C_{конт(руб-носок н-ри)}} = -0,78 \text{ мм}.$$

Тоді згідно з (5) величина відхилення дійсного положення контуру носка стабілізатора від теоретичного становила: $\delta_{\Sigma} = 1,4$ мм і $\delta_{н\Sigma} = -1,1$ мм. Зроблено висновок про те, що очікувана (розрахункова) похибка не перевищувала значення допуску на зовнішній контур стабілізатора ($[\delta_{стаб}] = \pm 2$ мм), тобто складання в стапелі з базуванням від поверхні каркаса за методом ув'язування ПШМ забезпечує задану геометричну точність. Наведені результати дадуть змогу оцінити під час технічної підготовки виробництва відхилення замкнутих контурів перерізів стабілізатора від еталонних перерізів, отриманих при складанні в стапелі з базуванням від поверхні каркаса при методі ув'язування ПШМ.

Наступним стало формування АЕ стабілізатора в такій послідовності: 3D-сканування та створення еталонного портрета геометрії стабілізатора (Π_{cm}); перевірка

P_{cm} і АЕ, а також правильності вибору методів виготовлення і методів ув'язування складових частин (СЧ) виробу та ЗТО.

Для оцінювання відповідності отриманих даних геометрії еталонного портрета стабілізатора вимогам до об'єкта виробництва виконано його оцифрування за контурами розташування нервюр. Як наслідок, було отримано аеродинамічні характеристики п'яти перерізів еталонного портрета, що виконано в програмі XFOIL і підібрано найближчий підходящий профіль НАСА 0012 (рисунок 13). При обчисленнях задано число Маха $M = 0$, число Рейнольдса $Re = 1000000$, критерій турбулентності потоку $n = 4$ (висока турбулентність). Також задано розрахунковий діапазон кутів атаки $-5...15^\circ$ та крок 1° . Виконано коригування і суміщення геометрії еталонного портрета стабілізатора P_{cm} із профілем НАСА 0012 за визначеними перерізами. АЕ стабілізатора подано на рисунку 14.

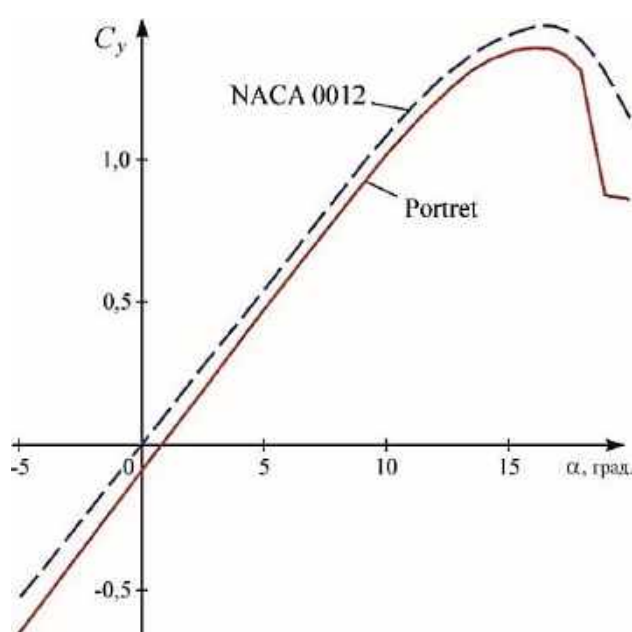


Рисунок 13 – Графік залежності коефіцієнта підйомної сили C_y від кута атаки теоретичного профілю НАСА 0012 і перерізу аналітичного портрета



Рисунок 14 – АЕ стабілізатора за профілем НАСА 0012

Виконано оцінювання коректності результатів РІ з побудови АЕ стабілізатора шляхом порівняння АЕ з P_{cm} з урахуванням визначених границь можливих відхилень контуру стабілізатора від свого еталона $\begin{pmatrix} +1,4 \\ -1,1 \end{pmatrix}$ мм, отриманих за результатами розрахунків побудованого технологічного ланцюга складальних операцій для ПШМ ув'язування. Аналіз результатів показав, що контури АЕ та P_{cm} лежать у полі похибок зовнішнього контуру стабілізатора під час складання в стапелі з базуванням від поверхні каркаса та ПШМ ув'язування.

Отримані у такий спосіб результати показали, що таку математичну модель розрахунку можна застосовувати для різних АО подібного типу й особливо з опукло-

вгнутими поверхнями. Технологія не потребує використання громіздкого коштовного обладнання, тому може бути досить швидко впроваджена у виробництво. Сканування для побудови АЕ виконується портативними сканерами та може застосовуватися як в ангарах, так і зовні, що спрощує роботу оператора з об'єктом. Аналіз аеродинамічних характеристик потребує лише наявності програми XFOIL або будь-якої аналогічної, тому процедура може виконуватися без ускладнень. Зазначимо, що для успішного практичного застосування на виробництві рекомендується спочатку проводити роботу з тестовим об'єктом для коригування показників.

Розроблено концепцію щодо ув'язування однорідних АО, отриманих за ПШМ, при використанні АЕ на базі РІ технології (рисунок 15).

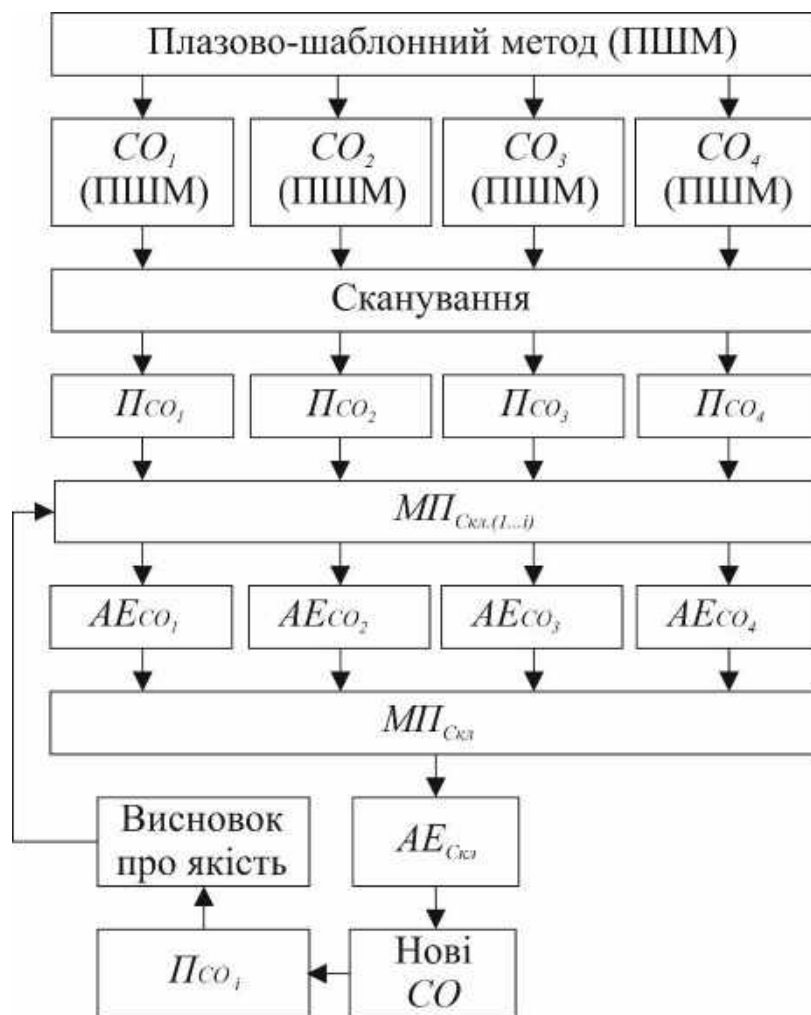


Рисунок 15 – Модель ув'язування однорідних АО, отриманих за ПШМ, за використання АЕ на базі РІ технології

використання методів компенсації розмірів під час складання. Такий $AECO_{Skl}$ дає змогу забезпечити створення складального пристосування для отримання нових СО, що задовольняють вимогам їх складання в конструкції, зібраній раніше з використанням ПШМ. Критерієм придатності АЕ тут може бути отримання портрета зібраного нового виробу й порівняння портрета з раніше отриманими носіями розмірів.

Зроблено висновки про те, що використання методу РІ для скорочення часу ТПВ нового виробу не дає істотного виграшу в часі. Використання методів РІ для

У цій моделі СО показано як представники однорідних виробів $CO_1 - CO_4$, отриманих з використанням ПШМ. Після сканування цих СО створюються їхні відповідні портрети Pco і далі на підставі моделі процесу $MPI_{Skl(1...i)}$ СО одержання відповідних АЕ. Процес отримання цих еталонів охоплює побудову триангуляційної моделі та базових поверхонь, формування, редагування та контроль моделі і, нарешті, побудову еталона. Далі за отриманими АЕ однорідних виробів будується узагальнений АЕ СО АК – $AECO_{Skl}$. Модель отримання цього узагальненого АЕ виробу містить умови забезпечення взаємозамінності й точності нових виробів. Для виконання цих умов можлива часткова зміна конструкції СО або

вирішення завдань у промисловості рекомендовано в разі ремонту АК, що потребує модернізації або конвертації для використання з новою якістю сервісу або за новим призначенням. Основні напрямки скорочення тривалості ТПВ згруповано в такій послідовності:

1. Широке використання методу зворотного проектування під час вирішення зворотних завдань технологічної підготовки.
2. Використання методу зворотного проектування під час контролю якості деталей і виробів гелікоптерного виробництва.
3. Застосування сканерів під час ремонту та конвертації гелікоптерів, виготовлених методами ПШМ.
4. Удосконалення організаційних форм технологічної підготовки виробництв.
5. Уніфікація, стандартизація та типізація технічних та організаційних рішень.
6. Відпрацювання конструкцій на технологічність під час конструкторської та технологічної підготовки виробництва.
7. Автоматизація та механізація інформаційного обслуговування всіх виконавців.
8. Автоматизація конструкторського й технологічного проектування.
9. Вибір найкращої схеми складання та ув'язки заготівельного і складального оснащення з використанням техніко-економічного аналізу.

Використання 3D-сканерів для вирішення зворотних завдань у промисловості рекомендовано в таких випадках:

- під час здійснення РІ виробів АК;
- для контролю якості виготовлення АК;
- під час ремонту та конвертації АК, виготовлених методами ПШМ;
- для оцифрування створеного вручну дизайн-макета АК, як основи для подальшого опрацювання;
- для виявлення, реєстрації та ідентифікації не задокументованих змін під час виготовлення дослідних зразків продукції;
- для виготовлення факсимільного пакування для готового виробу АК.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [10, 11, 14, 16, 18, 19, 23].

У п'ятому розділі подано практичну реалізацію використання результатів досліджень з РІ на АО складних форм (опукло-вгнутих) з розробленням програмного модуля автоматизованого формування монолітних панелей з керуванням їх формою методом прототипування, а також надано рекомендації щодо вирішення завдань формоутворення з використанням технології РІ під час ТПВ.

Реалізовано апробацію РІ на залізі кіля легкого літака, а саме: для контролю виготовленої деталі та заготівельно-технологічного оснащення (ЗТО) шляхом 3D-сканування й порівняння отриманого портрета з відповідним АЕ. Під час аналізу даних, наведених у сформованому звіті з програми Geomagic Control X, було виявлено наявність суттєвих похибок виготовлення залізу кіля легкого літака: максимальна похибка становила +5,39 мм – додатна і –5,26 мм – від'ємна. При цьому середні значення не були настільки критичними: +0,94 мм і –0,65 мм відповідно. Однак більш суттєву роль відіграла відносна площа залізу кіля, зайнята поверхнею, що

знаходиться за межами поля допуску: цей показник становив 85 %. Тобто майже весь заліз кіля мав великі відхилення від АЕ, за яким він виготовлений.

Результати контролю ЗТО за допомогою 3D-сканування показали ідентичність з результатами контролю, отриманими для залізу кіля, що свідчило про знос форми. Було запропоновано виготовити нове технологічне оснащення не зі склопластику, який широко використовується для таких АК у виробництві, а з органопластику. Основним критерієм вибору органопластику були більша міцність і менша маса порівняно зі склопластиком, а також відсутність відволожування.

Нове технологічне оснащення складалося з матриці та складеного пуансона, де їх формоутворювальні поверхні було побудовано на базі наявного АЕ залізу кіля (рисунок 16).



а



б



в



г

а – матриця (ізометрія); б – пуансон (ізометрія); в – матриця (формоутворювальна поверхня); г – пуансон (формоутворювальна поверхня)

Рисунок 16 – Технологічне оснащення для виготовлення залізу кіля

Діапазон похибок відхилень від АЕ залізу кіля, виготовленого за технологічним оснащенням з органопластику, визначено від $-0,51$ мм до $+0,34$ мм, а відносна площа залізу кіля, яка виходила за межі поля допуску, не перевищувала 15 %. Ці результати показали адекватність параметрів і ефективність прийнятого рішення щодо виготовлення ЗТО з нового матеріалу – органопластику. Отже, результатами апробації технології РІ для забезпечення заданої геометричної точності залізу кіля

легкого літака стало виготовлення нових ЗТО (матриці та пуансона) з іншого матеріалу (органопластику).

Розроблено програмний модуль автоматизованого формування монолітних панелей із контролем їх форми методом прототипування. У його основу покладено: формування послідовним ступінчастим методом із поетапним контролем КВМ і 3D-сканування; аналіз даних контролю (суміщення портрета з АЕ); розрахунок необхідних додаткових дій – коригування зусиль локального формування; виконання дій – формування панелі; контроль із наступною корекцією даних формування за необхідності (рисунок 17).

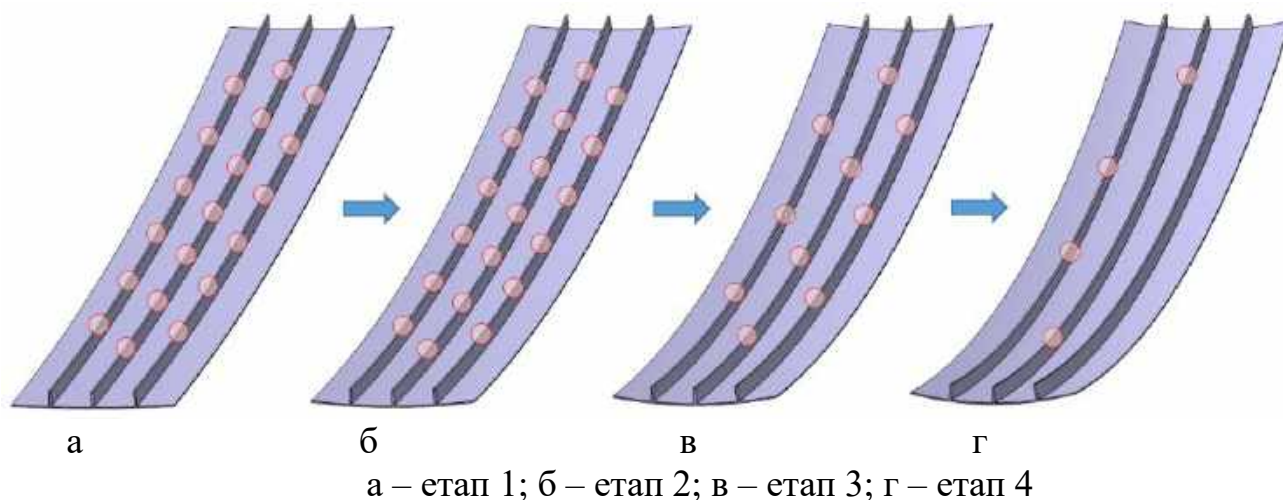
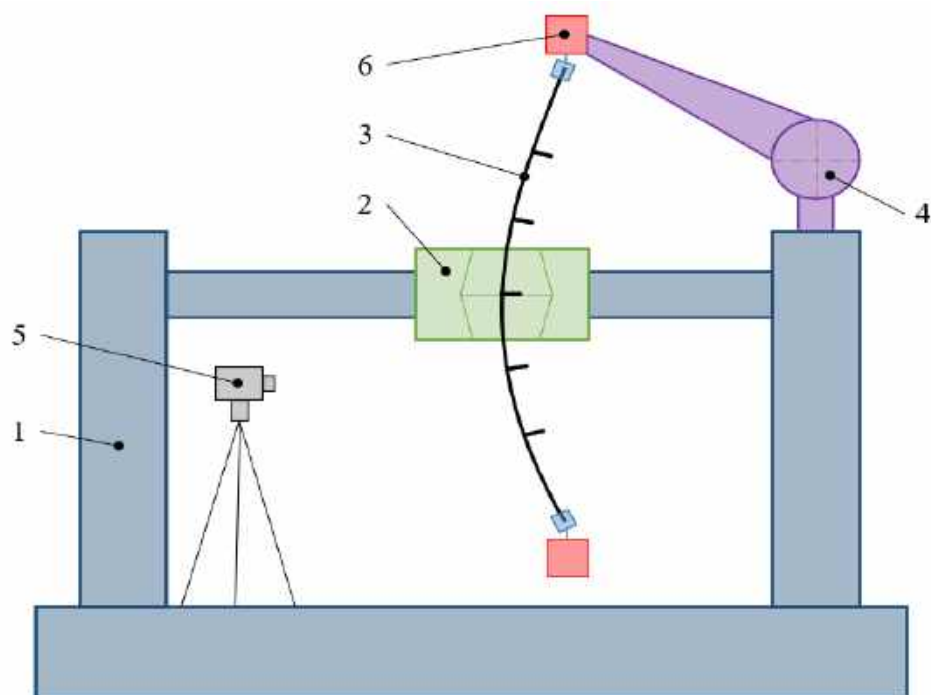


Рисунок 17 – Схема послідовного ступінчастого методу отримання панелі подвійної кривизни шляхом багатоточкової локальної деформації

Після завершення кожного етапу деформації будувалися цифрові портрети панелей $П_1, П_2, П_3, П_4$. Кожен портрет порівнювався з відповідним АЕ. Якщо відхилення в усіх контрольованих точках не перевищувало допустиме, відбувався перехід до наступного етапу. В іншому випадку виконувалися коригувальні дії, розраховані керувальною програмою.

У розглянутій задачі для побудови портретів було використано технологію лазерного сканування. На рисунку 18 подано принципову схему автоматизованого формування інтегральних панелей. Основним елементом цього процесу є пристрій 6, який встановлювався в руку робота-маніпулятора 4 для редагування та доопрацювання панелей 3 через розвідний пристрій 2. Призначення руки робота-маніпулятора 4 полягало в його розташуванні в потрібній точці на панелі по нормалі до дотичної площини в точці додавання певної дії на лицьовій поверхні панелі. Призначення опорного пристрою 6 полягало в тому, щоб виключити дію масових сил на пружну деформацію самої монолітної панелі. Для контролю форми рекомендовано використовувати об'ємні 3D-сканери 5, які дали змогу порівнювати отримані тривимірні аналоги з реальними об'ємними моделями в форматі стереолітографії (точкова дифузія у форматі «STL»). Зазначимо, що доступна на ринку лінійка 3D-сканерів дає змогу повністю оцифрувати великогабаритні інтегральні панелі з площею 50-100 м² за досить короткий час (6–10 годин) з високою точністю (5 ... 10 мкм).



1 – консольний прес; 2 – розвідний пристрій з вигином; 3 – деформувальна панель; 4 – роботизована рука з п'ятьма ступенями свободи; 5 – 3D-сканер;
6 – допоміжний пристрій

Рисунок 18 – Принципова схема автоматизованого формування інтегральних панелей із керуванням формою за допомогою 3D-сканера:

Відповідно до вихідних геометричних параметрів досліджуваної монолітної панелі (рисунок 19) було визначено положення панельної системи координат, а також розроблено схему взаємного зв'язку системи координат панелі з глобальною системою координат під час оброблення отриманих даних вимірювань.



Рисунок 19 – Зразок інтегральної панелі подвійної кривизни, що формується та контролюється за РІ

Як контрольні параметри використовувалися тільки відхилення точок реконструйованої поверхні від базової «хмари» точок. Кількість сегментів поверхні та їх черговість для кожного випадку будівництва система розраховувала автоматично. На рисунку 20 подано графічне порівняння портрета зовнішнього боку панелі з АЕ послідовного деформування на одному з етапів формування панелі.

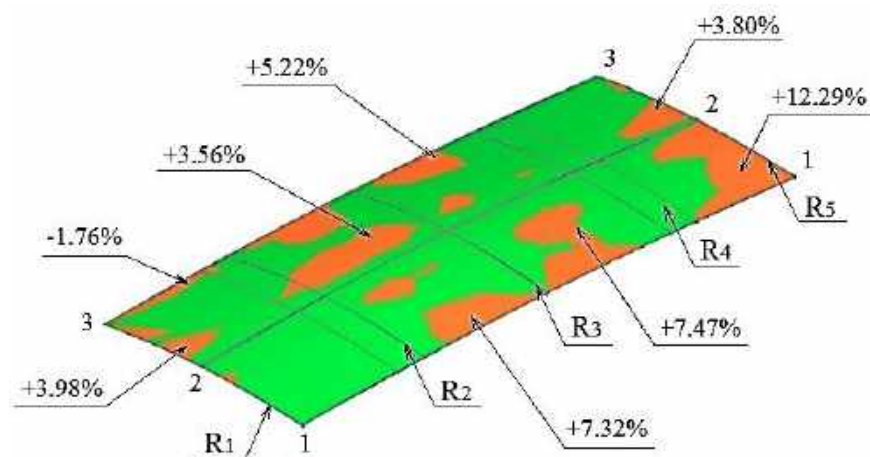


Рисунок 20 – Графічне порівняння портрета панелі з АЕ на одному з етапів її формування

Ділянки, які відрізняються від АЕ панелі в межах допуску, виділено зеленим кольором, тоді як ділянки панелі, які мають великі відхилення і потребують доопрацювання, виділено помаранчевим кольором. Видно, що найбільші відхилення спостерігаються на краях панелі, а скручування поверхні спостерігається на ділянці з найбільшим відхиленням (12,29 %). Розрахункові значення відхилень було отримано порівнянням заданих радіусів кривизни панелей і отриманих скануванням (таблиця 6). Для розрахункового методу було виміряно радіуси кривизни поперечних ($R_1...R_5$) і поздовжніх ($R_{1-1}...R_{3-3}$) перерізів панелей.

Таблиця 6 – Розрахунок відхилень портрета панелі з її АЕ

Параметр за отриманим портретом	Величина R за портретом, мм	Параметр за отриманим АЕ	Величина R за АЕ, мм	Відхилення, %
R_1	2160,70	R_{AE1}	2074,70	3,98
R_2	1671,20	R_{AE2}	1548,90	7,32
R_3	1437,20	R_{AE3}	1329,90	7,47
R_4	1636,50	R_{AE4}	1435,40	12,29
R_5	2074,90	R_{AE5}	1996,10	3,80
R_{1-1}	7438,90	R_{AE1-1}	7174,10	3,56
R_{2-2}	5175,80	R_{AE2-2}	4905,40	5,22
R_{3-3}	7172,00	R_{AE3-3}	7298,10	-1,76

Обчислені відхилення (таблиця 6) апроксимуються у відсоткових значеннях відхилень за радіусами контрольних ділянок досліджуваної панелі. Розподіл відхилень зумовлено появою сумарної похибки вимірювання, випадковою складовою якої є шум, що виникає при отриманні нових характеристик. Що стосується сканування, то ця панель має складну геометрію через свою однорідність, і найбільші труднощі виникають при порівнянні портретів під час сканування.

При апробації запропонованої технології формування інтегральної панелі було отримано такі результати: час формування панелей подвійної кривизни завдовжки

5,5 м і завширшки 1,1 м з контролем форми 3D-сканером становив 5–6 годин; час фінішного оброблення панелей становив 1–2 години. Зазначимо, що при формуванні допускалися відхилення 0,7 ... 0,9 мм від заданої поверхні, а після фінішної обробки форми – 0,3 ... 0,5 мм.

Отже, експериментальна верифікація запропонованої технології формування монолітних інтегральних панелей (див. рисунок 19), виконана з використанням автоматизованого комплексу (див. рисунок 18) показала адекватність теоретичних засад зазначеної технології.

Сформовано такі рекомендації щодо ефективного впровадження у виробництво методів формоутворення деталей АК з використанням РІ:

1. Провести аналіз наявних технологічних ланцюгів та виробничих процесів на предмет вузьких місць, де РІ зміг би підвищити продуктивність виробництва. Визначити тип продукції та деталей (зазвичай це криволінійні, складні вироби, які важко обміряти за допомогою стандартного вимірювального інструменту), для яких доцільно використовувати 3D-сканування та 3D-моделювання. Тобто слід визначити, де РІ дасть змогу скоротити час на проектування, ремонт та виготовлення деталей та/або виробу АО загалом. Останнє, у свою чергу, збільшить економічну ефективність.

2. Визначити «точку входу» РІ в процес (наприклад, ремонтні роботи, контроль, проектування оснастки тощо): опрацювати й створити технологічну послідовність, що містить вирішення прямих і зворотних завдань РІ, як показано на рисунку 5.15.

3. Після аналізу завдань РІ та КТР деталей (розмірів, точності, типів матеріалів тощо) необхідно підібрати обладнання для 3D-сканування (стаціонарні, портативні або ручні 3D-сканери), яке відповідало б вимогам виробництва до досліджуваної деталі та/або виробу АК.

Примітка. Досвід із РІ показує, що в більшості випадків, якщо номенклатура виробів велика й має дуже велику розбіжність у точності та розмірах, виробнику треба бути готовим до необхідного використання різних типів 3D-сканерів.

4. Необхідно вирішити, яке програмне забезпечення треба використовувати, щоб воно було сумісним з уже впровадженими САМ/САЕ-системами виробництва (наприклад, для операцій контролю – Artec Studio/PolyWorks/Geomagic Control X, для моделювання – Geomagic Design X/PowerShape тощо).

5. Після вибору обладнання та програмного забезпечення наступним кроком є навчання співробітників: інженерів-конструкторів (створення САД-моделей), технологів (аналіз і впровадження моделей у САМ), працівників відділу технічного контролю (ВТК) (контроль геометрії сканованих об'єктів).

6. Розробити інструкції з експлуатації обладнання та роботи з програмним забезпеченням.

7. Назначити відповідальних за збереження та архівацію 3D-даних.

8. Запровадити єдину структуру збереження сканів, STL- та інших САД-файлів, створити базу.

9. Визначити процедуру перевірки та затвердження 3D-моделей для використання у виробництві.

Основні наукові результати, наведені в п'ятому розділі, опубліковано в працях автора [6, 8, 9, 13, 22, 34].

ВИСНОВКИ

Результатом проведених у дисертаційній роботі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень є розроблені наукові основи виробництва авіаційних конструкцій із забезпеченням заданих показників точності та технологічності в умовах обмеженого часу із застосуванням методів реверс-інжинірингу. Ці основи полягають у створенні нового інструментарію вирішення науково-технічної проблеми в необхідності прискореного виробництва в умовах жорстких обмежень із забезпеченням необхідної точності та технологічності шляхом створення науково обґрунтованих методів і моделей реверс-інжинірингу авіаційних конструкцій.

Під час виконання поставлених завдань дослідження дисертаційної роботи отримано такі результати.

1. Розроблено науково обґрунтований класифікатор методів реверс-інжинірингу для прототипування опукло-вгнутих і складнопрофільних деталей та вузлів авіаційних конструкцій забезпечує обґрунтований вибір технології прототипування й вимірювального обладнання з урахуванням геометричної складності об'єкта, технічних можливостей сканерів і координатних засобів вимірювання, а також вимог до точності. Це дає змогу реалізувати безконтактне отримання високоточних полігональних моделей з точністю до 0,05 мм і підвищити достовірність відтворення кромки, що в сукупності підвищує ефективність і прогнозованість процесів прототипування.

2. Запропоновано підходи до формоутворення в процесі технологічної підготовки виробництва деталей і вузлів авіаційних конструкцій, що ґрунтуються на використанні аналітичного еталону, як першоджерела та носія повної інформації про виріб, забезпечують системну формалізацію процесів технологічної підготовки виробництва. Доведено, що застосування аналітичного еталону, як інформаційної основи для побудови моделей процесів авіаційних конструкцій та вирішення прямого і зворотного завдань формоутворення дає змогу суттєво скоротити терміни й загальну трудомісткість технологічної підготовки виробництва завдяки уніфікації вибору обладнання, інструменту, способів базування та вимірювальних процедур.

3. Дослідження підтвердили доцільність застосування методів реверс-інжинірингу для скорочення тривалості технологічної підготовки виробництва авіаційних конструкцій шляхом формалізованого вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення. Запропонований теоретико-імовірнісний підхід до оцінювання трудомісткості робіт зі створення аналітичного еталону дає змогу кількісно обґрунтувати ефективність технології реверс-інжинірингу. Доведено, що впровадження методів реверс-інжинірингу забезпечує суттєве зниження трудомісткості порівняно з традиційними шаблонними методами, зокрема в 3,7 рази при вирішенні зворотного завдання та в 1,5 рази – при вирішенні прямого завдання.

4. Досліджено умови ефективної реалізації методів реверс-інжинірингу (звичайного і сталого) при забезпеченні заданої точності з мінімальним часом на виготовлення складнопрофільних деталей авіаційних конструкцій. На прикладі корпусу рульової машини авіаційних конструкцій доведено, що за умов точності $\pm 0,5$ мм на розмір виготовленої деталі, що має складну просторову геометрію, яка характеризується наявністю малих радіусів заокруглення (до 0,5 мм), перемички й зміни діаметрів циліндричних поверхонь «сходінками», отворів малого діаметра (меншого за 5 мм), а

також гострів кутів (менших за 30°) і різьби, застосування сталого методу реверс-інжинірингу не забезпечить геометричної точності за портретом деталі авіаційної конструкції. Тому для подібних деталей авіаційних конструкцій на підставі отриманих результатів обґрунтовано доцільність використання звичайного методу реверс-інжинірингу.

5. Розроблено й досліджено формування кромки при різних напрямках мікронерівностей утворювальних поверхонь деталей авіаційних конструкцій, а саме: ортогональних поверхонь, що симетрично перетинаються; ортогонально косих поверхонь; симетрично косих і асиметрично косих поверхонь. Виведено залежності для визначення мінімального радіуса заокруглення кромки при всіх випадках, за якими доведено, що із збільшенням показників шорсткості збільшується радіус округлення кромки. Останнє слід враховувати під час створення аналітичного еталону та на його основі 3D-моделей для виробництва деталей авіаційних конструкцій, а також під час вибору технології виготовлення деталей авіаційних конструкцій з метою забезпечення вимог до точності та допусків на розміри поверхонь і кромки, а також шорсткості.

6. Створено метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей авіаційних конструкцій при їх прототипуванні за реверс-інжинірингом залежно від кількості (партії) та вимог допусків на точність деталей авіаційних конструкцій. Доведено, що для деталей авіаційних конструкцій у кількості понад 10 шт. в умовах дрібносерійного виробництва (до 100 шт.) і точності розмірів понад $\pm 0,5$ мм обґрунтованим є використання технології штампування. При тій же кількості деталей, але точності менше $\pm 0,5$ мм доцільно буде використовувати верстати з ЧПК або високошвидкісну обробку штампованої заготовки або плити. При кількості деталей менше 10 шт. та точності понад $\pm 0,5$ мм надано рекомендації щодо використання 3D-друку з подальшим ручним зачищенням. При тій же кількості деталей, але точності менше ніж $\pm 0,5$ мм доцільним є застосування верстатів із ЧПК або високошвидкісну обробку при фрезеруванні плити або штампованої заготовки.

7. Надано спосіб 3D-сканування та визначення допусків на відхилення розмірів виготовленої опукло-вгнутої деталі авіаційної конструкції великих розмірів. Створено новий метод прототипування опукло-вгнутих деталей на базі сталого реверс-інжинірингу за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення, зменшення трудомісткості та термінів технологічної підготовки виробництва. Адекватність теоретичних засад методу підтверджено натурними випробуваннями шляхом виготовлення зразків досліджуваної деталі авіаційної конструкції адитивним способом за пропорційно зменшеними розмірами еталонного портрета. Це рішення дає можливість виробникам використовувати саме доопрацьовані портрети за необхідності швидкого (за умови обмеженого часу) прототипування деталей під час ремонту авіаційної конструкції.

8. Виконано комплексний аналіз процесів перенесення та отримання розмірів деталей роз'ємів і стиків авіаційних конструкцій під час їх прототипування за технологічними розмірними ланцюгами. На основі розрахунків відхилень контуру деталі-прототипу від деталі-оригіналу доведено, що процес виготовлення прототипів методом 3D-друку за характером формоутворення та точністю є близьким до процесів точного лиття металів. Для збільшення точності прототипування деталей роз'ємів і стиків авіаційних конструкцій обґрунтовано та запропоновано застосування системи калібрів і контркалибрів за даними аналітичного еталона. Доведено, що при використанні калібрів і

контркалібрів похибка ув'язування стиків деталі та деталі-прототипу зменшується в 3,78 рази порівняно з використанням тільки сканування реверс-інжинірингом. Крім того, розроблено та запропоновано верстатне пристосування для високоточного оброблення стикових поверхонь з отворами деталі-прототипу, що забезпечує підвищення відтворюваності та стабільності геометричних параметрів.

9. Доведено, що застосування методу безплазового ув'язування форми та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів у виробництві та складанні авіаційної конструкції дає змогу значно знизити трудомісткість виготовлення та монтажних робіт до 10 разів. Розглянуто технологічну послідовність ув'язування вибраної складальної одиниці – стабілізатора гелікоптера, отриманого раніше за плазово-шаблонним методом, при модернізації авіаційної конструкції за допомогою реверс-інжинірингу, а також подано організаційні та технологічні методи скорочення термінів технологічної підготовки виробництва. Показано ефективність використання методів реверс-інжинірингу під час запуску у виробництво нового виробу за умови обмеженого часу.

10. Удосконалено технологію автоматизованого формування великогабаритних панелей із керуванням формою за допомогою 3D-сканування, де вирішується зворотне завдання формоутворення як операції контролю. На відміну від раніше використовуваних підходів запропоновано здійснювати поетапний контроль формування таких заготовок шляхом порівняння даних отриманого портрета заготовки (за зовнішнім контуром) з аналітичним еталоном панелі та коригування наступних навантажень формування панелі через програмний модуль у режимі реального часу. Надано рекомендації щодо впровадження і реалізації завдань формоутворення з використанням технології реверс-інжинірингу в наявне налагоджене виробництво авіаційних конструкцій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Статті в наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. Improvement of the repair method of the aircraft components made of polymer composite materials with operational damage / O. Andreev, K. Maiorova, B. Lupkin, M. Voiko, Y. Korolkov. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 1 (177). С. 42–50. DOI: 10.32620/akt.2022.1.05. (Категорія «Б»).

2. Розробка алгоритмів процесів формоутворення для виготовлення авіаційної техніки при технологічній підготовці виробництва / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, Ю. А. Воробйов, М. М. Бойко, О. Л. Комісаров. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 2 (178). С. 64–73. DOI: 10.32620/akt.2022.2.08. (Категорія «Б»).

3. Формування вимог до інформаційного супроводу виробництва аерокосмічних виробів для забезпечення їх якості / І. В. Бичков, А. С. Селезньова, К. В. Майорова, Ю. А. Воробйов, В. Т. Сікульський. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 4 (180). С. 22–35. DOI: 10.32620/akt.2022.4.03. (Категорія «Б»).

4. Mathematical models creation for calculating dimensional accuracy at the construction stages of an analytical standard using the chain method / I. Vorobiov, K. Maiorova, I. Voronko, O. Skyba, O. Komisarov. *Technology audit and production reserves*. 2024. № 1/1 (75). P. 13–21. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.297732. (Категорія «Б»).

5. Ув'язування при прототипуванні складних авіаційних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі реверс-інжинірингу / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, І. О. Воронько, О. О. Капінус, О. С. Скиба. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024. № 6 (200). С. 80–93. DOI: [10.32620/aktt.2024.6.08](https://doi.org/10.32620/aktt.2024.6.08). (Категорія «Б»).

6. Експериментальні дослідження геометричної точності зубчастого колеса за допомогою координатно-вимірювальної машини / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, С. О. Заклінський, А. С. Суслов. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2025. № 1 (201). С. 50–58. DOI: [10.32620/aktt.2025.1.05](https://doi.org/10.32620/aktt.2025.1.05). (Категорія «Б»).

7. Майорова К. В. Конструктивно-технологічний аналіз типових авіаційних деталей та конструкцій, що підлягають виробництву або ремонту за технологіями реверс інжинірингу. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2025. № 3 (203). С. 66–74. DOI: [10.32620/aktt.2025.3.07](https://doi.org/10.32620/aktt.2025.3.07). (Категорія «Б»).

8. Thread inspection using the waveline W800R profilometer: methodology for method verification / К. Maiorova, V. Kalinichenko, V. Bocharov, I. Voronko, N. Khaууam. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2025. № 2 (202). С. 38–46. DOI: [10.32620/aktt.2025.2.04](https://doi.org/10.32620/aktt.2025.2.04). (Категорія «Б»).

9. Сучасні підходи до метрологічного контролю зубчастих коліс редукторів у важких умовах експлуатації / К.В. Майорова, В.А. Калініченко, В.Б. Бочаров, І.В. Воронько, М.І. Бичков. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2025. № 4 (25). С. 60–78. DOI: [10.32620/aktt.2025.4.08](https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4.08). (Категорія «Б»).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку:

–

Статті у наукових періодичних виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

10. Implementation of reengineering technology to ensure the predefined geometric accuracy of a light aircraft keel / К. Maiorova, I. Vorobiov, M. Boiko, V. Suponina, O. Komisarov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, № 1 (114). P. 6–12. DOI: [10.15587/1729-4061.2021.246414](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246414). (Scopus, Q2)

11. Forming the geometric accuracy and roughness of holes when drilling aircraft structures made from polymeric composite materials / К. Maiorova, I. Vorobiov, O. Andreev, B. Lupkin, V. Sikulskiy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, № 1 (116). P. 71–80. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.254555](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254555). (Scopus, Q3)

12. Implementation of reengineering technology to reduce the terms of the technical preparation of manufacturing of aviation technology assemblies / V. Sikulskiy, K. Maiorova, Iu. Vorobiov, M. Boiko, O. Komisarov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, № 1 (117). P. 25–32. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.258550](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258550). (Scopus, Q3)

13. Modeling the forming process by successive local deforming for monolithic stiffened panels / V. Sikulskiy, S. Sikulskiy, K. Maiorova, Y. Dyachenko. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124, № 5–6. P. 1569–1578. DOI: [10.1007/s00170-022-10582-9](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10582-9). (Web of Science, Scopus, Q2)

14. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made

from polymer composite materials / K. Maiorova, O. Andrieiev, B. Lupkin, V. Antonyuyk, S. Vysloukh. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, № 1 (123). P. 59–67. DOI: [10.15587/1729-4061.2023.279618](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279618). (Scopus, Q3)

15. Devising a methodology for prototyping convexconcave parts using reverse-engineering technology providing the predefined geometric accuracy of their manufacturing / K. Maiorova, O. Kapinus, V. Nikichanov, O. Skyba, A. Suslov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4, № 1 (130). P. 112–120. DOI: [10.15587/1729-4061.2024.308047](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308047). (Scopus, Q3)

16. Implementation of reengineering technology in the technological preparation for general aviation airplane wing tip manufacturing based on the construction of a digital mock-up / K. Maiorova, V. Nikichanov, I. Lysochenko, S. Myronova. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5, № 1 (131). P. 43–53. DOI: [10.15587/1729-4061.2024.311478](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311478). (Scopus, Q3)

Монографії (розділи у колективних монографіях):

17. Інформаційні та технологічні системи супроводу життєвого циклу виробів авіаційної техніки : монографія / І. В. Бичков, К. В. Майорова, М. І. Бичков, О. В. Лосєв, Г. С. Селезньова. Харків : ФОП Панов, 2023. 224 с. ISBN 978-617-8113-63-6.

Патенти на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу:

–

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

18. Implementation of the reengineering in additive technologies in the manufacture of aerospace parts / A. Mialytsia, I. Buchkov, K. Maiorova, V. Suponina. *Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки* : тези доп. Міжнар. наук.-техніч. конф., 23–24 квіт. 2019 р., Харків / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2019. С. 47–48. URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Problemi_Stvorenniya_Ta.pdf. (15.09.2025).

19. Reengineering based on 3D-scanning in the process of propeller analytical standard constructing for an ultra-light twin-seat aircraft / I. Bychkov, K. Maiorova, V. Suponina, S. Riabikov. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial* : col. de doc. científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la conf. Intern. científica y práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, 2020. Vol. 2. P. 32–38. DOI: [10.36074/24.04.2020.v2.09](https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.09).

20. Майорова К. В. Реінжиніринг авіаційних об'єктів та порівняльний аналіз створення аналітичного еталону. *Авіація, промисловість, суспільство* : матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф., Кременчук, 14 трав. 2020 р. : у 2 ч. / Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуц. льотний коледж. Харків, 2020. Ч. 1. С. 377–380. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/Aviatsiia%20promyslovist%20suspilstvo_Kremenчук_1_2020.pdf (07.09.2025).

21. Аналіз тенденцій вітчизняного авіаційного виробництва / Ю. А. Воробйов, І. В. Бичков, К. В. Майорова, О. Л. Комісаров, С. М. Рябіков. *Current Issues and Prospects for the Development of Scientific Research* : proc. of the 4th Intern. sci. and pract. conf., Orléans, France, Dec. 7–8, 2021. Orléans, 2021. С. 329–333. (Scientific Collection «Interconf» ; № 90). DOI: [10.51582/interconf.7-8.12.2021.038](https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.12.2021.038).

22. The Process of Forming Integral Ribbed Panels by Sequential Local Phased Deformation with Information Support / V. Sikulskyi, S. Sikulskyi, K. Maiorova, V. Suponina, O. Komisarov. *International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2021* : proceedings, 28–29 Oct. 2021, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2022. P. 157–165. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 367, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-030-94259-5_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_15). (Web of Science, Scopus, Q4)

23. Study of a geometry accuracy of the bracket-type parts using reverse engineering and additive manufacturing technologies / K. Maiorova, V. Sikulskyi, I. Vorobiov, O. Kapinus, A. Knyr. *International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2022* : proceedings, 28–29 Oct. 2022, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2023. P. 146–158. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 657, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-031-36201-9_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_13). (Scopus, Q4)

24. Improving the Method of Virtual Localization of Near-Net-Shaped Workpieces for CNC Machining. *Lecture Notes in Networks and Systems* / S. Plankovskyy, O. Kapinus, K. Maiorova, S. Myronova. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems* : proc. 17th Inter. conf., Chernihiv, Ukraine, Nov. 14–16, 2022. Cham : Springer, 2023. P. 119–128. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 667, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-031-30251-0_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_10) (Scopus, Q4)

25. Види математичної моделі геометрії об'єктів. Достоїнства і недоліки / І. В. Бичков, К. В. Майорова, М. І. Бичков, В. Л. Малашенко, С. М. Рябіков. *Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень* : матеріали I Міжнар. наук. конф., Харків, 14 квіт. 2023 р. / Міжнар. центр наук. досліджень. Вінниця, 2023. С. 102–104. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/14.04.2023/23> (18.09.2025).

26. Передумови використання технології зворотного інжинірингу [Електронний ресурс] / К. В. Майорова, І. В. Бичков, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков, О. Л. Комісаров. *Advanced Discoveries of Modern Science: Experience, Approaches and Innovations* : proc. IV Intern. sci.-theor. conf., 11 Aug. 2023, Amsterdam, Netherlands. Amsterdam, 2023. С. 111–113. URL: <file:///C:/Users/MainUser/Downloads/44-80-PB.pdf> (31.08.2025).

27. Використання реверс-інжинірингу і адитивних технологій в авіаційному виробництві / К. В. Майорова, І. В. Бичков, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков, О. Л. Комісаров. *Advanced Discoveries of Modern Science: Experience, Approaches and Innovations* : proc. IV Intern. Sci. and Theoretical conf., Amsterdam, Netherlands, 11 Aug., 2023. Amsterdam, 2023. P. 116–119.

28. Аналіз використання технології реверс-інжинірингу / І. В. Бичков, К. В. Майорова, В. Т. Сікульський, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков. *Grail of Science*. 2023. № 31. P. 258–260. DOI: [10.36074/grail-of-science.15.09.2023.41](https://doi.org/10.36074/grail-of-science.15.09.2023.41). (Категорія «Б»)

29. Аналіз чинників щодо формалізування математичної моделі високоточних деталей складної форми / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, С. О. Красовський, А. С. Суслов. *Актуальні питання розвитку галузей науки* : матеріали II Міжнар. наук. конф., 1 груд. 2023 р., Чернігів, Україна / Міжнар. центр наук. дослідж. Вінниця, 2023. С. 282–284. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference->

[proceeding/issue/view/01.12.2023/47](#) (31.08.2025).

30. Algorithm for Selecting the Optimal Technology for Rapid Manufacturing and/or Repair of Parts / V. Sikulskyi, K. Maiorova, O. Shypul, V. Nikichanov, O. Kapinus, O. Tryfonov. *International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2023* : proceedings, 27–29 Dec. 2023, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2024. Vol. 1. P. 25–39. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 1008, ISSN 2367-3370). DOI: 10.1007/978-3-031-61415-6_3. (Web of Science, Scopus, Q4)

31. Modeling hole edge and burr formation during drilling using LS-DYNA / V. Sikulskyi, K. Maiorova, V. Garin, V. Myntiuk, S. Sikulskyi. *International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2023* : proceedings, 27–29 Dec. 2023, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2024. Vol. 1. P. 123–136. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 1008, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-031-61415-6_11](#). (Web of Science, Scopus, Q4)

32. Розвиток теорії та наукових основ формоутворення деталей складних форм високої точності / К. Майорова, С. Красовський, С. Миронова, Ю. Трубчанін. *Actual problems of science and technology – from theory to practice* : col. of abstr. XXX Intern. sci. and pract. conf., July 3–5, 2024, Bern, Switzerland. [S. l.], 2024. С. 94–96. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/07/Actual_problems_of_science_and_technology_from_theory_to_practice_July_3_5_2024_Bern_Switzerland.pdf (20.09.2025).

33. Experimental studies of the holes quality parameters in polymer composite materials / B. V. Lupkin, O. V. Andrieiev, K. V. Maiorova, V. S. Antonyuk, S. A. Tolstoi. *New technologies, development and application. NT'2024* : proc. 10th Intern. conf. 2024. Cham : Springer, 2024. Vol. 1. P. 589–602. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 1069, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-031-66268-3_60](#). (Web of Science, Scopus, Q4)

34. Study of the Technological Parameters of Surface Plastic Deformation for Monolithic Aircraft Panels by the Impact-Drum Method / Y. Dyachenko, I. Voronko, V. Sikulskyi, K. Maiorova, S. Shapar. *International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2024* : proceedings, 12–14 Dec. 2024, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2025. Vol. 2. P. 429–440. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 1474, ISSN 2367-3370). DOI: [10.1007/978-3-031-94852-7_36](#). (Scopus, Q4)

35. Analysis of Modern Approaches to Approbation of Aircraft Parts Geometric Data Digitization by Reverse Engineering / K. Maiorova, I. Lysochenko, O. Skyba, A. Suslov, V. Antonyuk. *Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS'2025* : proceedings. Cham : Springer, 2025. P. 264–273. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 1480, ISSN 2367-3370). DOI: [1007/978-3-031-95191-6_25](#). (Scopus, Q4)

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

36. Спосіб реконструкції опукло-вгнутих об'єктів : пат. на корисну модель 158919 Україна : МПК G06T 17/20, G06T 19/20 / Сікульський В. Т., Майорова К. В., Бичков М. І., Нікічанов В. В., Капінус О. О., Скиба О. С. ; заявник та патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». u202404992 ; заявл. 21.10.2024 ; опубл. 02.04.2025, Бюл. № 14. 7 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1849695/>.

АНОТАЦІЯ

Майорова К. В. Наукові основи виробництва авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу за умови обмеженого часу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів. – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми, яка полягає в необхідності створення науково обґрунтованих методів і моделей реверс-інжинірингу авіаційних конструкцій (АК), спрямованих на виробництво в умовах жорстких обмежень із забезпеченням необхідного рівня точності та технологічності конструкцій. Це досягається завдяки оптимізації технологічних процесів із використанням інформаційних технологій і впровадженню нових ефективних методів реверс-інжинірингу (РІ), які дають змогу оперативно отримувати геометричну інформацію про існуючі вироби та використовувати її для проектування, прототипування і контролю деталей і вузлів АК. Водночас відсутність цілісних наукових основ формування та керування процесами створення цифрового першоджерела інформації таких деталей і конструкцій на базі РІ за визначених часових обмежень не забезпечує гарантованого досягнення заданої геометричної точності, технологічності та відтворюваності результатів. Це зумовлює необхідність розроблення нових науково обґрунтованих методів, підходів і моделей, які дали б змогу поєднувати високу точність створення цифрових моделей і виготовлення авіаційних деталей і конструкцій із мінімізацією тривалості технічної та технологічної підготовки виробництва (ТПВ), що й визначає актуальність цієї докторської дисертації.

У роботі створено науково обґрунтований класифікатор щодо особливостей використання методів РІ для різних груп складних за формою деталей та вузлів АК. Суть полягала в можливості прототипування тієї чи іншої групи деталей залежно від технічних можливостей різних сканерів та інших вимірювальних пристроїв, а також у визначенні необхідного обладнання для реалізації самого процесу швидкого прототипування. Класифікатор враховує властивості отримання полігональної моделі з високою точністю (0,05 мм) безконтактним способом, а також роздільну здатність сканера, що впливає на точність сканування кромки.

Сформульовано й вирішено завдання реалізації методів сталого та звичайного РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності в умовах швидкого виробництва й виготовлення складних за формою деталей АК. Розроблено й досліджено формування кромки за різних напрямків мікронерівностей утворювальних поверхонь деталей АК, а саме: ортогональних поверхонь, що симетрично перетинаються; ортогонально косих поверхонь; симетрично косих і асиметрично косих поверхонь, що слід враховувати під час створення АЕ та на його основі 3D-моделей для виробництва деталі АК. Виведено залежності для визначення мінімального радіуса заокруглення кромки в усіх випадках. Доведено, що найкращі показники кромки реалізуються за симетрично паралельного розташування

мікрорельєфу шорсткості, дещо гірші – за паралельно ортогонального.

Розроблено підходи до синтезу процесів формоутворення під час ТПВ АК, що містять етапи вибору необхідного обладнання, інструменту, способу кріплення заготовок, вимірjувальних процедур тощо, тобто формування відповідних моделей процесів.

На базі теоретико-імовірнісного методу виконано оцінювання трудомісткості робіт зі створення АЕ під час вирішення прямого та зворотного завдань на прикладі опукло-вгнутої складальної одиниці – стабілізатора гелікоптера. Сформовано організаційні та технологічні методи скорочення термінів ТПВ із використанням РІ технології.

Створено метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей АК під час їх прототипування за РІ залежно від кількості (партії) та вимог точності деталей АК. Сформовано послідовність технологічних операцій із 3D-сканування і створення портрета, а також визначено допуски на відхилення розмірів поверхонь виготовленої деталі АК.

Створено новий метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення, зменшення трудомісткості та термінів ТПВ.

Розроблено верстатне пристосування (систему калібрів і контркалибрів) для оброблення плоского стику і ув'язування його отворів у тому числі. Розроблено автоматизований комплекс формування монолітних панелей подвійної кривизни з керуванням формою за допомогою 3D-сканування.

Створено рекомендації щодо впровадження й реалізації завдань формоутворення на базі технології РІ у виробництво АК.

Ключові слова: реверс-інжиніринг, сталий реверс-інжиніринг, аналітичний еталон, 3D-модель, формоутворення поверхонь, кромка, портрет, «хмара точок».

ABSTRACT

Maiorova K. V. Scientific Foundations of the Aircraft Structures Manufacturing Using Reverse Engineering Technologies Under Limited Time Conditions. – Scientific study on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.07.02 – Design, Manufacture and Testing of Aircraft. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem that is the need in scientifically proven methods and models for reverse engineering of aircraft structures (AS) creation, aimed at production under strict constraints while ensuring the required level of accuracy and manufacturability (technological efficiency) of those structures. This is achieved through the optimization of technological processes using information technologies and the implementation of new effective reverse engineering (RI) methods, which allow to obtain quickly the geometric information of existing products and use it for the further design, prototyping and technical inspection of AS assembly components. At the same time, the lack of holistic scientific foundations as to the formation and control of the processes of creating by RI a digital primary source of information for such parts and structures within certain time limits does not ensure guaranteed achievement

of the specified geometric accuracy, manufacturability, and reproducibility of results. This necessitates the development of new scientifically based methods, approaches and models that allow to combine high accuracy both while creating the AS digital models and in their manufacturing with minimizing the terms of technical and technological preparation for production (TPP) that determines the relevance of this dissertation.

It's created a classification on the peculiarities of RI methods applicability for various groups of complex-shaped parts and assemblies of AS in the work. Concept of it is the possibility of that or another group of parts prototyping depending on the technical capabilities of various 3D scanners and other measuring devices, as well as determining the need in equipment for implementing the rapid prototyping process itself.

It was stated and solved the problems of implementing the methods of sustainable and conventional RI under the conditions of specified geometric accuracy ensuring in complex-shaped AS assembly components rapid manufacturing. It was studied the edges forming for different directions of AS assembly components adjacent surfaces micro-roughness (namely symmetrically intersected orthogonal surfaces, symmetrically parallel and parallel orthogonal ones, orthogonally oblique, symmetrically oblique and asymmetrically oblique ones), which should be taken into account when creating digital mock-up (DMU) and 3D-models based on it for the AS assembly components production. Dependencies for the edge fillets minimum radius are obtained for all the cases. It is proven that the best edge performance is achieved with a symmetrically parallel arrangement of the surface roughness microrelief, somewhat worse performance – with a parallel orthogonal one.

The approaches for forming processes creating while AS assembly components TPP are developed, which include the stages of selecting the necessary equipment, tools, workpieces clamping methods, measuring procedures, etc., i.e., creating the models of appropriate processes.

It was done an assessment of the DMU creation labour input, by probabilistic method, when solving direct and inverse problems on example of a convex-concave assembly unit – a helicopter stabilizer. Organizational and technological methods for reducing the TPP terms due to using RI technology have been developed. A method for selecting the most rational technology for rapid manufacturing and/or repair of AS assembly components when prototyping them using RI has been created, depending on the batch size and tolerance requirements for the AS geometry accuracy. A sequence of technological operations for 3D scanning and creating a digital portrait was developed, tolerances for dimensions of manufactured AS part were determined. A novel method for prototyping the convex-concave parts by sustainable RI has been created providing the specified geometric accuracy ensuring of their manufacture, reducing the labour input and TPP terms. A machine tooling (a system of gauges and counter-gauges) has been developed for a flat junction processing and its holes co-ordination. An automated complex for double-curvative monolithic panels forming with shape control using 3D scanning has been developed.

Recommendations for the forming tasks implementation in the AS production using RI technology have been developed.

Keywords: reverse engineering, sustainable reverse engineering, digital mock-up, 3D model, surface forming, edge, digital portrait, “point cloud”.

Підписано до друку _____.____.2026
Формат 60×90/16. Папір офс. Офс. друк
Ум. друк. арк. 2,4. Наклад 100 пр. Замовлення № 75-24

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
61070, м. Харків-70, вул. Вадима Манька, 17
<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»
61070, м. Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001