Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерства освіти і науки України

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАЙОРОВА КАТЕРИНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 629.735.33.02(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів
13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



К. В. Майорова

Харків – 2026

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 прискореного виробництва в умовах жорстких обмежень із забезпеченням необхідного рівня точності та технологічності шляхом створення науково обґрунтованих методів і моделей реверс-інжинірингу авіаційних конструкцій. Це досягається завдяки оптимізації технологічних процесів з використанням інформаційних технологій та внаслідок розробки нових ефективних методів реверс-інжинірингу (РІ), які дають змогу оперативно отримувати геометричну інформацію про існуючі вироби та використовувати її для проєктування, прототипування й 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 обумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованих методів, підходів і моделей, які б дозволяють поєднувати високу точність створення цифрових моделей і виготовлення авіаційних деталей і конструкцій з мінімізацією тривалості технічної та технологічної підготовки виробництва (ТПВ), що й визначає актуальність даної докторської дисертації.

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 РІ для різних груп деталей і складальних одиниць (СО) АК.

Сформульовано мету роботи як розроблення наукових основ виробництва авіаційних конструкцій із забезпеченням заданих показників точності та технологічності в умовах обмеженого часу із застосуванням методів реверс-інжинірингу.

У другому розділі роботи розроблено модель процесів формоутворення при технологічній підготовці виробництва (ТПВ) деталей та СО АК, що реалізовують вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення на базі РІ. При цьому першоджерелом і носієм повної інформації виробу покладено аналітичний еталон (АЕ) АК, внаслідок використання якого доведено зниження термінів загальної трудомісткості ТПВ АК. Введені поняття сталого і звичайного методів РІ. Досліджено умови їх реалізації за умов забезпечення заданої геометричної точності з використанням мінімуму часу на виготовлення складних за формою деталей АК. Показано, що за вимог точності ±0,5 мм до геометрії виготовленої деталі, використання сталого РІ не забезпечить геометричну точність виготовленої деталі АК. Тому для таких деталей АК рекомендовано використовувати звичайний РІ. Удосконалено метод збільшення точності віртуального базування створеного портрета дослідної деталі АК при її виготовленні на верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК). Створено метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей АК при їх прототипуванні за РІ залежно від кількості (партії) та вимог допуску на точність деталей АК.

У третьому розділі роботи вперше запропоновано технологію, операції та прийоми сканування опукло-вгнутої форми авіаційних деталей з визначенням параметрів допустимих відхилень її геометрії при прототипуванні. Створено новий метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої точності їх виготовлення. На відміну від повного технологічного ланцюжка прототипування за звичайним РІ, доведено, що доопрацьований в еталонний портрет за сталим РІ можна використовувати для виготовлення деталі за адитивними та екстрактивними технологіями. Сутність запропонованого методу полягає в тому, що можна виконувати попереднє випробування і контроль еталонних портретів для деталей будь-яких розмірів шляхом використання пропорційного зменшення оригінальних розмірів з визначенням допустимих відхилень геометрії виготовлених

зменшених зразків. Виконано розрахунки похибки ув'язування при прототипуванні складних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі РІ та подано пропозиції щодо збільшення точності прототипування таких деталей АК, а також розроблено і запропоновано технічне рішення для пристосування з оброблення плоского стику з отворами та просторового роз'єму вузла-прототипу високої точності.

У четвертому розділі роботи показано впровадження методів РІ в уже існуюче налагоджене виробництво АК, а також ефективність застосування лазерних вимірювальних засобів, що зменшують трудомісткість та цикл монтажних робіт до 10 разів. Створено математичні моделі розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів і призначення похибок при його побудові. Показано, що з використанням РІ збільшується точність складання та зменшуються похибки контуру СО АК. Розроблено модель ув'язування однорідних СО АК, отриманих раніше з використанням плазово-шаблонного методу (ПШМ), на базі формування АЕ за РІ з метою продовження життєвого циклу виробу (ЖЦВ). Запропоновано організаційні та технологічні методи і підходи зі скорочення термінів ТПВ за РІ.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи доведено адекватність теоретичних засад методів РІ для АК складних форм, а саме із забезпеченням заданої точності в умовах швидкого виробництва. Розглянуто побудову АЕ для залізу кіля легкого літака та його засобів технологічного оснащення (ЗТО). Результати контролю, отримані із застосуванням РІ, дали змогу здійснити вибраковування наявних ЗТО з подальшим виготовленням нових ЗТО (матриці та пуансона) з альтернативного матеріалу – органопластику. Випробувано методи вирішення прямого і зворотного завдань формоутворення АЕ для повітряного гвинта надлегкого двомісного літака. Удосконалено технологію формування великогабаритної монолітної панелі подвійної кривизни АК шляхом здійснення поетапного контролю відповідної заготовки панелі, коригування наступних навантажень формування такої заготовки в режимі реального часу. Розроблено програмний модуль для автоматизованого формування

монолітних (інтегральних) панелей з контролем їх форми за портретами на кожному етапі формування, що може бути задіяний для контролю геометрії в усіх дослідженнях ЖЦВ АК. Подано рекомендації щодо впровадження методів РІ в технологічний ланцюжок уже існуючого виробництва.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

– **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;

– на основі зазначеного підходу до вибору ефективного методу реверс-інжинірингу і 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 цифрового портрета дослідної деталей авіаційних конструкцій;

– **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;

– 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;

– **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;

– **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 роботи полягає у такому:

– 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 ±0,5 мм на виготовлену деталь, допускається мати складну геометрію з радіусами скруглення від 0,5 мм, перемичками і зміною діаметрів циліндричних поверхонь «сходинками», діаметрами отворів, більшими за 5 мм, і завглибшки не більше діаметра отвору, а також із кутами від 30° і відсутністю різьби;

– 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 ±0,5 мм обґрунтованим є вибір технології штампування. За допуску форми менше ±0,5 мм в умовах того ж виробництва доцільно використовувати верстати із ЧПК або високошвидкісне оброблення штампованої заготовки або фрезерування плити на верстаті з ЧПК. В умовах одиничного виробництва та допуску форми понад ±0,5 мм рекомендовано використовувати 3D-друк з подальшим ручним зачищенням, а за допуску форми

менше ніж ±0,5 мм – верстати із ЧПК або високошвидкісне оброблення під час фрезерування плити або штампованої заготовки;

– 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;

– 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 контркалібрів із використанням спеціального пристосування. Їх використання дають змогу зменшити похибки розмірів стиків до ±0,121 мм. Розроблено та запропоновано верстатне пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу високої точності;

– удосконалено технологію формування великогабаритної панелі АК, 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» та АТ «АНТОНОВ». Створено науково-технічну базу, яка

використовується для виконання науково-дослідних робіт і підготовки фахівців в 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).

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

Статті у 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. Boiko, Y. Korolkov. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2022. № 1 (177). С. 42–50. DOI: 10.32620/aktt.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/aktt.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/aktt.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. (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. (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. (Категорія «Б»).

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

9. Сучасні підходи до метрологічного контролю зубчастих коліс редукторів у важких умовах експлутації / 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. (Категорія «Б»).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму:

–

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 / K. 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. (Scopus, Q2)

11. Forming the geometric accuracy and roughness of holes when drilling aircraft structures made from polymeric composite materials / K. 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. (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. (Scopus, Q3)

13. Modeling the forming process by successive local deforming for monolithic stiffened panels / V. Sikulskiy, S. Sikulskyi, 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. (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. (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. (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. (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.-технічн. 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_Stvorennya_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 elparadigma de la sociedad post-industrial* : col. de doc. científicos «ΛΌГОΣ» 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.

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_Кременчук_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.

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. **(**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. (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 (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. Комисаров. *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. (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/.

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 rapid manufacturing of aircraft structures (AS) under strict constraints while ensuring the required level of accuracy and manufacturability (technological efficiency) by creating scientifically proven methods and models for AS reverse engineering (RI).

This is achieved through the optimization of technological processes using information technologies, and as a result of the development of new effective 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 doctoral dissertation.

In the first section of the dissertation, based on a comparative analysis of existing methods for prototyping the complex-shaped parts and units of AS and on a comparative analysis of the technological peculiarities of the processes to be in use (scanning, measurement on a coordinate measuring machine (CMM), etc.), the prospects of reverse engineering technologies for various groups of parts and assembly units (AU) of AS are determined.

The goal of the work is formulated as the development of scientific foundations for the aircraft structures production that provides specified accuracy and technological efficiency (manufacturability) of AS under conditions of limited time using reverse engineering methods.

In the second section of the work the model for forming processes at the stage of technological preparation of production the AS parts and AU is developed, which implements the solution of direct and reverse tasks of forming by using (RI). For this, as the primary source and carrier of complete product information is used the digital mock-up (DMU) of AS, the use of which has proven a reduction in the overall labor input of AS TPP (or so called “lead time”). The concepts of sustainable and conventional RI methods are introduced. The conditions for their successful implementing have been studied provided that specified geometric accuracy is ensured while minimum time for manufacturing the complex-shaped AS parts. It is being shown that with the accuracy requirements of ±0.5 mm for the manufactured part geometry, the use of a sustainable RI will not ensure the geometric accuracy of the manufactured AS part. Therefore, for such AS parts it is recommended the use of conventional RI. The method for increasing the virtual localization accuracy of the experimental AT part digital portrait when its manufacturing on a machine tool with computer numerical control (CNC) has been improved. It has been

created a method for selecting the most rational technology for rapid manufacturing and/or repair of AS parts when prototyping them using RI that takes into account the parts quantity (batch size) and tolerance requirements for geometric accuracy of AS parts.

In the third section of the work there were proposed, for the first time, the technology, operations and techniques for scanning the convex-concave shaped aerospace parts with the appointing the parameters of permissible deviations of their geometry when prototyping by RI provided that the specified accuracy of their manufacture is ensured. It has been proven, unlike the full technological chain of prototyping using conventional RI, that a revised digital portrait obtained by sustainable RI can be used to manufacture parts using additive and extractive technologies. The concept idea of the proposed methodology is that it is possible to perform preliminary approbation of such "ideal portraits" and parts inspection of any size by using their dimensions proportional reduction with the appointing the corresponding parameters of permissible deviations (tolerances) of the manufactured reduced samples geometry. Calculations of the error of the co-ordination during the prototyping by RI the complex high-accurate parts with breaks and junctions were performed and ways to increase the accuracy of such AS parts prototyping were proposed, and a technical decision as to special jig for machining a flat junction unit with holes and for a spatial one of a high-accurate prototype assembly unit was made and proposed.

The fourth section of the work shows the implementation of RI methods in the already existing established AS production, as well as the effectiveness of using the laser measuring tools, which reduce the labour input and cycle of assembly work by up to 10 times. Mathematical models for calculating the accuracy of dimensions at the stages of a digital mock-up (DMU) creating by using the technological dimensional chains with assigning the errors ranges were created. It is shown that using the RI technology while TPP increases the assembly accuracy and reduces the errors of the AS AU contours. For extending the product life cycle (PLC), a scheme of co-ordination that based on the DMU obtained by RI has been developed for typified AS AUs (similar in design and technologies to be used), produced earlier using the loft-template method (LTM) of co-ordination.

Organizational and technological methods and approaches for reducing the TPP terms due to using the RI technologies are proposed.

In the fifth section of the dissertation it was proven the adequacy of the theoretical foundations of RI methods for complex-shaped AS, namely, for ensuring the specified accuracy in conditions of rapid manufacturing. The DMU creating for the fin fairing of a light airplane and technological tooling (TT) design for its manufacture are considered. The data of technical inspection with use of RI are resulted in decision to reject the existing TT means and to produce the new ones (dieblock and punch) made of another materials – organoplastics. The methods for solving the direct and inverse problems of DMU forming for the propeller of an ultralight two-seater airplane has been created and tested. The technology for forming a large-sized monolithic double-curvature AS panel has been improved by implementing phased inspection of the corresponding panel blank and adjusting subsequent loads for forming such a blank in real time. A modular software has been developed for computer-aided forming of integral panels with inspection of their shapes using the digital portraits at each stage of manufacturing, which can be used for geometry inspection in all the studies of the AS PLC. Recommendations are given as to the implementation of RI methods into the technological system of existing manufacturing.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

– it's for the first time, a scientifically proven approach to choosing an effective method for reverse engineering of complex-shaped parts, assemblies and units of aircraft structures **has been developed**, which is based on the proposed classification of the peculiarities of the specified parts, assemblies and units. This approach allows to take into account the labour input of the work on creating the primary source of information and accuracy indicators;

– on the base of the specified approach to choosing an effective method of reverse engineering and choosing a rational technology for rapid manufacturing and/or repair of parts depending on the batch size and accuracy requirements, the method for forming the parts and assembly units of aircraft structures **has been improved**, which, unlike known

methods, comprehensively takes into account the technologies of stamping, additive manufacturing, high-speed machining on CNC machines of a forged blank or milling a plate, and also ensures increased accuracy of virtual localization of a digital portrait of experimental parts of aircraft structures;

– **it's for the first time**, a method for reconstructing the convex-concave geometry of large-sized parts of aircraft structures with the establishing the parameters of permissible deviations was proposed and scientifically substantiated, which includes sequential scanning of conjugate surfaces with marking according to characteristic geometric features, followed by processing of the resulting digital portraits;

– based on the specified method, a method for prototyping the large-sized parts of aircraft structures **has been improved**, which, unlike the existing ones, allows for the manufacture of such parts according to a "ideal digital portrait" obtained by sustainable reverse engineering, with preliminary testing and control of such portraits on proportionally reduced prototypes;

– **it has been further developed** the reverse engineering technology due to the introduction of loftless co-ordination of shapes and sizes based on the proposed model using modern laser tools, which increases the assembly accuracy and reduces the errors of the contours of the aircraft structures assembly units. Such a model of co-ordination the homogeneous assembly units of aircraft structures ensures a reduction in the terms of technological preparation for production, an increase in the accuracy of prototyping and an extension of the product life cycle;

– **it has been further developed** a technology for manufacturing the large-sized panels of aircraft structures, which requires a multi-stage forming process. For this purpose, it is proposed to use automated forming of such panels with step-by-step inspection and adjustment of technological process parameters based on the results of comparing the reference geometry of the panel with its portrait in real time.

The practical significance of the work is as follows:

– it is proposed, for ensuring the scientifically substantiated requirements for the manufacturing accuracy of AS parts during their prototyping in conditions of limited

time, to use a sustainable RI method taking into account that the manufactured part tolerance is more than ±0.5 mm, and it is allowed that part has complex geometry with fileting radii more than 0.5 mm, bridges and ladder-like cylindrical surfaces that vary in the diameters, as well as with holes of diameters more than 5 mm, acute angles (no less than 30°) and has no threads.

– according to the proposed approach to determining a rational technology for rapid manufacturing and/or repair of the aircraft structures parts during their prototyping, the following is recommended. In the conditions of small-scale production of small and medium-sized parts with a shape tolerance of more than ±0.5 mm, it is justified the choice of forging technology. With a shape tolerance of less than ±0.5 mm in the same production type, it is advisable to use CNC machines or high-speed processing of forged workpieces or milling the plates on a CNC machine. In the conditions of single production and a shape tolerance of more than ±0.5 mm, it is recommended to use 3D printing with subsequent manual cleaning, and in case the shape tolerance of less than ±0.5 mm – CNC machines or high-speed processing when milling a plate or forged workpiece;

– it's for the first time, in order to reduce the terms of production when prototyping the large-sized convex-concave parts of aircraft structures, an "ideal digital portrait" was tested as a primary source of information using the method of sustainable reverse engineering on the example of a blade of a pumped hydroelectric power plant. It was proposed to carry out preliminary testing on proportionally reduced samples of such parts according to the ideal digital portrait data by manufacturing by an additive or extractive methods. This allows to establish both the correctness of the assigned tolerances for manufacturing the part and to choose the manufacturing technology. In addition, the values of permissible deviations of the shape of aircraft structures parts when prototyping them using reverse engineering methods were determined and recommended;

– to increase the accuracy of manufacturing high-precision aircraft structures parts parts with breaks and junctions, a model for co-ordination the holes in flat and spatial junctions has been proposed, including using a system of gauges and countergauges using a special jig. Their use resulted in reducing the errors in the junctions dimensions to

±0.121 mm. A machine tool jig has been developed and proposed for machining a flat junction with holes in a high-accurate prototype part;

– the technology of forming a large-sized integral (monolithic) AT panel has been improved, namely a double-curvature panel made from a flat blank with stiffening ribs. Unlike the previously used approaches, it is proposed to carry out stage-to-stage inspection of such workpieces forming processes by comparing the data of the obtained workpieces digital portrait (along the outer contour) with the panel DMU and with the computer-aided correction of subsequent forming loads through the developed software module. This allows to increase the efficiency of work at shop workflow using the CAD/CAM technologies.

The results of the dissertation work have been accepted for implementation in production at the “KhMP FED” LLC and ANTONOV Company. A scientific-and-technical base that used to perform research and development work and to train specialists in the National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” (KhAI) has been created. The scientific achievements obtained during the dissertation work became the basis for the current collaboration in scientific research between KhAI and Ankara Yıldırım Beyazıt University (Turkey).

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

ЗМІСТ

ВСТУП 28
Розділ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ 39
1.1 Конструктивно-технологічний аналіз типових деталей авіаційних конструкцій, що можуть бути прототиповані 39
1.2 Перспективні методи реверс-інжинірингу при створенні авіаційних деталей і конструкцій та їх контролю 47
1.2.1 Систематизація деталей, вузлів та агрегатів авіаційних конструкцій за критерієм можливості їх прототипування методом реверс-інжинірингу 53
1.3 Аналіз характеристик якості поверхонь авіаційних деталей та конструкцій, методів формоутворення поверхонь, геометрії, обладнання та інструменту, що застосовуються 58
1.3.1 Точність розмірів деталей 58
1.3.2 Забезпечення форми деталей 60
1.3.3 Хвилястість та шорсткість деталей 62
1.3.4 Технологічна спадковість 62
1.3.5 Промислова чистота поверхні 64
1.3.6 Кромки деталі 66
1.4 Дослідження впливу розташування мікрорельєфу шорсткості поверхонь, що її утворюють, на форму кромки 68
1.5 Передумови використання методів РІ при формуванні якості деталей АК за умови обмеженого часу 74
1.5.1 Пряме та зворотне завдання формоутворення 74
1.5.2 Реалізація РІ при вирішенні прямого та зворотного завдань формоутворення за умови обмеженого часу 78
1.5.3 Порівняльний аналіз трудомісткості створення АЕ СО АК при технічній підготовці виробництва з використанням методів РІ 83

1.5.4 Обговорення результатів досліджень впровадження РІ при технічній підготовці виробництва АК 86
1.6 Висновки за розділом 88
Розділ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА БАЗІ МЕТОДІВ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ ЗА УМОВИ ОБМЕЖЕНОГО ЧАСУ 91
2.1 Основа інформаційного супроводу деталей АК 93
2.1.1 Аналітичний еталон деталі 93
2.1.2 Портрет деталі 95
2.2 Розроблення моделі процесів формоутворення на етапі технологічної підготовки виробництва АК 97
2.2.1 Технологічні заходи для скорочення термінів ТПВ на базі єдиного першоджерела інформації 98
2.2.2 Модель процесів формоутворення на етапі ТПВ АК за допомогою РІ при розв'язанні прямого та зворотного завдань формоутворення 102
2.2.3 Інформаційний супровід АК протягом життєвого циклу виробу за АЕ 108
2.3 Прототипування складних за формою деталей АК за методами РІ за умов забезпечення заданої точності 110
2.3.1 Аналіз відкритих джерел із застосування РІ деталей АК 110
2.3.2 Конструктивно-технологічний аналіз деталі АК та підбір 3D-сканера 114
2.3.3 Створення портрета та АЕ корпусу рульової машини АК 115
2.3.4 Аналіз прототипування корпусу рульової машини АК за методами РІ на предмет забезпечення заданої геометричної точності 121
2.3.5 Аналіз витраченого часу для сталого і звичайного РІ 121
2.3.6 Перспективи сталого РІ порівняно зі звичайним 123
2.4 Метод збільшення точності віртуального базування еталонного портрета дослідної деталі АК при її виготовленні на верстаті з ЧПК 125
2.4.1 Аналіз існуючих методів віртуального базування 125

2.4.2 Постановка математичної моделі задачі 127
2.4.3 Числове розв’язання тестової задачі віртуального базування та обговорення результатів 130
2.5 Метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту за умови обмеженого часу 132
2.5.1 Виробничий досвід технологій виготовлення деталей АК, раціональних за якістю та часом 132
2.5.2 Розрахунок трудомісткості робіт за методами РІ 133
2.5.3 Конструктивно-технологічний аналіз дослідної деталі АК та створення її АЕ 140
2.5.4 Експериментальні дослідження з вибору технологій швидкого виробництва за параметрами точності та часом: 3D-друк 141
2.5.5 Експериментальні дослідження з вибору технологій швидкого виробництва за параметрами точності та часом: штампування 142
2.5.6 Порівняльний аналіз трудомісткості робіт виготовлення деталі 3D-друком і штампуванням 143
2.5.7 Метод вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту деталей АК 144
2.6 Висновки за розділом 147
Розділ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЧАСТКОВО ЗРУЙНОВАНИХ, ПОШКОДЖЕНИХ АБО ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ АК ОПУКЛО-ВГНУТИХ ФОРМ МЕТОДАМИ РІ В УМОВАХ ШВИДКОГО ВИРОБНИЦТВА 148
3.1 Визначення опукло-вгнутої форми авіаційних деталей та особливості їх сканування 148
3.2 Дослідження зі встановлення параметрів допустимих відхилень геометрії деталі при прототипуванні за методами РІ 153
3.2.1 Постановка задачі 153
3.2.2 Аналіз літературних джерел та стан питання 154
3.2.3 Визначення параметрів допустимих відхилень геометрії деталі 157

3.2.4 Обговорення результатів і перспективи розвитку РІ 160
3.3 Метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої точності їх виготовлення 161
3.3.1 Передумови створення методу прототипування опукло-вгнутих деталей за методом сталого РІ 162
3.3.2 Створення портрета лопаті досліджуваної деталі 168
3.3.3 Створення еталонного портрета лопаті досліджуваної деталі 170
3.3.4 Контроль геометрії створеного портрета виготовленого 3D-друком зразком у зменшеному розмірі за еталонним портретом лопаті 171
3.3.5 Обговорення результатів апробації методу прототипування опукло-вгнутих деталей за методом сталого РІ 175
3.4 Ув'язування при прототипуванні складних деталей АК високої точності з роз'ємами та стиками на основі РІ 178
3.4.1 Аналіз існуючих результатів досліджень та формулювання проблеми 178
3.4.2 Розрахунки похибки ув'язування при прототипуванні 183
3.4.3 Вибір способів прототипування деталей та розрахунок похибок (допусків) 186
3.4.4 Розробка пропозицій щодо збільшення точності прототипування деталей високої точності з роз'ємами та стиками 190
3.4.5 Розробка верстатного пристосування для забезпечення високої точності оброблення плоского стику з отворами 192
3.4.6 Перспективи використання підходу до ув'язування при прототипуванні складних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі РІ 195
3.5 Висновки за розділом 197
Розділ 4 ОСОБЛИВОСТІ ПРОТОТИПУВАННЯ ВІДСІКІВ ТА АГРЕГАТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ СКЛАДАЛЬНО-МОНТАЖНИХ РОБОТАХ 199

4.1 Застосування методу безплазового ув’язування форм та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів для зниження трудомісткості та циклу монтажних робіт 199
4.1.1 Метод безплазового ув’язування 204
4.1.2 Дослідження точності геометричних параметрів консольної частини крила та технологічного оснащення на різних етапах виробництва 209
4.1.3 Результати дослідження точності геометричних параметрів консольної частини крила 211
4.1.4 Обговорення результатів експериментів та перспективи 216
4.2 Створення математичних моделей розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів і призначення похибок при його побудові 217
4.2.1 Об’єкт дослідження 218
4.2.2 Розрахунок точності геометричних параметрів обводу носка стабілізатора при складанні 220
4.2.3 Формування портрета стабілізатора 226
4.2.4 Вимоги до точності еталонного портрету стабілізатора 230
4.2.5 Проєктування АЕ стабілізатора з урахуванням даних еталонного портрету 232
4.2.6 Оцінювання коректності результатів побудованого АЕ стабілізатора 234
4.2.7 Аналіз отриманих результатів дослідження та практичне значення 236
4.3 Ув’язування СО, отриманих раніше за ПШМ, при модернізації АК за допомогою РІ технологій 236
4.4 Організаційні та технологічні методи скорочення термінів ТПВ 238
4.5 Висновки за розділом 241
Розділ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ З РІ НА АК СКЛАДНИХ ФОРМ 243

5.1 Створення технології PI, що забезпечує підвищення продуктивності та точності складання АК 243
5.1.1 Аналіз відкритих джерел та постановка проблеми 243
5.1.2 Створення портрета залізу кіля легкого літака 244
5.1.3 Реалізація контролю та порівняння геометрії форм АЕ з портретом залізу кіля легкого літака 248
5.1.4 Аналіз отриманих результатів та надання рекомендацій щодо забезпечення заданої геометричної точності залізу кіля легкого літака 249
5.2 Удосконалення технології прототипування повітряного гвинта 252
5.3 Розробка програмного модуля автоматизованого формування монолітних панелей з керуванням їх форми методом прототипування 257
5.3.1 Методи формування і контролю інтегральних панелей, що застосовуються на виробництві 257
5.3.2 Опис пропонованої технології процесу формування великогабаритних монолітних панелей АК 259
5.3.3 Теоретичні засади пропонованої технології формування великогабаритних монолітних панелей АК 262
5.3.3 Підтвердження теоретичних засад технології формування великогабаритних монолітних панелей АК 264
5.3.4 Перспективи удосконаленої технології формування монолітних панелей 272
5.4 Рекомендації щодо вирішення завдань формоутворення з використанням технології PI під час технологічного підготовлення виробництва 273
5.5 Висновки за розділом 282
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 284
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 288
ДОДАТКИ 321
ДОДАТОК А Акти використання результатів 322
ДОДАТОК Б Список публікацій здобувача за темою дисертації 326

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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 в робочий стан 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 тривалості процесу, а завдяки використанню мобільних 3D-сканерів дає змогу «зняти» геометрію пошкодженого вузла безпосередньо на передовій або в польовому ангарі. Створена цифрова модель як першоджерело інформації можна миттєво відправити на 3D-принтер або верстат з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволить виготовляти деталі-прототипи за лічені години замість тижнів очікування поставок. У результаті при 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; зворотне – 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 в свою чергу говорить 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 в свою чергу дає змогу створити єдине першоджерело інформації такої деталі, тобто її аналітичний еталон (АЕ).

Таким чином технологія РІ реалізовується 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 з ЧПК; виготовлення деталі. Фактично відбувається перетворення отриманого з деталі портрету на еталонний портрет геометричної точності з «нульовими відхиленнями». З цього виходить, що стає достатнім використання портрету, 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.

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**:

– 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;

– 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;

– 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;

– розробити процеси та пристрої для прототипування деталей, вузлів та стиків авіаційних конструкцій із жорсткими вимогами точності;

– 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 проєктування 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:

– **уперше розроблено** науково обґрунтований підхід до вибору ефективного методу реверс-інжинірингу складних за формою деталей, вузлів і агрегатів авіацій-

них 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;

– 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;

– **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;

– 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;

– **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;

– **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.

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, спрямованих на виробництво в умовах жорстких обмежень із забезпеченням заданих показників 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.

Результати дисертаційної роботи опубліковані 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 у базі даних Scopus*, 5 доповідей в Іспанії, Франції, Нідерландах й Швейцарії та отримано 1 патент України на корисну модель.

Робота [19], в якій на базі конструктивно-технологічного аналізу типових авіаційних деталей та конструкцій, що підлягають виробництву або ремонту за технологіями реверс інжинірингу створено класифікатор деталей та вузлів авіаційних об’єктів щодо можливостей реверс-інжинірингу, визначено особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом сканування з високою точністю (0,05 мм), у тому числі з наведеними прикладами застосування класифікатора, виконано без співавторства.

В усіх роботах, виконаних у співавторстві, авторці належать формулювання мети досліджень, розроблення інструментарію дослідження, оброблення результатів, обговорення й формулювання висновків, і додатково: розроблено алгоритм

процесів формоутворення для виготовлення авіаційної техніки при технологічній підготовці виробництва з формуванням вимог до інформаційного супроводу [5, 28, 119]; розроблено й досліджено формування кромок при різних напрямках мікронерівностей утворювальних поверхонь деталей АК, а також виведено залежності для визначення мінімального радіуса заокруглення кромки [44]; удосконалено метод віртуального базування заготовки для оброблення на верстаті з ЧПК, що підвищує її геометричну точність виготовлення [159]; розроблено спосіб реконструкції опукло-вгнутих об'єктів у частині створення єдиної «хмари точок» [168]; запропоновано оцінювання трудомісткості за теоретико-імовірнісним методом виконання робіт зі створення АЕ при вирішенні прямого та зворотного завдань, а також розроблено математичні моделі розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ АК [181]; уведено поняття і метод сталого реверс-інжинірингу деталей складних форм [182]; удосконалено технологічні підходи щодо поновлення геометрії поверхонь деталі та формування аналітичного еталона, включаючи кромки і отвори [225, 234, 236, 238]; удосконалено методологію контролю геометричної точності деталі складної форми (зубчастого колеса) та подано рекомендації щодо вдосконалення національної метрологічної інфраструктури [237, 253, 254]; створено алгоритм вибору оптимальної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей АК при їх прототипуванні за РІ залежно від кількості (партії) та вимог допуску на геометричну точність деталей АК [134]; створено нову методологію прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої геометричної точності їх виготовлення, зменшення трудомісткості та термінів ТПВ [187, 196]; запропоновано систему калібрів та контркалібрів за даними АЕ для збільшення точності прототипування деталей роз'ємів і стиків АК [207]; запропоновано і апробовано принципову схему автоматизованого формування інтегральних панелей з керуванням форми за допомогою 3D-сканування, де реалізується зворотне завдання формоутворення як операції контролю [250, 251, 252]; розроблено шляхи реалізації технології реверс-інжинірингу в існуюче налагоджене виробництво та подано рекомендації із впровадження і реалізації завдань формоутворення на її основі у виробництво АК [90, 233, 256, 257].

Апробація матеріалів 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 СЕУТ-ТОО-2019» (м. Херсон, Україна, 2019); І Міжнародній науково-практичній конференції, присвяч. 60-річчю КЛК ХНУВС (м. Кременчук, Україна, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтеграція фундаментальних та прикладних наук у парадигмі постіндустріального суспільства «ΛΌГОΣ»» (м. Барселона, Іспанія, 2020); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми та перспективи розвитку наукових досліджень» (м. Орлеан, Франція, 2021); І Міжнародній науково-практичній 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).

Структура та 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.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» за планами НДР університету. В основу підготовки й подання дисертації покладено матеріали досліджень, виконані авторкою у межах реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України, в яких авторка брала участь як відповідальна виконавиця: «Конвергенційна технологія суперфінішного оброблення деталей з наноповерхнями 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) та керівниця «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 в рамках 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).

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

– 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 ±0,5 мм на виготовлену деталь, допускається мати складну геометрію з радіусами скруглення від 0,5 мм, перемичками і зміною діаметрів циліндричних поверхонь «сходинками», діаметрами отворів, більшими за 5 мм, і завглибшки не більше діаметра отвору, а також із кутами від 30° і відсутністю різьби;

– 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 ±0,5 мм обґрунтованим є вибір технології штампування. За допуску форми менше ±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 ±0,5 мм рекомендовано використовувати 3D-друк із подальшим ручним зачищенням, а за допуску форми менше ніж ±0,5 мм – верстати із ЧПК або високошвидкісне оброблення під час фрезерування плити або штампованої заготовки;

– 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;

– 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 контркалібрів із використанням спеціального пристосування. Їх використання дають змогу зменшити похибки розмірів стиків до ±0,121 мм. Розроблено та запропоновано верстатне пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу високої точності;

– удосконалено технологію формування великогабаритної панелі АК, 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» та АТ «АНТОНОВ». Створено науково-технічну базу, яка використовується для виконання науково-дослідних робіт і підготовки фахівців в 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).

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Конструктивно-технологічний аналіз типових деталей авіаційних конструкцій, що можуть бути прототиповані

На сьогодні в Україні склалася ситуація, за якої в експлуатації перебуває значна кількість різноманітної зарубіжної техніки авіаційних конструкцій (АК), що постачається країнами-партнерами. Особливістю цієї техніки є те, що вона:

– є складним інженерно-технічним виробом;

– експлуатується в небезпечних умовах із підвищеним ризиком пошкоджень;

– через об’єктивні обставини не завжди може своєчасно та в повному обсязі проходити технічне обслуговування;

– потребує підтримання високого рівня працездатності;

– вимагає оперативного відновлення після пошкоджень;

– містить елементи складної просторової форми;

– характеризується логістичними ускладненнями щодо постачання запасних частин або їх обмеженою доступністю чи припиненням виробництва;

– повинна у найкоротші терміни введена в експлуатацію після відновлення.

Зазвичай техніку, що має важкі пошкодження, слід відправляти для ремонту на спеціалізовані підприємства, вирішуючи при цьому задачу або поновлення/ремонту пошкодженої деталі АК або її відбраковування і повної заміни, що, у свою чергу потребує швидкого опрацювання і визначення технології виробництва. Перешкодою при цьому, крім наведених вище причин, є відсутність будь-якої конструкторської документації (КД) і технологічної документації (ТД) на пошкоджені деталі АК. Отже, перед науковцями постає проблема з якомого швидкого отримання/виготовлення дослідних деталей АК із забезпеченням необхідної якості. У свою чергу це потребує швидкого оцифровування дослідних деталей або відповідної зони її сполучення з отриманням тривимірних моделей. У таких випадках ефективним інструментом є застосування технологій реверс-інжинірингу (РІ), що

забезпечує отримання електронної моделі пошкодженої деталі та створює можливість її подальшого відновлення засобами автоматизованого проєктування [1]. Додатковим чинником ефективного застосування реверс-інжинірингу (РІ) є наявність у більшості складових деталей авіаційної та наземної техніки симетрично віддзеркалених пар. За таких умов тривимірна модель пошкодженої або зруйнованої деталі може бути сформована шляхом сканування геометрії вцілілої парної деталі з подальшим віддзеркаленням отриманої цифрової моделі. Слід зауважити, що зменшення часу на ремонтні роботи є можливим при скануванні пошкодженої деталі на місці розташування АК та передачі отриманих «сканів» за допомогою Internet-ресурсів на ремонтне підприємство. Наступним стане створення КД і ТД, виготовлення та/або ремонт дослідної деталі АК за умов забезпечення вимог щодо якості і мінімального часу. Отже, нову виготовлену або відремонтовану деталь транспортують і встановлюють на відповідний виріб АК на місце його розташування/експлуатації до пошкодження.

Слід зазначити, що створену конструкторську (КД) та технологічну документацію (ТД) можна передавати в електронному вигляді до мобільних виробничих підрозділів, зокрема пересувних аварійно-ремонтних майстерень та рухомих модулів технічного обслуговування, для виконання оперативного ремонту безпосередньо на місці розташування пошкоджених АК. У такому випадку практичні роботи з розбирання та складання вузлів, виготовлення технологічних болванок і виколочування за ними металевих деталей з листового матеріалу або форм для виклеювання композитних деталей, а також виготовлення деталей методами механічної обробки можуть виконуватися безпосередньо в умовах цих мобільних майстерень.

Використання таких підходів зменшує загальний час на ремонт/заміну пошкодженої деталі АК завдяки відсутності транспортування пошкодженої деталі та виробу АК на ремонтне підприємство і повернення для заміни новою. Суттєвим тут є лише дороговартісне обладнання, що використовується при скануванні та оцифровуванні дослідних деталей АК, а також обладнання, що використовується при виготовленні деталей за адитивними і екстрактивними технологіями.

Тому для зменшення витрат ремонтних підприємств проаналізуємо, які саме деталі АК доцільно відновлювати методом РІ з погляду мінімізації витрат часу із забезпеченням заданої точності на виготовлення деталі АК. Логічно припустити, що це мають бути деталі, що формують зовнішні аеродинамічні контури виробу (рис. 1.1 – 1.4[1]).



Рис. 1.1 – Типові елементи аеродинамічних обводів літака, що можуть бути швидко відновлені або відремонтовані у польових умовах завдяки використанню реверс-інжинірингу (схематичне та фотографічне зображення): 1 – носовий обтічник; 2 – накривки антен радіоелектронного обладнання; 3 – обшивка носка крила; 4 – обшивка носка стабілізатора; 5 – обшивки носків кілів; 6 – закінцівки крила та стабілізатора

Перш за все виключаємо з розгляду силові деталі та елементи конструктивно-силової схеми. Вони мають ремонтуватися та відновлюватися виключно на спеціалізованих авіаремонтних підприємствах. Також не будемо розглядати плоскі панелі та панелі одинарної кривизни – вони легко відновлюються і без використання комп’ютерних технологій. Таким чином, доходимо висновку, що найпридатнішими до відновлення методом РІ є панелі подвійної кривизни, обтічники, накривки та ковпаки антен радіоелектронного обладнання АК, лючки, залізи, закінцівки, кронштейни навісу тощо. Окремо зазначимо обшивки носків крил, стабілізаторів

[1] Усі схеми та фотографії взято з відкритих джерел без прив’язування до типу та моделі літального апарата, країни походження та реєстрації.

та кілів з одинарною кривизною, що мають крутовигнутий профіль, точність виготовлення якого критично впливає на аеродинамічні характеристики авіаційного виробу. Крім того, у такий спосіб можна ремонтувати і невеликі рульові поверхні на кшталт хвостових стабілізаторів на балці гелікотера.

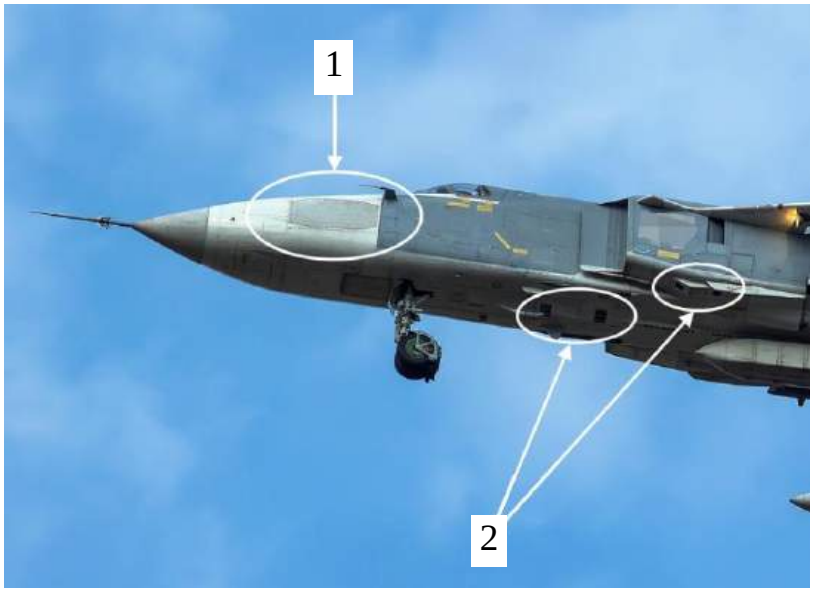


Рис. 1.2 – Деталі літака, що підлягають заміні: 1 – радіопрозора панель бічної поверхні; 2 – накривки обладнання оптичної розвідки



Рис. 1.3 – Ковпак електронного обладнання розвідувального літака



Рис. 1.4 – Хвостова балка та стабілізатор гелікоптера

Зазначені елементи мають різні розміри від десятків сантиметрів до метра і більше, виготовляються з легких алюмінієвих сплавів або полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Типові види пошкоджень авіаційних агрегатів і вузлів, які можуть бути оперативно відновлені за допомогою РІ, показано на рисунках 1.5 – 1.10[1].



Рис. 1.5 – Приклади пошкодження носового обтічника фюзеляжу літака



Рис. 1.6 – Приклад пошкодження накривки з ПКМ на передній кромці фюзеляжу літака



Рис. 1.7 – Приклад пошкодження бічної поверхні подвійної кривизни транспортного літака



Рис. 1.8 – Приклад пошкодження закінцівки крила літака



Рис. 1.9 – Приклад пошкодження передньої кромки з ПКМ стабілізатора літака



Рис. 1.10 – Приклад пошкодження люків подвійної кривизни фюзеляжу гелікоптера

Як зазначалося раніше, мова йде про відносно незначні пошкодження, такі як пробоїни, розриви, деформації або часткова втрата елементів конструкції. Основна сутність ремонту в цих випадках полягає у ліквідації наскрізних дефектів, які не лише погіршують аеродинамічні характеристики виробу, а й спричиняють проникнення повітряного потоку під час польоту. Це призводить до значного підвищення внутрішнього тиску агрегату авіаційного виробу, що в окремих випадках може спричинити його руйнування зсередини.

На рисунках 1.11 та 1.12 представлені приклади типових пошкоджень: кронштейн системи керування літака зі зношеною внутрішньою поверхнею та золотник плунжерної пари авіаційної гідросистеми зі зношеною зовнішньою поверхнею



Рис. 1.11 – Кронштейн системи керування літака зі зношеною внутрішньою поверхнею



Рис. 1.12 – Золотник плунжерної пари авіаційної гідросистеми зі зношеною зовнішньою поверхнею

Окрім деталей фюзеляжу, крил та оперення авіаційних конструкцій (АК), можна значно спростити та прискорити тимчасовий ремонт інших систем, який повинен бути виконаний оперативно. У цьому контексті найбільш ефективним є відновлення рухомих з'єднань пар деталей типу «вал-в-отворі», зокрема осей і втулок, в яких вони обертаються, кронштейнів і качалок системи керування, плунжерних пар гідросистем тощо.

Суть робіт полягає в наступному: спочатку деталі пари перевіряються на дефекти, визначається, яка з них менш зношена. Далі, шляхом відтворення її геометрії, наприклад 3D-скануванням, визначаються фактична форма та розміри зношених посадкових місць. На основі цих даних виготовляється нова парна деталь, розміри якої забезпечують оптимальну відповідність до реальних параметрів посадкових місць.

1.2 Перспективні методи реверс-інжинірингу при створенні авіаційних деталей і конструкцій та їх контролю

Реалізація РІ починається зі сканування – оцифрування досліджуваного виробу за допомогою координатно-вимірювальних машин (КВМ) та/або лазерних 3D-сканерів [1]. Залежно від вибраного обладнання та технологічних операцій, що використовують для здійснення зворотного проєктування, на сьогодні виділяють декілька методів РІ.

Контактний метод характеризується такими перевагами: простота використання; ефективність сканування призматичних виробів; невеликий обсяг даних, отриманих у процесі вимірювання дослідної деталі; відносно низька трудомісткість побудови тривимірних моделей; незалежність якості вимірювання від умов освітлення. До недоліків методу відносяться: висока трудомісткість процесу вимірювання (за одне переміщення щупа визначається координата лише однієї точки), а в окремих випадках неможливість вимірювання криволінійних поверхонь та деталей малих розмірів.

Безконтактні методи включають фотограмметрію, томографію та метод лазерного випромінювання. Перевагами фотограмметрії є низькі витрати на обладнання та відсутність контакту з поверхнею, координати якої необхідно визначити. До недоліків методу належать складність установки фотокамер та нанесення точок прив’язки, а також потреба у великій кількості камер (до шести) для забезпечення точного калібрування; велика трудомісткість зшивання великої кількості зображень, що мають перетинатися один з одним, для отримання електронної моделі, необхідність яких обумовлена досягненням заявленої виробником точності процесу (вертикальна – 5…15 см і горизонтальна – 10…30 см). Однак останнє не відповідає вимогам щодо точності для авіаційних деталей та виробу в цілому, тому фотограмметрія знайшла своє широке використання у сільському господарстві, картографії, архітектурі, екологічному моніторингу тощо.

Томографія базується на дослідженні внутрішньої структури об’єкта шляхом його багаторазового просвічування під різними взаємно перетинаючими

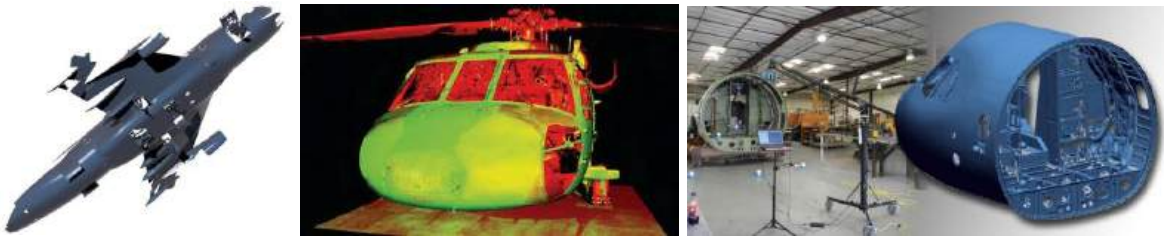
напрямками. До переваг цього методу належать висока швидкість сканування (до 1 млн точок за один вимір), висока точність (від 0,5 до 10 мм) і деталізація елементів виробу, а також відсутність контакту зі сканованою поверхнею. Серед недоліків томографії слід виділити стаціонарність установки, що виключає можливість мобільного сканування; обмежену здатність до сканування дрібних деталей та внутрішніх поверхонь; залежність точності від яскравості; високу вартість системи та необхідність подальшої обробки для об'єднання отриманих хмар точок у єдину полігональну модель.

Лазерний метод сканування базується на проєктуванні лазерного променя на поверхню об'єкта. До переваг цього методу належать відносно невисока вартість сканерів порівняно з контактними координатно-вимірювальними машинами (КВМ); можливість сканування поза приміщенням завдяки переносним пристроям; здатність до сканування за різних умов освітленості; відсутність контакту з поверхнею об'єкта; а також можливість сканування об'єктів, недоступних для структурованого методу білого світла. Найбільш суттєвим недоліком лазерного сканування є складність обробки прозорих, чорно-білих об'єктів та об'єктів із високим ступенем світловідбиття. Однак це вирішується використанням тальку на поверхні, що не суперечить вимогам з точності від 0,05 до 0,1 мм на вимірювання.

Ряд компаній, що спеціалізуються на 3D-скануванні літаків, застосовують інтерференційні фазозсувні лазерні сканери (рис. 1.13). Одним із таких пристроїв є 3D-сканер Surphaser, який працює на довжині хвилі 1550 нм, що втричі перевищує довжину хвилі сканерів ближньої дії, таких як Creaform HandySCAN або Artec Spider (650 нм). Максимальна відстань проведення сканування, що визначає максимальну довжину об'єкта, становить 250 м.

У випадках сканування важкодоступних ділянок та при необхідності досягнення високого локального ступеня деталізації (розмір об'єктів сканування 10–1000 мкм) застосовується комбіноване сканування, наприклад із використанням Surphaser і Creaform HandySCAN [2–3].

Технологія РІ на базі КВМ типу «рука», де замість контактного щупу використовують лазерний сканер, що сканує в середньому шириною 110-115 мм і має повністю автоматичне налаштування часу експозиції, реалізує безконтактний метод. При заміні сканеру на шуп, такий РІ стає контактним.



а б в



г д

а – відсканована нижня частина фюзеляжу Boeing 747 [3]; б – відсканований фюзеляж гелікоптера Black Hawk [2]; в – кокпіт літака [2]; г – транспортний літак [2]; д – пасажирський літак [2]

Рис. 1.13 – Приклади повнорозмірних тривимірних полігональних моделей великих об'єктів, що відскановані

Наприклад, моделі координатно-вимірювальної руки «Absolut Arm» (Hexagon MI ROMER, Франція) суміщуються з лазерним сканером RS5 Laser Scanner [4]. Вимірювальна рука дає змогу проводити розмірний контроль виробів з листового металу, пластикових компонентів, виробів з вуглепластику, литих призматичних деталей тощо для спеціальних або прецизійних метрологічних завдань.

Технологія РІ на базі контактних КВМ набула широкого використання при контролі, ремонті та відновленні авіаційних деталей та конструкцій. Це пояснюється забезпеченням вимірювань з високою точністю, а саме від 0,0015 мм до 0,01 мм. Зазначимо, що геометрія деталей АК складна і особливо це стосується зовнішніх обшивок, які мають подвійну кривину. Тому при використанні шаблонних методів контролю накопичені відхилення при їх виготовленні та складанні також

переносяться на АК, що, у свою чергу, зменшує загальну точність АК. Сучасне обладнання, що використовується за технологією РІ, дає змогу відтворити геометрію АК з точністю 0,01 мм і більше, а існування АЕ в автоматизованих системах CAD/CAM/CAE усуває потребу у матеріальних витратах на виготовлення додаткової шаблонної оснастки [5]. Також це стосується авіаційних виробів радянського часу розроблення, які підлягають ремонту та які слугують базою для створення подальших модифікацій, актуальним для яких є оцифрування [6]. Отже контроль точності за технологією РІ, порівняно з традиційними шаблонними технологіями, реалізується на основі порівняння отриманої скануванням або вимірюваннями тривимірної моделі з АЕ дослідної деталі. Тому РІ є комплексною процедурою, що передбачає внесення суттєвих змін у виробничі процеси з метою мінімізації використання виробничих ресурсів, скорочення тривалості та вартості виробничого циклу, а також підвищення якості продукції. [7].

У роботі [8] поняття «реверс-інжиніринг» подано як коректні рекомендації щодо зміни параметрів технологічного процесу з метою подальшого створення нового або вдосконаленого виробництва об’єкта. Проте це визначення не дає повної картини відповідно до стандартних визначень, наведених у [7]. У роботі [9] здійснено спробу описати процес РІ за допомогою нейронних мереж та запропоновано модель застосування цієї технології в промисловості. Однак, на жаль, наведена модель не підтверджена практичними впровадженнями та реалізацією. У роботі [11] представлені результати застосування РІ для 3D-моделювання лопаті гвинта турбогвинтового двигуна. Показано, що імпорт і експорт файлів у CAD-системах іноді призводить до втрати геометричної інформації. В [12] описано модель експертної системи РІ технологічного обладнання в переробній промисловості з використанням штучного інтелекту та систем прийняття рішень, проте її реалізація на початковому етапі є надзвичайно дорогою. РІ у АК найчастіше застосовують на етапах контролю та вимірювань у складі автоматизованих або роботизованих систем складання АК [13]. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, докладного розгляду РІ АК як інженерного методу вивчення конструкцій не виконано. Точна інформація про геометрію, структуру, конструкцію та функціонування

АК дозволяє отримувати просторові дані для подальшого дублювання або удосконалення виробу, що, у свою чергу, забезпечує високий рівень науково-технічного прогресу. Саме такий підхід наведено в роботах [14, 15], де просторову інформацію представлено як цифровий макет у єдиному середовищі дизайну, що включає сукупність електронних документів на виріб. Проте в роботах не показано апробацію підходу та його взаємозв'язок із засобами технологічного оснащення. Варіантом подолання цієї проблеми може бути застосування технології прототипування за рекомендаціями роботи [16]. Цифровий макет формується на основі аналітичної елементної (АЕ) геометрії та форми виробу, що будується за аксіомами метричної геометрії Евкліда, Гільберта або Біркгофа [17].

Якщо є АЕ дослідного об'єкта, то це спрощує контроль на базі технологій РІ скануванням реально існуючого дослідного об'єкта та порівнянням отриманого портрета з АЕ. За такою технологією можна лише отримати результати з геометрії та форми дослідного об'єкта і не зрозуміло, чи є вони достатніми для висновків з адекватності контролю. Цей факт дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення досліджень у цьому напрямку.

Наявність АЕ дослідного об'єкта спрощує контроль за допомогою технологій РІ, оскільки дозволяє сканувати реально існуючий об'єкт та порівнювати отриманий цифровий портрет із АЕ. Проте така технологія надає інформацію лише про геометрію та форму об'єкта, і невідомо, чи достатньо цих даних для формування обґрунтованих висновків щодо адекватності контролю. Цей факт свідчить про доцільність проведення додаткових досліджень у цьому напрямку.

Отже, метод РІ визначається методом отримання тривимірної моделі – АЕ як першоджерела ув'язування і визначення технології з подальним виготовленням дослідної деталі (рис. 1.14) [18].

На першому етапі виконуються конструктивно-технологічний аналіз дослідної деталі АК та підготовка її до сканування.

Наступним етапом є безпосереднє сканування, яке полягає в координатному вимірюванні поверхні дослідного об'єкта – визначенні координат окремих точок

або системи точок у прийнятій системі координат з подальшою математичною обробкою для визначення лінійних і кутових розмірів, відхилень форми та розташування. Цей етап є надзвичайно важливим у процесі РІ, оскільки оброблені відскановані поверхні дозволяють отримати високоточний портрет АК у вигляді «хмари точок» виміряної поверхні.

Дані вимірів портрета зазвичай не мають топологічної інформації і тому перетворюються на файли сітчастих структур із трикутною формою елементів (STL).



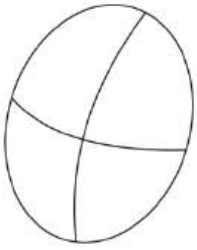
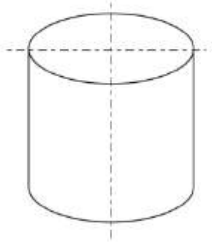
Рис. 1.14 – Блок-схема РІ деталей АК [18]

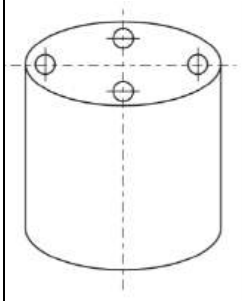
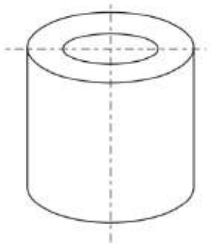
Наступним етапом є експорт файлу «*.STL» і моделювання у будь-якому доступному форматі, такому, як сукупність поверхонь неоднорідних раціональних сплайнів NURBS або твердотільна модель у програмах CAD (SolidWorks, CATIA, Geomagic Design nf та ін.). Отримана CAD-модель стає основою для опису аналітичної геометрії деталі, що, у свою чергу, з легкістю буде використано у її виготовленні за будь-якою обраної технологією. Важливим є і те, що порівняння отриманого портрета з оригінальної деталі з АЕ є реалізація контролю виробництва.

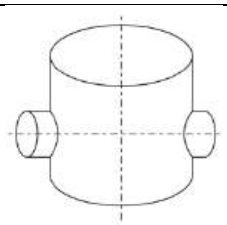
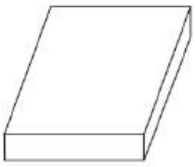
1.2.1 Систематизація деталей, вузлів та агрегатів авіаційних конструкцій за критерієм можливості їх прототипування методом реверс-інжинірингу

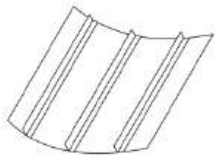
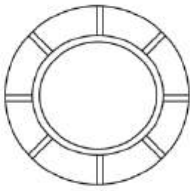
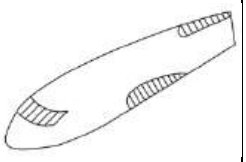
Отже, АК характеризується багатодетальністю, великою номенклатурою елементів та значною кількістю технологічних процесів, що застосовуються для їх виготовлення. З метою скорочення часу проведення технологічних операцій сканування та створення АЕ під час досліджень було здійснено систематизацію деталей і вузлів АК за певними ознаками та сформовано класифікатор (табл. 1.1).

Табл. 1.1 – Класифікатор деталей та вузлів АК щодо можливостей РІ [19]

№ п/п	Група деталей	Представники у конструкції АК	Особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом	
			Оптичні сканери	КВМ типу рука
1		Деталі простої форми без кромок і отворів	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості (маркери, скотч тощо) для спрощення об’єднання отриманих відсканованих поверхонь в портрет
2		Деталі циліндричної форми з кромками	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості. Кромки скануються під кутом 90º

№ п/п	Група деталей	Представники у конструкції АК	Особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом	
			Оптичні сканери	КВМ типу рука
3		Деталі циліндричної форми з отворами невеликих (від 5 мм) діаметрів	Необхідно враховувати, що на кожен кард має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь має отвори, то їх необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень (щоб в результаті отримати достатню кількіть інформації про цей отвір)	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості. Кромки скануються під кутом 90º. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількіть інформації з геометрії про цей отвір. Також необхідно враховувати особливості роботи лазерних сканерів, а саме: відтворення геометрії поверхні отвору на глибину не більше діаметру
4		Деталі циліндричної форми з отворами великих (від 15-20 мм) діаметрів	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь має отвори, то їх необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень (щоб у результаті отримати достатню кількіть інформації про цей отвір)	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості. Кромки скануються під кутом 90º. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень, щоб в результаті отримати достатню кількіть інформації з геометрії про цей отвір. Також необхідно враховувати, що через особливості принципу роботи лазерних сканерів, можна отримати так званий «ефект чаші», коли лазер фізично не може зібрати інформацію про глибину оворів на більше ніж діаметр цього отвору

№ п/п	Група деталей	Представники у конструкції АК	Особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом	
			Оптичні сканери	КВМ типу рука
5		Деталі циліндричної форми, що перетинаються	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості. Кромки та місця перетинів скануються під кутом 90º
6		Деталі типу «обшивки» з кривизною, що мають невелику товщину (менше 3 мм)	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери на зовнішній і внутрішній поверхнях, а також вздовж контуру деталі для виділення кромки. Якщо деталь не жорстка і має тонку товщину кромки (1…3 мм), то сканування рекомендується виконувати в одному положені із забезпеченням форми і жорсткості	
7		Деталі типу «пластини», що мають значну товщину (від 3-5 мм)	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери. Якщо деталь жорстка, має рівномірну товщину і геометрію по всій довжині, то її можна поставити на підставку і сканувати в одному положенні. Якщо ж вона має різну геометрію по товщині, то слід сканувати в трьох положеннях (знизу, зверху, на ребрі) так, щоб відскановані поверхні перетиналися одна з одною. Якщо деталь не жорстка, то сканування рекомендується виконувати тільки в одному положені (див. п. 6)	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об’єднання різних сканувань. Кромки скануються під кутом 90º. Дозволяється виміряти контактним способом

№ п/п	Група деталей	Представники у конструкції АК	Особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним способом	
			Оптичні сканери	КВМ типу рука
8		Вузли – панелі з набором деталей, що з'єднані з обшивками	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні/текстурні маркери	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Кромки скануються під кутом 90º
9		Вузли – шпангоути та нервюри з набором деталей, що з'єднані з ними	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Скануємо з багатьох ракурсів, а також мінімум з трьох положень	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Кромки скануються під кутом 90º
10		Агрегати та вузли АО	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань. Кромки скануються під кутом 90º
11		Агрегати великих габаритів та їх вузли	Необхідно враховувати, що на кожен кадр має припадати мінімум 3 геометричні/текстурні маркери. Для підвищення точності можна додатково використовувати фотограмметричні набори	Якщо деталь сканується з декількох сторін (положень), рекомендується додавати геометричні особливості для спрощення об'єднання різних сканувань

Застосування класифікатора дозволило зробити висновки щодо можливостей використання методів РІ для різних груп деталей АК. Його створення базувалося на ідеї визначення придатності тієї чи іншої групи деталей до прототипування за-

лежно від технічних можливостей різних сканерів та інших вимірювальних пристроїв, а також на визначенні необхідного обладнання для реалізації процесу прототипування. Особливу увагу слід приділити оптичним сканерам: при скануванні прозорих, чорних або блискучих деталей поверхню перед вимірюванням необхідно попередньо заматовувати (наприклад, нанесенням тальку). Частково це також стосується лазерних сканерів, що працюють за технологією червоної лазерної лінії. Для сканерів із синім лазером проблеми виникають лише з прозорими об’єктами.

При формуванні класифікатора враховано, що точність полігональної моделі безконтактного сканування напряму залежить від точності виготовлення деталі, а точність відтворення кромок – від роздільної здатності сканера. Наприклад, кромки з радіусом заокруглення 0,1 мм оптичними сканерами скануються з точністю не більше 0,1 мм, що недостатньо для оцінювання якості поверхні кромки. Цю проблему вирішують комбінацією КВМ типу «рука» зі сканером і/або щупом, оскільки точність контактних вимірів на порядок перевищує точність безконтактних.

Для сканування вузлів і агрегатів їх попередньо розбирають на окремі деталі, щоб кожну можна було оцифрувати індивідуально.

У класифікаторі також враховані особливості процесу отримання полігональної моделі безконтактним скануванням:

– для оптичних сканерів на кожен кадр має припадати мінімум три геометричні або текстурні маркери;

– отвори скануються під різними кутами та з великої кількості положень для отримання повної геометричної інформації;

– деталі достатньої жорсткості можна сканувати в одному положенні; якщо геометрія з обох сторін однакова, достатньо відсканувати одну сторону та торець для визначення товщини; при різній геометрії необхідно сканувати у трьох положеннях (знизу, зверху, на ребрі);

– не жорсткі деталі скануються тільки в одному положенні;

– великогабаритні деталі потребують додаткових фотограмметричних наборів для повного охоплення.

Для КВМ типу «рука» обов’язково додавати геометричні маркери (наприклад, скотч) з усіх боків деталі для спрощення об’єднання отриманих поверхонь у єдиний портрет. Кромки скануються під кутом 90°. Отвори необхідно сканувати під різними кутами з великої кількості положень для отримання повної інформації про їх геометрію. Враховується також «ефект чаші» лазерних сканерів, коли лазер не може зафіксувати глибину отвору більшу за його діаметр.

1.3 Аналіз характеристик якості поверхонь авіаційних деталей та конструкцій, методів формоутворення поверхонь, геометрії, обладнання та інструменту, що застосовуються

Якість деталі визначається ступенем її відповідності номінальним (еталонним) значенням: форми та розмірів (макрогеометрії та мікрорельєфу), фізико-хімічних властивостей матеріалу та поверхневого шару, а також рівня його промислової чистоти.

Термін «аналітичний еталон» найточніше відображає зміст і значення моделі, що математично описує геометрію деталі. Така модель формується як об’єднання елементарних об’ємів, поверхонь, ліній і точок і розробляється засобами та інструментами CAD-систем [5].

1.3.1 Точність розмірів деталей

Зростаюча складність конструкцій виробів аерокосмічної галузі призвела до прямого зв’язку між якістю виробу та точністю розмірів і форм окремих деталей конструкції. Точність формоутворення визначається умовами роботи деталі у складі виробу, оскільки сучасні високошвидкісні та потужні машини не можуть ефективно функціонувати при недостатній точності виготовлення їх складових частин та складальних одиниць.

Поверхня, що обмежує деталь і відокремлює її від навколишнього середовища, визначається як реальна поверхня [20–23]. Вона утворюється в процесі формоутворення та відрізняється від номінальної (еталонної) поверхні.

Оцінка якості виготовлення деталі передбачає порівняння її реальної поверхні з еталоном. Для цього формується модель геометрії реальної деталі або її окремого фрагмента у вигляді «хмари точок» (англ. point cloud), яка отримує назву портрет деталі. Відхилення портрета від еталонного зразка (3D-моделі деталі) відображає похибки формоутворення та характеризує відповідність деталі встановленим нормативам.

Термін «3D-модель» означає зв'язне тверде тіло, яке володіє заданою сукупністю властивостей і формується в результаті виконання операцій технологічного процесу. Основними ознаками цієї моделі є наявність у неї трьох типів характеристик:

1) геометрії – одним або декількома рівняннями поверхні:

$$F_A(F_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД})=0, \quad (1.1)$$

де в системі координат (0, X, Y, Z), яка міцно зв'язана з твердим тілом, ($X_{ГД}$, $Y_{ГД}$, $Z_{ГД}$) – координати граничних точок деталі (ГД – геометрія деталі);

2) сукупності поверхневих матеріальних (фізико-хімічних) параметрів, що залежать від точки вимірювання на поверхні деталі:

$$\alpha_{iД}= \alpha_{iД} (X_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД}), \quad (1.2)$$

де i – умовний номер поверхневого параметра, наприклад твердості;

3) групи об'ємних матеріальних параметрів, наприклад $\beta_{jД}$, що вимірюються в областях, які лежать усередині деталі:

$$\beta_{jД}= \beta_{jД} (X_{ГД}, Y_{ГД}, Z_{ГД}), \quad (1.3)$$

де j – номер об'ємного параметра, наприклад місцевої площини, модуля пружності, склад хімічних елементів та ін.

У дослідженнях роботи вважається, що для досягнення поставленої мети та вирішення задач, що випливають із мети, достатньо обмежитись першими двома ознаками.

Під похибкою виготовлення, її точністю розуміють відхилення отриманого при виготовленні значення геометричного або іншого параметра від заданого (еталонного) [21, 22].

Абсолютну похибку виражають в одиницях аналізованого параметра [24]. Макрогеометричні відхилення, що характеризують точність деталі, розглядають на великих ділянках реальної поверхні деталей:

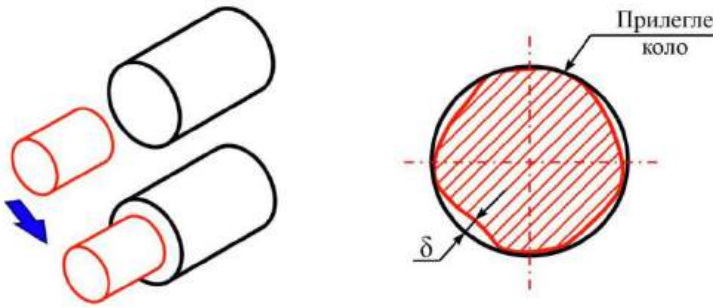
$$\Delta X = X_P - X_E, \tag{1.4}$$

де X_P и X_E – відповідно реальне та еталонне значення параметра. Відношення абсолютної похибки до еталонного значення параметра називають відносною похибкою, тобто $\Delta X/X_E$ або $\Delta X/X_E$ помножене на 100 %. Кількісно точність характеризується оберненою величиною модуля відносної похибки $|\Delta X / X_E|^{-1}$.

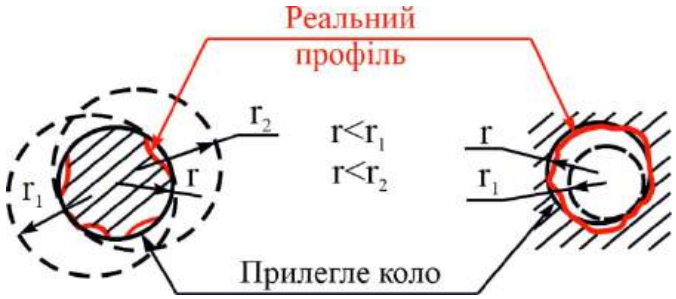
Термін «відхилення форми заданого профілю» визначається відповідно до [5] як найбільше відхилення точок реального профілю від відповідних точок номінального профілю, яке визначається по нормалі в межах нормованої ділянки. Вимірювання цього відхилення вимагає наявності вимірювального пристрою, здатного виконати відповідний тип контролю. Для забезпечення високої точності необхідно обирати сучасні КВМ, які дозволяють виконувати вимірювання складнопрофільних поверхонь шляхом переміщення вимірювального інструменту по нормалі до номінальної поверхні в кожній точці реальної деталі.

1.3.2 Забезпечення форми деталей

Якість виробу залежить від правильності форми деталей, що виявляється при їх спільній роботі у складі вузлів та механізмів. У зображеному на рисунку 1.15 з’єднанні величина максимального відхилення реальної поверхні внутрішнього циліндра від еталонної δ задовольняє вимогам допуску, але форма бічної поверхні внутрішньої деталі істотно відрізняється від циліндричної. У процесі складання у результаті контактних деформацій поверхонь, що з’єднуються, будуть зазнавати якісних змін. Ці деформації також можуть призвести до зміни взаємного положення окремих поверхонь деталей, що впливає на якість виробу в цілому. Нерівності на реальних поверхнях розрізняються масштабом і відіграють різну роль при контактній взаємодії деталей. Прийнято розрізняти чотири види відхилень від заданої – еталонної геометричної форми поверхні: макровідхилення, хвилястість, шорсткість і субшорсткість [22, 24, 25].



а



б

а – з’єднання циліндичних поверхонь; б – відхилення внутрішньої форми

Рис. 1.15 – Схема встановлення відхилень форми деталі від номінальної [5]

На рисунку 1.16 подано класифікацію нерівностей на поверхні деталей, що утворюються в процесі тертя та зношення деталей.

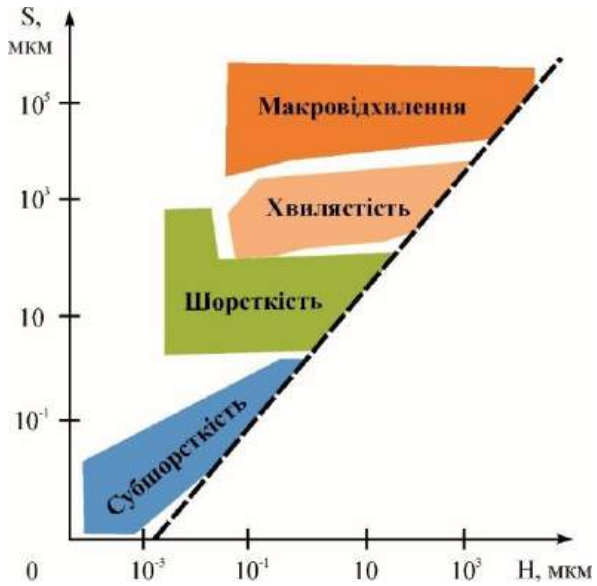


Рис. 1.16 – Класифікація нерівностей на поверхні деталей [5]

До макровідхилень належать одиничні, неповторні відхилення форми від номінальної (еталонної) геометрії (опуклість, увігнутість, конусність тощо) [26]. Макровідхилення виникають через похибки внаслідок неточностей виготовлення верстата та інструменту, а також впливу пружних деформацій, що спричиняються під дією змінних сил різання [27].

На виступах, що утворюють шорсткість, є ще дрібніші нерівності – субшорсткість. Субшорсткість значною мірою визначається структурою оброблюваного матеріалу та його напруженим станом [28]. Електронно-мікроскопічні дослідження поверхонь показують, що субшорсткість утворюється нерівностями, що мають висоту 2...20 нм.

1.3.3 Хвилястість та шорсткість деталей

Хвилястість є наслідком коливань, що виникають у процесі оброблення [29]. Хвилястість поверхні – це сукупність періодичних, регулярно повторюваних, близьких за розмірами виступів і западин, відстань між якими значно більша, ніж у нерівностей, що утворюють шорсткість поверхні [21, 22]. Шорсткість поверхні значною мірою визначається структурою оброблюваного матеріалу та його напруженим станом [30]. Зміна шорсткості поверхні відбувається внаслідок тертя та зношування, що спричиняє процеси пластичного деформування, втомного руйнування, а в окремих випадках – мікрорізання та глибинне виривання матеріалу. [31]. Шорсткість виміряють за національними стандартами, що грунтуються на двовимірному оцінюванні параметрів шорсткості. Останнім часом набуло популярності тривимірне оцінювання параметрів шорсткості за стандартами країн ЄС та США [32, 33].

1.3.4 Технологічна спадковість

Фізико-хімічні та механічні властивості поверхневого шару, його дефектність та залишкові напруження можуть суттєво відрізнятися від властивостей матеріалу основи. Кожен із показників якості поверхні має власну технологічну істо-

рію: деякі виникають у ливарному виробництві, інші – у прокатному, волочильному, ковальсько-пресовому, механічному, зварювальному чи гальванічному процесах. Це породжує поняття технологічної спадковості.

Технологічною спадковістю називають явище перенесення властивостей об'єкта від попередніх технологічних операцій до наступних. Термін дозволяє всебічно пов'язати вихідний стан заготовки з її станом у будь-який момент виробничого циклу, аж до перетворення заготовки на готову деталь [34]. Аналогічним чином існує поняття експлуатаційної спадковості, що описує перенесення властивостей під час експлуатації виробу. При механічному обробленні різанням успадковується значна частина властивостей заготовки. Вихідні нерівності поверхні заготовки (макровідхилення, хвилястість та шорсткість) призводять до нерівномірності глибини різання, а відтак – до змін сили різання та виникнення вимушених коливань інструменту відносно оброблюваної поверхні. Ці коливання впливають на формування нерівностей при остаточному обробленні деталей. Відхилення заготовок від круглості у вигляді овальності частково переносяться на готові вироби.

Таким чином, формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару при лезвійній обробці значною мірою визначається вихідним станом заготовки. Зона поверхні після механічного оброблення неоднорідна й складається з декількох шарів (рис. 1.17).

Межовий шар 1 складається з адсорбованої плівки газів, вологи, адсорбуючих частинок й мастильно-охолоджувальних технологічних засобів (МОТЗ).

Шар 2 – деформований, сильно роздроблений метал з спотвореною решіткою кристалів і безвуглецевими ділянками під впливом високих температур при механічному обробленні; в ньому знаходяться оксиди й нітриди, порожнечі, надриви й тріщини (рис. 1.18).

Шар 3 складається із зерен, сильно деформованих під дією тиску.

Шар 4 – метал із вихідною структурою.

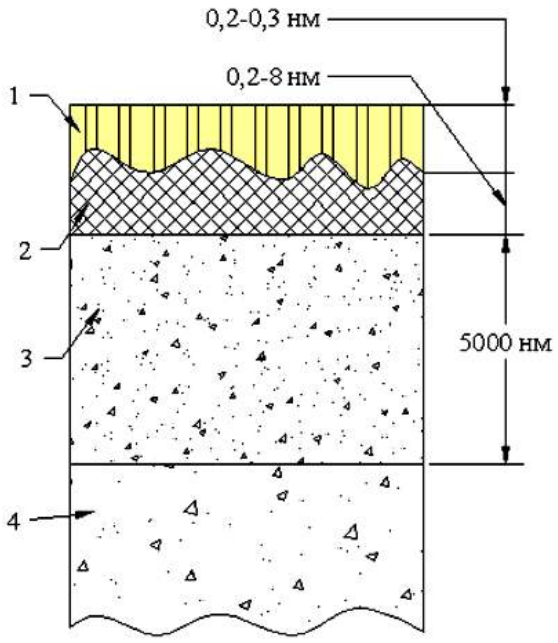


Рис. 1.17 – Структура поверхневого шару після закінчення лезвійного оброблення [5]



Рис. 1.18 – Утворення задирок на кромках заготовок

При фінішному обробленні (абразивними брусками, стрічками тощо) шар 1 не змінюється по товщині, а шари 2 і 3 зменшуються відповідно до меншого тиску й температури поверхні при оброблюванні. Поверхневий шар залежно від зазначених вище обставин має товщину при точінні від 0,25 до 2,0 мм, при шліфуванні – від 12 до 75 мкм, при тонкому шліфуванні – від 2 до 25 мкм, при поліруванні – 0,2 мкм.

Технологічне успадкування виявляється завжди, як об’єктивна реальність фіксації пам’яті в металі про попередні технології оброблення матеріалів. Тому при формуванні ТП можуть створюватися «бар’єри», які перешкоджають передачі негативних властивостей у спадок. Такими бар’єрами можуть бути технології термічного, лазерного та лазерно-плазмового оброблення поверхневого шару.

1.3.5 Промислова чистота поверхні

Промислова чистота (ПЧ) визначається як стан виробів, елементів виробів, технологічних середовищ (зон) та технологічного обладнання, який характеризується

присутністю забруднювача та враховується при конструктивно-технологічному забезпеченні якості продукції на всіх стадіях її життєвого циклу виробу (ЖЦВ) [35–37]. Забруднювачем може бути будь-яка стороння енергія або речовина (частинки, рідини, гази, енергія у вигляді теплоти, статичної електрики, радіації тощо), що в технологічному середовищі негативно впливає на надійність, безпеку та економічність продукції. Процес забруднення можна розглядати як поєднання проникнення забруднювача в технологічне середовище (зону) та генерації забруднювача безпосередньо у цьому середовищі.

Оцінювання норм ПЧ здійснюється через систему гранично допустимих рівнів вмісту забруднювача в продукції та технологічному середовищі (зоні) на конкретній стадії ЖЦВ, що відповідають певному класу ПЧ [9]. Клас ПЧ є кодованим позначенням відповідності продукції або технологічного середовища встановленим нормам промислової чистоти.

Методи лезвійного оброблення, крім забезпечення високої точності розмірів деталей, є основним джерелом зміни геометрії кромок інструменту та оброблюваних поверхонь, а також джерелом технологічних забруднень. Під час різання завжди утворюються задирки на кромках (рис. 1.19). Їх повне видалення лезвійним інструментом неможливе – застосування інструменту призводить до утворення вторинних задирок меншого розміру.



Рис. 1.19 – Утворення задирок на кромках заготовок [5]

Частинки задирок або матеріалу інструменту, потрапляючи у гідравлічну або пневматичну систему, переносяться робочим середовищем по всій системі та пошкоджують або порушують роботу найбільш чутливих елементів: манжетних ущільнень, золотників, плунжерних пар, підшипників, зубчастих передач, деталей замків, клапанів тощо. Задирки спричиняють завихрення в потоці газу або рідини, порушуючи рівномірність його руху.

Крім того, забруднення робочої рідини знижує її змащувальні властивості. Засмічення фільтрів призводить до кавітації в насосі, піноутворення та недостатньої подачі робочої рідини. Наявність металевих частинок сприяє окисненню мастила та утворенню смолистих речовин, які осідають на поверхнях, інтенсифікуючи процес засмічення фільтрів і зарощування зазорів. Це, у свою чергу, підвищує тиск у лінії, викликає вібрації машини, знижує щільність з’єднань та призводить до витоку рідини. Все це супроводжується підвищенням температури, зниженням в’язкості та зменшенням товщини масляної плівки.

Ретельне очищення робочих порожнин машин від виробничих та експлуатаційних забруднень запобігає передчасному зношуванню відповідальних поверхонь деталей, вузлів та агрегатів, суттєво збільшує термін їх безвідмовної роботи і скорочує витрати на обслуговування та ремонт. За статистикою, до 50 % усіх відмов гідравлічних систем літаків, пов’язаних з виходом з ладу насосів, заклинюванням розподільних і регулювальних пристроїв та підвищеним зносом відповідальних деталей, виникає через технологічні забруднення [37]. Забезпечення чистоти поверхонь деталей та робочих порожнин може збільшити ресурс системи у 2–3 рази. З цієї причини контроль чистоти кромок і поверхонь є пріоритетним завданням для досягнення заданих ресурсних характеристик виробів аерокосмічної галузі.

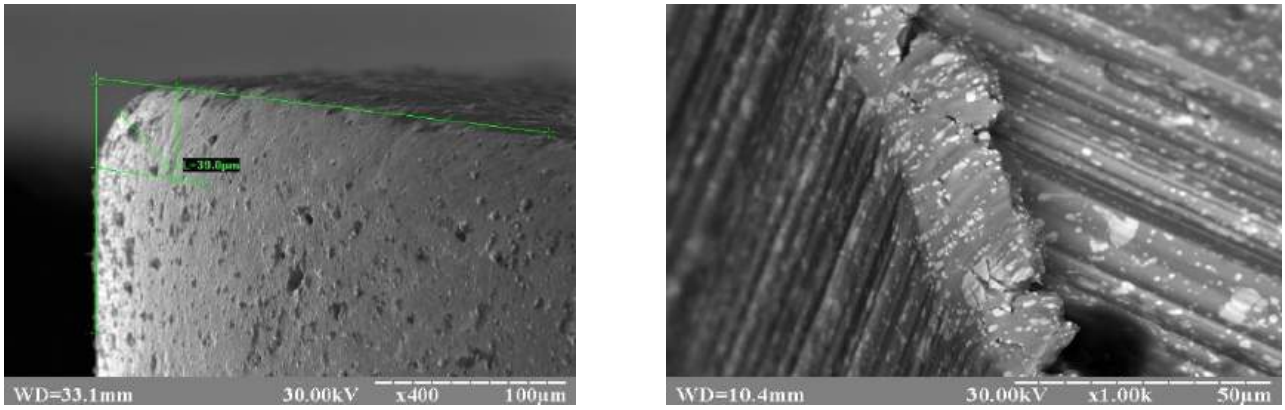
1.3.6 Кромки деталі

Методи аналізу технологічних процесів і АК нині основано на описі об’ємів і поверхонь як основних елементів об'єктів виробництва. Але деталі містять такі елементи, як кромки – лінії перетину двох поверхонь [38]. Уявлення про кромку як

об'єкт, що входить до математичної моделі деталі, виникає при моделюванні технологічного процесу оброблення деталей [37]. Форма кромки і точність її виготовлення, фізичні характеристики її матеріалу здатні значною мірою визначити ефективність функціонування деталей, вузлів або виробів в цілому під час їх експлуатації. Наприклад, різальний інструмент не може бути якісним при порушенні геометрії та характеристик міцності різальної кромки.

На рис. 1.20, а показано кромку інструменту правильної форми (зі збільшенням у 400 раз).

На рис. 1.20, б зі збільшенням у 1000 разів маємо уявлення про край інструменту з задиркою – застосування такого інструменту не дає змогу отримати високу якість оброблюваної деталі.



а б

а – з правильною геометрією; б – з задиркою

Рис. 1.20 – Кромка інструменту

Якість функціонування гідравлічної системи значною мірою залежить від точності розмірів та форми кромки золотника, який регулює подачу робочої рідини. Аналогічно, ефективність процесу горіння у двигуні визначається точністю виготовлення та формою кромки паливної форсунки. Тому в дослідженнях кромки таких деталей розглядають як ключові елементи поряд із поверхнями при аналізі конструкцій та технологічних процесів їх виготовлення (рис. 1.21).

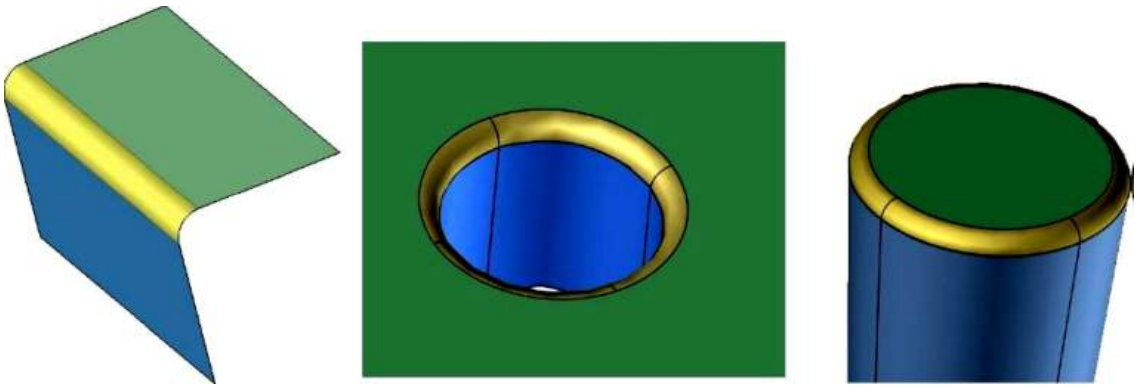


Рис. 1.21 – Приклади геометрії та розташування кромок деталей (зовнішня прямолінейна, внутрішня циліндрична, зовнішня циліндрична)

Складність процесу формування кромки полягає в тому, що вона є результатом перетину двох теоретичних поверхонь і формально повинна описуватися лінією. У випадку перетину реальних поверхонь утворюється реальна кромка деталі, яка вже є не лінією, а перехідною поверхнею складної геометричної форми. Таким чином, кромку можна визначити як поверхню, що сполучає дві поверхні, які перетинаються та є дотичними до неї.

Розміри та мікрорельєф кромки залежать від застосовуваних методів формоутворення, можливостей устаткування та послідовності виконання технологічних операцій. Крім того, на кромці «акумулюються» дефекти поверхонь, що перетинаються, обумовлені крайовими ефектами при їх механічному обробленні. Не завжди можливо забезпечити необхідну якість кромок лише лезовим обробленням, що особливо актуально для деталей зі складними внутрішніми та зовнішніми поверхнями, таких як корпуси гідравлічних агрегатів, лопатки турбін та компресорів.

Тому важливо враховувати вплив якості сполучених поверхонь на характеристики кромки.

1.4 Дослідження впливу розташування мікрорельєфу шорсткості поверхонь, що її утворюють, на форму кромки

Відомо такі загальні вимоги щодо шорсткості поверхні основного металу після механічного оброблення, що відображаються в кресленнях: гострі кути та кро-

мки деталей, за винятком технічно обґрунтованих випадків, мають бути заокруглені радіусом не менше 0,3 мм; радіус заокруглення деталей під тверді та електроізоляційні анодно-окисні покриття не менше 0,5 мм [39].

На виступах, що формують шорсткість поверхні, присутні ще дрібніші нерівності – субшорсткості. Субшорсткість значною мірою визначається структурою оброблюваного матеріалу та його напруженим станом. Електронно-мікроскопічні дослідження поверхонь показують, що субшорсткість утворюється нерівностями, що мають висоту 2...20 нм.

Розглянемо основні характеристики мікрогеометрії докладніше відповідно до чинних стандартів [40, 41].

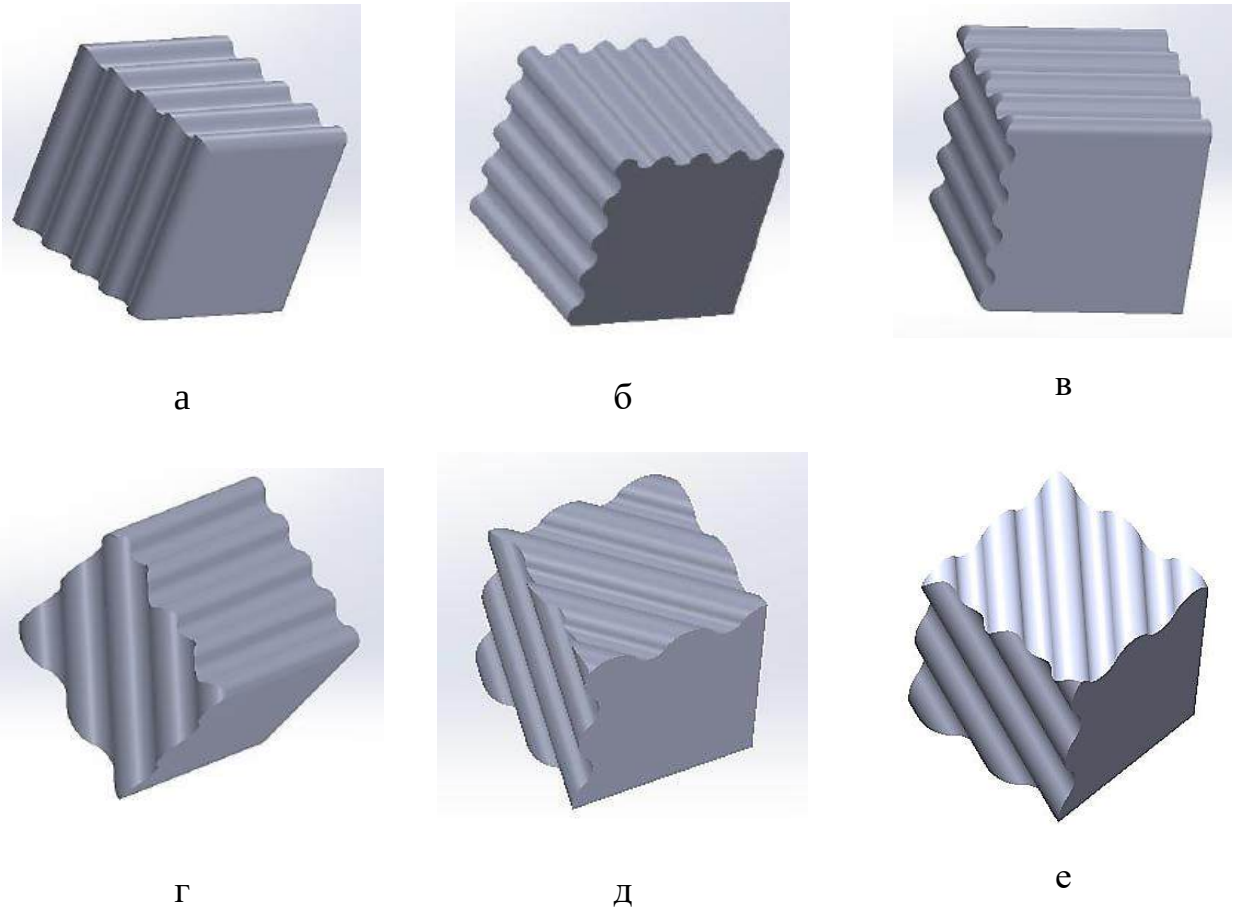
В українському машинобудуванні нормування і кількісне оцінювання шорсткості виконується за допомогою трьох висотних параметрів: R_a, R_z и R_{max}, двох крокових параметрів: S_m і S і параметру t_p – відносної опорної довжини профілю.

Параметр R_a є кращим, оскільки визначення параметра R_z пов’язано із вимірами не менше п’яти виступів і западин профілю на базовій довжині, що на практиці не завжди можна здійснити. Крім того, R_a більш точно визначає шорсткість, оскільки є інтегральним, тому шорсткість поверхні найчастіше оцінюють параметром R_a.

Усі існуючі національні стандарти ґрунтуються на двовимірному оцінюванні параметрів шорсткості, але останнім часом країнами Європейського Союзу та Сполучених Штатів Америки прийнято низку рекомендацій щодо термінології та оцінювання на основі тривимірного аналізу. Переваги двовимірного оцінювання обумовлені малим часом вимірювань та нижчою ціною інструменту [42, 43]. Однак виробничий досвід показує вищу точність за тривимірним аналізом шорсткості кромок та поверхонь деталей.

Якщо кромка є площиною, вона утворена перетином поверхонь, які мають свою шорсткість і субшорсткість. У цьому випадку можна навести такі можливі випадки утворення кромок залежно від мікрорельєфу шорсткості на поверхнях, що

перетинаються, а саме: симетрично ортогональні, симетрично паралельні, паралельно ортогональні, ортогонально косі, симетрично косі, асиметрично косі (рис. 1.22).



а – ортогональних поверхонь, що симетрично перетинаються; б – симетрично паралельних поверхонь; в – паралельно ортогональних поверхонь; г – ортогонально косих поверхонь; д – симетрично косих; е – асиметрично косих поверхонь

Рис. 1.22 – Формування кромок при різних напрямках мікронерівностей [44]

Залежно від напрямку шорсткості на площинах, що перетинаються, лінія їх перетину, яка називається кромкою, матиме різні форми в просторі і має низку відмінностей у своїх характеристиках. І тут доцільно запровадити поняття «шорсткість кромки». Цей термін означає величину відхилення кромки вздовж лінії перетину утворювальних площин, яка залежить від величини шорсткості та напрямку мікронерівностей на поверхнях, що перетинаються. Пояснити зміст цього поняття

можна на прикладі симетрично ортогонального розташування мікронерівностей. На рисунку 1.23 показано напрями шорсткостей двох площин, що перетинаються, і які мають величину шорсткості R_{a1} і R_{a2}.

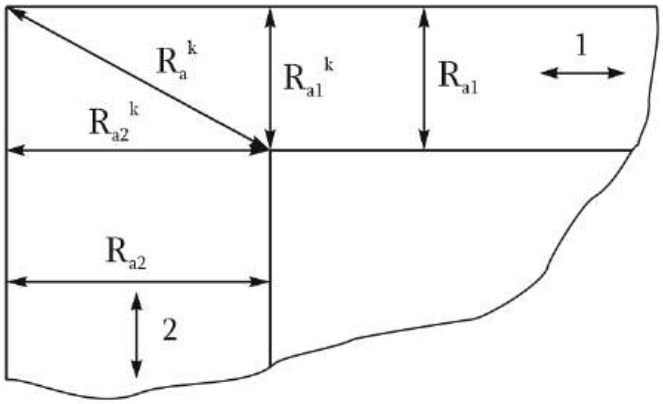


Рис. 1.23 – Розташування полей шорсткості поверхонь, що перетинаються, і шорсткість кромки при симетрично ортогональному розташуванні шорсткості поверхонь [44]

Величина шорсткості кромки R_{a1}^k буде мати мінімальне значення при нульовому знначенні R_{a2}. Відповідно величина шорсткості кромки R_{a2}^k буде мінімальною при нульовому значенні R_{a1}. Максимальна величина шорсткості кромки R_a^k буде при максимальних значеннях шорсткості поверхонь R_{a1} і R_{a2}. Максимальна величина шорсткості кромки може бути визначена за такою залежністю:

$$\left(R_a^k\right)^2 = R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2 . \qquad (1.5)$$

Для порівняння розглянемо величину шорсткості кромки R_{a2} на прикладі симетрично паралельного розташування мікронерівностей (рис. 1.24).

У цьому випадку напрям шорсткості розташовано паралельно кромці і вплив підсумовування значень шорсткості виключається. Тому тут величина шорсткості кромки залежить тільки від значення шорсткості поверхні з найгіршою шорсткістю, тобто $R_a^k = R_{a_2} = R_{a_{\max}}$.

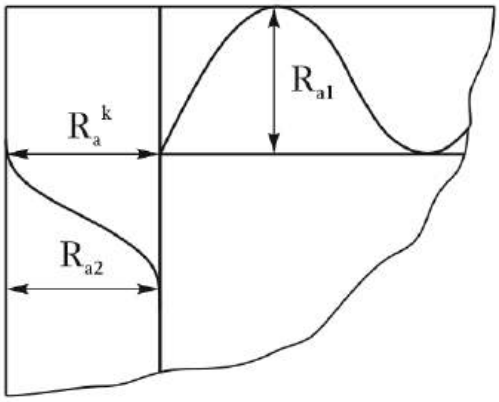


Рис. 1.24 – Величина шорсткості кромки R_{a2}^{k} при симетрично паралельному розташуванні мікронерівностей [44]

Таким чином, напрям шорсткості на утворювальних поверхнях, що утворюють, впливає на величину шорсткості кромки. Результати досліджень величин шорсткості кромки інших можливих поєднань шорсткостей наведено в таблицях 1.2 і 1.3.

Табл. 1.2 – Основні характеристики кромок залежно від напрямку шорсткості поверхонь [44]

Схема	Напрямок шорсткості поверхонь	Шорсткість кромки, R_a^k	Мінімальний радіус заокруглення кромки, $R_{\min}^k$
а	Ортогональні поверхні, що симетрично перетинаються	$\sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$	$3.5R_{a_{\max}}$
б	Симетрично паралельні	$R_{a_{\max}}$	$1.5R_{a_{\max}}$
в	Паралельно ортогональні	$R_{a_{\max}}$	$2.0R_{a_{\max}}$
г	Ортогонально косі	$\sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$	$3.5R_{a_{\max}}$
д	Симетрично косі	$\sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$	$2.0R_{a_{\max}}$
е	Асиметрично косі	$\sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}$	$2.0R_{a_{\max}}$

Табл. 1.3 – Мінімальні радіуси заокруглення кромок симетрично паралельних поверхонь, 10^{-6} м [44]

R_a		Робоча поверхня									
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0.4	0,675	0,75
Бокова поверхня	0,05	**0,075**	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,1	**0,15**	**0,15**	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,15	**0,225**	**0,225**	**0,225**	0,3	0,375	0,45	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,2	**0,30**	**0,30**	**0,30**	**0,3**	0,375	0,45	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,25	**0,375**	**0,375**	**0,375**	**0,375**	**0,375**	0,45	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,3	**0,45**	**0,45**	**0,45**	**0,45**	**0,45**	**0,45**	0,525	0,4	0,675	0,75
	0,35	**0,525**	**0,525**	**0,525**	**0,525**	**0,525**	**0,525**	**0,525**	0,40	0,675	0,75
	0,4	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**	**0,6**	0,675	0,75
	0,45	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,657**	**0,675**	0,75
	0,50	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**	**0,75**

Залежності для визначення мінімального радіуса заокруглення кромки при симетрично паралельних поверхнях (рис. 1.22, б) подано в таблиці 1.2, де: R_a^k – шорсткість кромки; $R_{\min}^k$ – мінімальний радіус заокруглення кромки.

Форма кромки залежно від схеми така:

а – криволінійно-спіралеподібна просторова;

б – близька до прямолінійної в одній площині;

в – криволінійна в ортогональній площині;

г – криволінійна спіралеподібна просторова;

д – криволінійна спіралеподібна з великою шорсткістю;

е – криволінійна спіралеподібна з великою шорсткістю.

Аналізуючи показання величин таблиці 1.3, можна зробити висновок про те, що із збільшенням показань шорсткості збільшується радіус заокруглення кромки. Шорсткість кромки і мінімальний радіус кромки більшою мірою визначається поверхнею з гіршою шорсткістю.

1.5 Передумови використання методів РІ при формуванні якості деталей АК за умови обмеженого часу

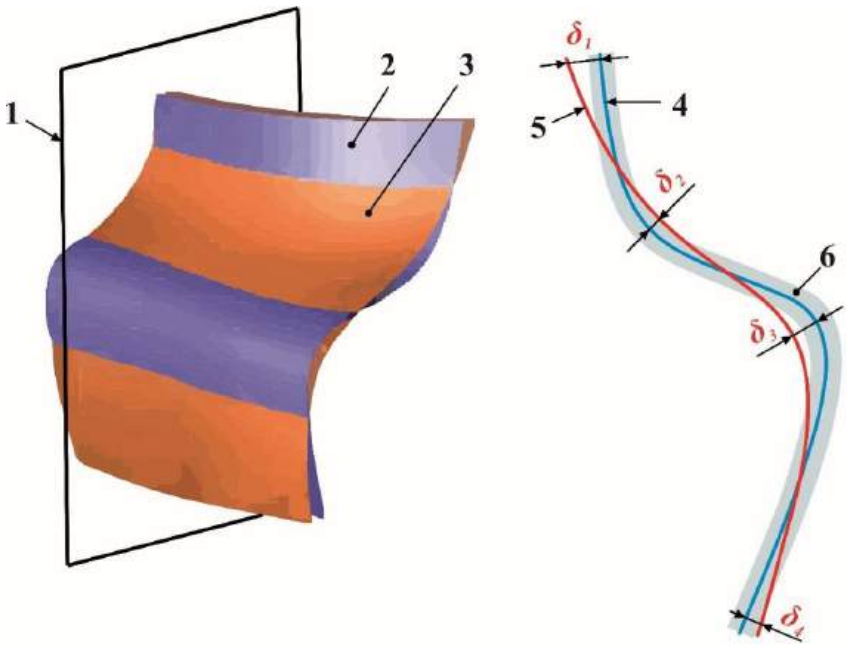
Виготовлення деталі АК відповідно до її 3D-моделі (за даними АЕ) в машинобудівних умовах містить два завдання. Перше завдання (пряме) полягає у формоутворенні об'єкта виробництва на основі інформації з його 3D-моделі (за даними АЕ). Друге завдання (зворотне) спрямоване на перевірку відповідності відповідності виготовленої деталі вихідній моделі та передбачає отримання портрета екземпляра деталі та процедуру порівняння з АЕ.

1.5.1 Пряме та зворотне завдання формоутворення

Пряме завдання формоутворення реалізує процес перетворення заготовки на деталь за інформацією її АЕ на вибраному устаткуванні за допомогою інструменту стандартної форми. При вирішенні 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) [37]. Завдання вирішується за два етапи: перший – отримання 3D-моделі реальної деталі або її портрета, другий – порівняння двох моделей: еталонної і портрета.

Відхилення форми реального профілю від еталонного визначається за нормаллю до еталонного профілю в межах нормованої ділянки [29]. Метою операцій контролю є встановлення факту, чи знаходяться відхилення у межах заданого допуску, наприклад, чи відповідають їм значення δ_1, δ_2, δ_3 і δ_4 (рис. 1.25).

Виконання процедур контролю на робочому місці часто ускладнюється, особливо для деталей зі складнопрофільною геометрією, коли наявними в цеху засобами необхідно будувати нормалі до еталонної поверхні та вимірювати відстані до точок реальної поверхні. Традиційно пряме і зворотне завдання формоутворення виконувалися окремо з використанням різного типу устаткування. Нині спостерігається тенденція їх інтеграції на базі координатної системи обробних центрів з ЧПК шляхом дооснащення засобами контролю.



1 – площина контрольного перерізу; 2 –портрет; 3 – еталон поверхні; 4 – переріз реальної поверхні площиною 1; 5 – перетин еталонної поверхні площиною 1; 6 – поле допуску еталонної поверхні

Рис. 1.25 – Відхилення форми портрета від еталонної складнопрофільної поверхні деталі [6]

Це дозволяє після виконання прямого завдання формоутворення (або окремих його операцій та переходів) визначати координати точок поверхні деталі та формувати її портрет безпосередньо на операціях контролю. Таким чином, операції контролю можуть виконуватися із застосуванням засобів CAD/CAM-систем (рис. 1.26). Процедури вимірювання, таким чином, можна виконувати без зміни базування деталі, що підвищує її точність та знижує загальну трудомісткість виготовлення деталі.

Виділення кромок в окремий вид поверхонь пов'язано із значним зростанням вимог до їх механічних властивостей, геометрії їх поверхні та мікрорельєфу [45, 46]. При вирішенні прямого завдання формоутворення такі вимоги приводять до застосування специфічних технологічних процесів, наприклад електрохімічних, термоімпульсних методів, магнітно-абразивного або лазерного оброблення [47, 48, 49].

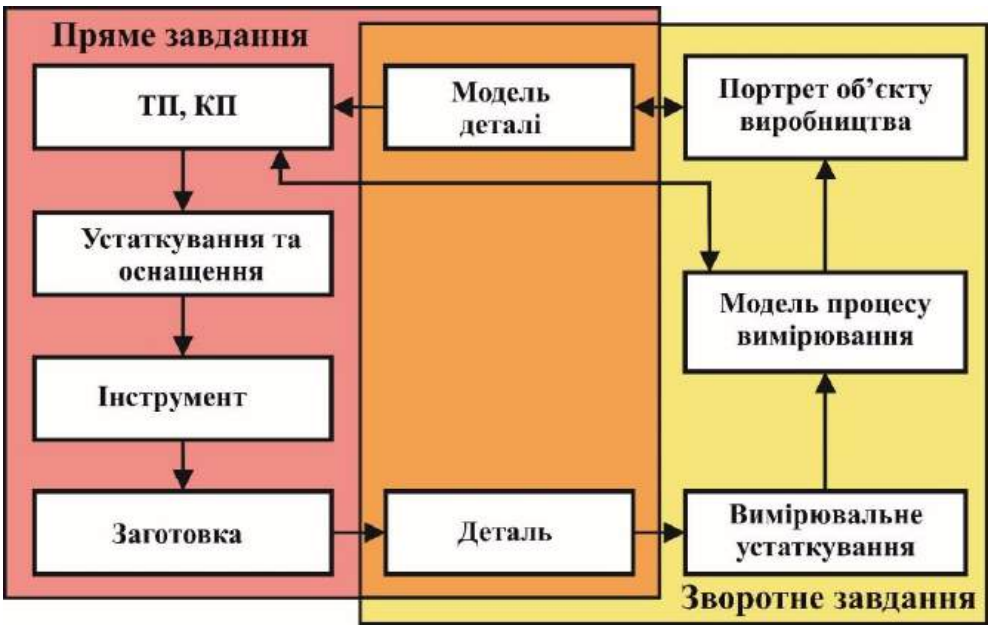


Рис. 1.26 – Реалізація первинного формоутворення у машинобудуванні

Зворотне завдання контролю кромок виконується у виробничих умовах, що накладає обмеження на йогоеалізацію. Тому для цього доцільно використовувати безконтактні системи вимірювання параметрів у комбінації з високоточними системами координатних осей ЧПК. Це дає змогу проводити точні вимірювання і за їх результатами будувати портрети екземплярів кромок для порівняння з їх еталоном [50, 51, 52, 53, 54, 55].

Аналіз результатів досліджень щодо забезпечення вимог до мікрорельєфу поверхневого шару під час механічного оброблення дав змогу зробити висновок про значний вплив жорсткості оснащення та інструменту, подачі, швидкості та глибини різання, геометрії різальної частини інструменту на цей процес [56, 57, 58, 59, 60, 61, 62]. Зворотне завдання вирішується із застосуванням спеціальних вимірювальних систем контролю якості поверхневого шару деталі, наприклад профілометра, тунельного або атомного мікроскопів і т. п. [63, 64, 65].

Забезпечення ПЧ поверхні деталі та середовища її експлуатації реалізується використанням спеціального устаткування для видалення забруднювальних частинок. Зворотне завдання вирішується з використанням спеціальних вимірювальних систем для контролю ПЧ поверхневого шару деталі та експлуатаційного середо-

вища, наприклад атомно-емісійних спектрометрів, рентгено-флуоресцентних спектрометрів [66, 67]. Коректність вирішення прямого та зворотного завдань, аналіз їх результатів є необхідною умовою забезпечення якості деталей. На рис. 1.27 подано сукупність технологічних блоків та алгоритм реалізації завдань: 1 – формоутворення деталі; 2 – формування кромок деталі та їх мікрорельєфу; 3 – забезпечення промислової чистоти поверхонь деталей та середовища їх експлуатації; 4 – забезпечення мікрорельєфу поверхонь деталі.

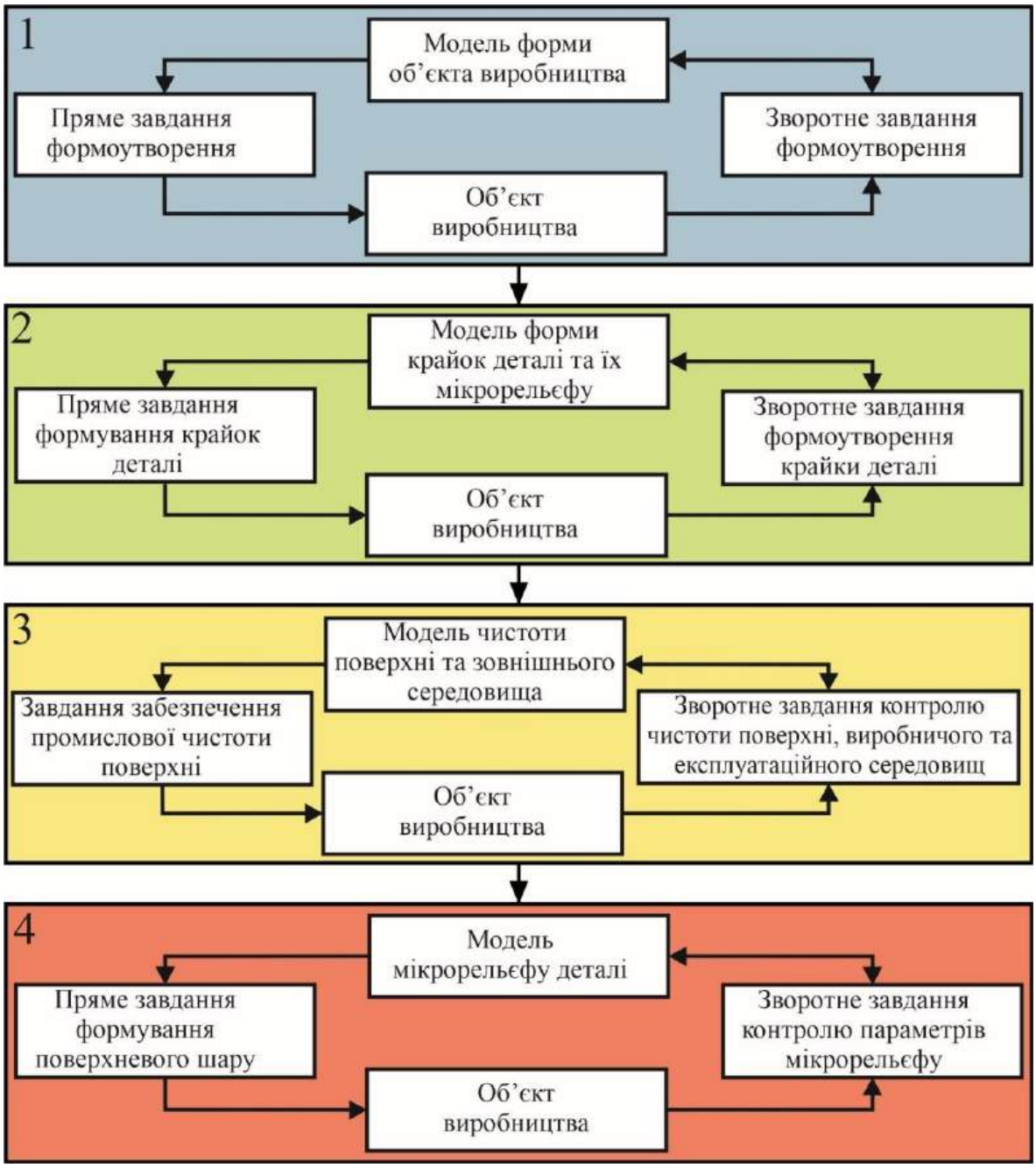


Рис. 1.27 – Блоки технологічних процесів, що забезпечують якість деталей при їх формоутворенні та експлуатації [5]

Необхідність застосування усієї сукупності блоків наведених технологічних процесів та можливі численні варіанти послідовностей їх застосування призводять до висновку про неможливість їх ефективного використання в умовах машинобудівного виробництва при тому членуванні прямих та зворотних завдань, що зараз існує, на окремі, самостійні операції.

Необхідно прагнути реалізувати їх виконання на одному робочому місці або кількох, але об'єднаних в один технологічний комплекс.

Зазначимо, що блоки технологічних процесів, що забезпечують якість деталей при їх формоутворенні та експлуатації, містять чотири блоки, де кожний наступний блок не може реалізовуватися з високою точністю без базового попереднього.

1.5.2 Реалізація РІ при вирішенні прямого та зворотного завдань формоутворення за умови обмеженого часу

На основі отриманих даних п.1.5.1 можна фіналізувати, що РІ дає змогу вирішувати як зворотне, так і пряме завдання. Зворотне – маючи фізичний зразок деталі АК або виробу, отримати точні параметри розмірів і форм та побудувати АЕ. Пряме – на основі отриманого АЕ розробити конструкторську, технологічну і експлуатаційну документацію та запустити деталь АК у виробництво, використовуючи РІ на операціях контролю.

На сьогодні операції РІ набули найбільш поширеного використання у:

1) дослідженнях деталі чи АК на існування похибок, контролі виготовленого АК шляхом порівняння його геометрії з АЕ, отримання технічної документації [68, 69, 70, 71];

2) проєктуванні АК, запасних частин та оснащення за відсутності оригінальної конструкторсько-технологічної документації на АК [72, 73, 74];

3) 3D-оцифруванні деталей АК складнопрофільної форми, у тому числі художніх форм та зліпків [75, 76, 77, 78];

4) створенні 3D-моделі досліджуваної деталі чи АК з наступним виготовлення на верстатах з ЧПК або 3D-друком [79, 80, 81, 82].

Слід зазначити, що вартість і тривалість розробки обраного методу РІ суттєво залежать не лише від складності самого досліджуваного АК, але й, насамперед, від наявності вихідних даних, чіткого технічного завдання та компетентності фахівця, який розуміється на технології роботи відповідного механізму [83, 84].

Якщо для розробки, наприклад, верстата в якості вихідних даних доступні лише зображення з інтернету та загальне уявлення про очікуваний результат, процес розробки включає значну творчу складову конструктора, численні ітерації для досягнення необхідного результату та виготовлення кількох дослідних зразків.

Найбільш ефективний варіант РІ передбачає наявність самого механізму, технолога, який детально знає всі його особливості, проблеми та способи їх усунення, а також повні вихідні дані і чітке технічне завдання. У будь-якому випадку прототипування АК технологією РІ практично означає розробку виробу «з нуля».

У складних механізмах можна відтворити лише зовнішній вигляд виробу, тоді як копіювання окремих деталей не гарантує функціональності виробу, оскільки при відтворенні кожної деталі існує ризик допущення помилок і невиконання необхідних допусків на виготовлення та складання [85, 86, 87].

Оцінку реалізації РІ при вирішенні прямого та зворотного завдань формоутворення за умови обмеженого часу виконано за результатами розрахунків трудомісткості виконання робіт зі створення АЕ АК на прикладі складальної одиниці (СО) – стабілізатора гелікоптера – при технічній підготовці виробництва. Слід зазначити, що в цьому випадку було враховано, що складання (збирання) стабілізатора гелікоптера виконується у складальному пристрої з базуванням від каркасу.

Нормування трудомісткості операцій реалізовано за методом експертного оцінювання [88]. Враховано, що норми часу, визначені методом експертного оцінювання, мають характер випадкової величини, тому до цих значень були застосовані залежності для оброблення та складання випадкової величини з теорії ймовірностей [88]. Для розрахунку трудомісткості зворотної задачі формоутворення за умови застосування РІ було розроблено операційну технологію технічної підготовки виробництва і здійснено нормування операцій для стабілізатора гелікоптера за даними [89].

Із розрахунків (табл. 1.2) видно, що координата середини поля сумарного розсіювання трудомісткості $\Delta_{0\Sigma} = 204$ год, а половина поля розсіювання похибок сумарної трудомісткості $\delta_\Sigma/2 = 9{,}22$ год.

Табл. 1.2 – Результати розрахунку трудомісткості PI для стабілізатора гелікоптера при вирішенні зворотного завдання формоутворення

№ п/п	Технологічна операція	$t_{i\,max}$, $t_{i\,min}$, люд.-год	Δ_i	$\delta_i/2$	A_i	k_i	α_i	$A_i\,\alpha_i\,\frac{\delta_i}{2}$	$A_i\,\Delta_i$	$k_i^2\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 A_i^2$
1	Формування вимог завдання, вибір об’єкта	+5, +2	3,5	1,5	+1	1,4	0	0	3,5	4,41
2	Сканування поверхонь об’єкта	+3, +2	2,5	0,75	+1	1,0	0	0	2,5	0,56
3	Створення та редагування триангуляційної моделі	+8, +6	7	1,0	+1	1,0	0	0	7	1,0
4	Створення і контроль базових поверхонь	+4, +3	3,5	0,5	+1	1,0	0	0	3,5	0,25
5	Побудова 3D-моделі	+12, +9	10,5	1,5	+1	1,0	0,5	0,5	10,5	2,25
6	Контроль 3D-моделі та її доопрацювання за необхідності	+15, +6	10,5	4,5	+1	1,0	0,5	0,5	10,5	20,25

№ п/п	Технологічна операція	$t_{i\,max}$, $t_{i\,min}$, люд.-год	Δ_i	$\delta_i/2$	A_i	k_i	α_i	$A_i\,\alpha_i\,\frac{\delta_i}{2}$	$A_i\,\Delta_i$	$k_i^2\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 A_i^2$
7	Проєктування заготівельного оснащення	+50, +40	45	5	+1	1,0	0	0	45	25,0
8	Виготовлення заготівельного оснащення	+24, +24	24	0	+1	1,4	0	0	24	0
9	Проєктування складального оснащення	+25, +20	22,5	2,5	+1	1,0	0	0	22,5	6,25
10	Виготовлення складального оснащення	+80, +70	75	5,0	+1	1,4	0	0	75	25,0
∑		+226, +182	-	-	-	-	-	1,0	204	84,97

Отже, максимальна розрахункова трудомісткість реалізації зворотної задачі, отримана теоретико-імовірнісним методом, становить 204 + 9,22 = 213,22 год, мінімальна розрахункова трудомісткість реалізації зворотної задачі – 194,78 год.

Результати для розрахунку трудомісткості створення стабілізатора гелікоптера із застосуванням РІ при розв’язанні прямої задачі теоретико-імовірнісним методом, наведено в табл. 1.3.

Значення тривалості (часу) виконання окремих операцій для розрахунку трудомісткості розв’язання прямої задачі теоретико-імовірнісним методом, необхідного для створення стабілізатора гелікоптера із застосуванням РІ, узято з довідкових даних і публікацій авторів за темою технологічної підготовки виробництва [87, 90].

Табл. 1.3 – Результати розрахунку трудомісткості РІ для стабілізатора геліко-птера під час розв'язання прямого завдання формоутворення

№ п/п	Технологічна операція	$t_{i\,max}$, $t_{i\,min}$, люд.-год	Δ_i	$\frac{\delta_i}{2}$	A_i	k_i	α_i	$A_i \alpha_i \frac{\delta_i}{2}$	$A_i \Delta_i$	$k_i^2\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 A_i^2$
1	Математичний опис зовнішніх форм СО гелікоптера	+20, +15	17,5	2,5	+1	1,4	0	0	17,5	12,25
2	Створення цифрових моделей деталей каркаса	+50, +45	47,5	2,5	+1	1,0	0	0	47,5	6,25
3	Розроблення схем членування конструкції	+25, +20	22,5	2,5	+1	1,0	0	0	22,5	6,25
4	Створення моделей СО	+26, +19	22,5	3,0	+1	1,0	0,5	1,5	22,5	9,0
5	Перевірка на збирання виробу	+18, +12	15	3,0	+1	1,0	0,5	1,5	15	9,0
6	Формування АЕ виробу	+15, +12	13,5	1,5	+1	1,0	0,5	1,5	13,5	2,25
7	Проєктування заготівельного оснащення	+50, +40	45	5,0	+1	1,0	0	0	45	25,0
8	Виготовлення заготівельного оснащення	+24, +24	24	0	+1	1,4	0	0	24	0

№ п/п	Технологічна операція	$t_{i\,max}$, $t_{i\,min}$, люд.-год	Δ_i	$\frac{\delta_i}{2}$	A_i	k_i	α_i	$A_i \alpha_i \frac{\delta_i}{2}$	$A_i \Delta_i$	$k_i^2\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 A_i^2$
9	Проєктування складального оснащення	+25, +20	22,5	2,5	+1	1,0	0	0	22,5	6,25
10	Виготовлення складального оснащення	+80, +70	75	5,0	+1	1,4	0	0	75	25,0
$\sum$		+333, +277	–	–	–	–	–	4,5	305	101,25

Розрахунки показали, що координата середини поля сумарного розсіювання трудомісткості $\Delta_{0\Sigma}$ = 305 год, а половина поля розсіювання похибок сумарної трудомісткості $\delta_\Sigma/2$ = 10,06 год. Отже, максимальна розрахункова трудомісткість реалізації прямого завдання, отримана теоретико-імовірнісним методом, становить 305 + 10,06 = 315,06 год, мінімальна розрахункова трудомісткість реалізації прямого завдання – 294,94 год.

1.5.3 Порівняльний аналіз трудомісткості створення АЕ СО АК при технічній підготовці виробництва з використанням методів РІ

Аналізуючи дані розрахунків під час розв'язання прямого (див. табл. 1.3) і зворотного (див. табл. 1.2) завдань, виявилось, що загальна трудомісткість створення СО на прикладі стабілізатора гелікоптера за умови зворотного завдання в 1,5 раза менша, ніж при створенні тієї самої СО методом прямої задачі. Якщо порівнювати розрахункову трудомісткість формування АЕ прямої та зворотної задач, то в останньому випадку АЕ може бути виконано в 3,7 раза швидше, ніж під час розв'язання прямої задачі. Це пояснюється тим, що під час сканування формується готове технічне рішення, в якому вже вирішено багато технічних питань. Процес

оцифровування готового рішення за допомогою сканера і спеціального програмного забезпечення дає змогу значно швидше створити АЕ конструкції і забезпечити виробництво, модернізацію або ремонт АК, який раніше виготовлявся плазово-шаблонним методом без використання комп'ютерних технологій. Для наочності результати розрахунку трудомісткості виконання робіт зі створення АЕ (без урахування половини поля розсіювання похибок сумарного часу $\delta_{\Sigma\Sigma}$) під час розв'язування прямої та зворотної задач формоутворення подано графічно на рис. 1.28.

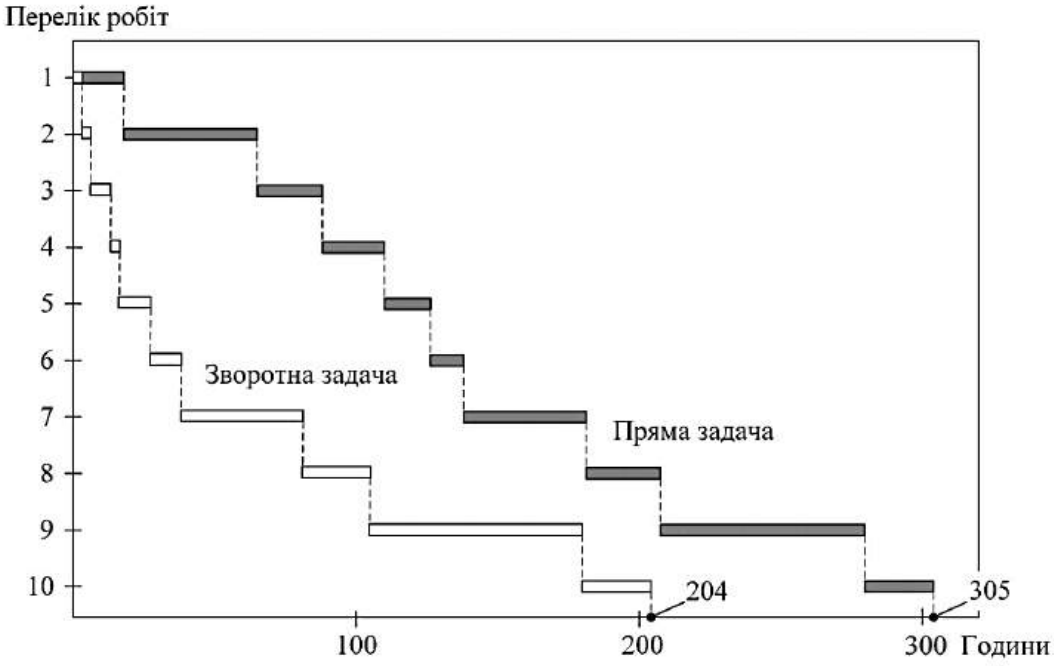


Рис. 1.28 – Порівняння календарного графіка виконання робіт при вирішенні прямого та зворотного завдань формоутворення [90]

З графіку (рис. 1.29) видно, що сканування й оброблення результатів під час вирішення зворотного завдання формоутворення значно швидше дають змогу отримати АЕ і розпочати виробництво оснащення для виготовлення СО. Розкид значень часу виконання на перших шести етапах робіт пояснюється кваліфікацією виконавців, які здійснюють сканування й оброблення результатів.

При реалізації прямого завдання потрібен більший час для виконання окремих етапів у зв'язку з необхідністю узгодження рішень з усіма виконавцями, які беруть участь у конструюванні та підготовці виробництва майбутнього АК. Слід звернути

увагу на те, що виробники заявляють, що розроблення АЕ не потребує великих трудовитрат, оскільки в багатьох CAD/CAM-системах уже сформовані бази з моделями. Зазвичай у системах реалізовано можливість створення моделей відсутнього обладнання [91, 92]. Тому після виконання технічної підготовки виробництва в інформаційну систему підприємства можуть бути включені всі одиниці обладнання з ЧПК і все технологічне оснащення.

Слід урахувати, що багато підприємств-виробників розділяють технічну підготовку виробництва і безпосередньо виробництво АК, завдяки чому виправдовується думка про «нетрудозатратність створення АЕ». У будь-якому разі використання інформації у вигляді АЕ створює можливість вирішення великої кількості завдань з обслуговування формоутворювальних систем, розроблення матеріальних і трудових нормативів технічної підготовки виробництва, упровадження технологічних процесів, нормалізації та уніфікації засобів технологічного оснащення, модернізації обладнання.

Слід зазначити, що в сучасному світі технологію РІ успішно застосовують при виготовленні АК, що підтверджено безліччю публікацій, проте практично немає кількісних характеристик при створенні АЕ. Водночас результати досліджень на прикладі стабілізатора гелікоптера дають повні дані про вплив методу РІ на строки проведення технічної підготовки виробництва, дані про трудомісткість процесу РІ під час розв’язання задач формоутворення. Порівняння трудомісткості під час вирішення прямого і зворотного завдань показує, що використання методу РІ для скорочення часу технічної підготовки виробництва нового АК не дає істотного виграшу в часі. Це пояснюється тим, що в процесі технічної підготовки виробництва виконується великий обсяг конструкторських, технологічних та організаційних робіт, які є взаємозалежними і пов’язаними між собою, тому потребують значного часу на їх узгодження та виконання. Слід враховувати, що використання методу РІ є досить ефективним під час запуску у виробництво нового виробу для виконання операційних завдань, для виконання операцій контролю, а також контролю якості складових частин і виробу в цілому.

Тому, враховуючи виконаний аналіз стану питання за літературними джерелами та отриманими результатами на прикладі стабілізатора гелікоптера, наведено основні пропозиції та рекомендації щодо скорочення термінів технічної підготовки виробництва при застосуванні РІ:

– широке використання методу РІ під час вирішення зворотних завдань технічної підготовки виробництва;

– використання методу РІ під час контролю якості деталей і виробів авіаційного виробництва;

– застосування сканерів при ремонті та конвертації АО, вироблених за шаблонними методами;

– удосконалення організаційних форм технічної підготовки виробництва з використанням РІ;

– уніфікація, стандартизація та типізація технічних і організаційних рішень;

– відпрацювання конструкцій на технологічність у процесі конструкторської та технологічної підготовки виробництва;

– інформаційний супровід всіх виконавців;

– автоматизація конструкторського і технологічного проєктування;

– вибір найкращої схеми складання та ув'язування заготівельного і складального оснащень з використанням техніко-економічного аналізу.

1.5.4 Обговорення результатів досліджень впровадження РІ при технічній підготовці виробництва АК

Розрахунками доведено, що максимальна трудомісткість реалізації зворотного завдання становить від 194,78 до 213,22 люд.-год (див. табл. 1.2), а при реалізації прямого завдання – від 294,94 до 315,06 люд.-год (див. табл. 1.3). Отримані результати підтверджують актуальність упровадження сучасних інжинірингових рішень, зокрема й РІ.

Особливістю запропонованих розрахунків є використання відомого теоретико-імовірнісного методу [88, 89], що дає чітке розуміння термінів технічної підготовки виробництва і прогнозує майбутню трудомісткість технології. Результати

розрахунків для стабілізатора гелікоптера показали, що при використанні технології РІ різниця в трудомісткості технічної підготовки виробництва зі створення СО за шаблонними методами відрізняється в 1,5 раза, а при створенні АЕ – у 3,7 раза. Отже, впровадження АЕ в уже існуючі, але застарілі шаблонні технології, наприклад плазово-шаблонний метод, за допомогою РІ об’єднує низку рішень, а саме:

– дає змогу створити за реальним об'єктом АЕ і необхідну кількість похідних 3D-моделей різних форматів;

– вирішує завдання прототипування деталі та формоутворювального і складального оснащень;

– здійснює контроль на всіх етапах, як під час технічної підготовки виробництва, так і під час виробництва деталей.

Використання 3D-сканерів і програмного забезпечення для вирішення зворотних завдань у промисловості можна рекомендувати в таких випадках:

– при здійсненні РІ АК;

– для контролю якості виготовлення АК;

– при ремонті та конвертації АК, виробленої методами ПШМ;

– для оцифрування створеного вручну дизайн-макета АК як основи для подальшого опрацювання;

– для виявлення, реєстрації та ідентифікації незадокументованих змін під час виготовлення дослідних зразків продукції;

– при виготовленні факсимільного пакування для готового транспортного виробу.

Зазначимо, що питання скорочення тривалості технічної підготовки виробництва деталей АК залишаються актуальними в науковому співтоваристві, що підтверджує обсяг і результати проаналізованої літератури на цю тему. Багато авторів пропонують ефективні способи досягнення цього результату на різних етапах технічної підготовки виробництва, розглядаючи це питання з різних позицій, проте аспект впливу РІ залишається маловивченим. Безпосередньо технологію РІ нерідко розглядають з позиції зниження трудомісткості у межах того чи іншого окремого

процесу, наприклад на етапі контролю деталей. Однак її вплив на технічну підготовку виробництва загалом не розглянуті досі.

В свою чергу результати досліджень на прикладі стабілізатора гелікоптера дали повні дані про вплив кожного етапу реалізації РІ на строки проведення технічної підготовки виробництва і дані про трудомісткість процесу РІ під час вирішення прямого і зворотного завдань формоутворення. Так з графіку (рис. 1.28) видно, що починаючи з 7 етапу по останній 10 трудомісткість процесів однакова. Відмінності є лише з 1 по 6 етапи включно з отриманням першоджерела інформації – АЕ, де при розв'язанні зворотного завдання формоутворення витрачається менше часу, ніж при розв'язанні прямого завдання.

Отже, найбільш трудомісткий процес для будь-яких завдань стає саме отримання першоджерела інформації. Це все наштовхнуло на пошук методів, підходів, технологій щодо отримання першоджерела інформації з найменшими витратами часу і трудомісткістю процесу і, як покажуть результати подальших досліджень і встановлення найбільш раціонального першоджерела інформації для виготовлення деталі АК з забезпеченням вимог точності в умовах обмеженого часу. До всього ж пропонується здійснення конкретних досліджень з розрахунками точності, що є реальним отримати при технічній підготовці виробництва та виробництві дослідних деталей, СО АК.

1.6 Висновки за розділом

1. Показано, що РІ – складний процес, і кожен проєкт має розглядатися індивідуально як з погляду можливості розроблення конструкторської документації, так і з точки зору доцільності копіювання з наступним опрацюванням тієї чи іншої технології виготовлення. Зазначено, що якісне та швидке відтворення складного виробу за зразком є можливим за наявності гарного технічного завдання, повних вихідних даних, самого виробу в наявності та фахівця, який розуміється на принципах його роботи.

2. Проаналізовано форми пошкоджених деталей АК щодо можливості їх прототипування. Систематизовано деталі та вузли АК в класифікатор щодо можливостей використання методів РІ для різних груп таких деталей і СО АК. В основу його

створення було покладено ідею щодо можливості прототипування тієї чи іншої групи деталей залежно від технічних можливостей різних сканерів та інших вимірювальних пристроїв, а також встановлення необхідного обладнання для реалізації самого процесу прототипування.

3. Досліджено формування кромок при різних напрямках мікронерівностей утворювальних поверхонь деталей АК, а саме: ортогональних поверхонь, що симетрично перетинаються; симетрично паралельних поверхонь; параллельно ортогональних поверхонь; ортогонально косих поверхонь; симетрично косих і асиметрично косих поверхонь. Виведено залежності для визначення мінімального радіуса заокруглення кромки при всіх випадках. Аналіз отриманих розрахунків за цими залежностями показав, що із збільшенням показників шорсткості збільшується радіус заокруглення кромки. Шорсткість кромки і мінімальний радіус кромки більшою мірою визначається поверхнею з гіршою шорсткістю. Останнє слід враховувати при створенні АЕ та на його основі 3D-моделей для виробництва деталей АК.

4. Доведено, що найкращі показники кромки реалізуються при симетрично паралельному розташуванні мікрорельєфу шорсткості, дещо гірше – при паралельно ортогональному. Підтверджено важливість форми кромок і її вплив для отримання мінімального радіуса заокруглення кромки. Для досягнення високої якості кромки слід враховувати її мікрорельєф у плануванні механічного оброблення деталі.

5. Досліджено передумови використання методів РІ та контролю при формуванні якості деталей АК за умови обмеженого часу. Розглянуто теоретичні засади вирішення прямого та зворотного завдань в умовах технічної підготовки виробництва та виробництва в цілому АК. Запропоновано оцінювання трудомісткості за методом теоретико-імовірнісним методом виконання робіт із створення АЕ при вирішенні обох завдань на прикладі стабілізатора гелікоптера. Результати розрахунків для стабілізатора гелікоптера показали, що при використанні технології РІ різниця в трудомісткості технічної підготовки виробництва зі створення СО за шаблонними методами відрізняється в 1,5 раза, а при створенні АЕ – у 3,7 раза на користь РІ. Особливістю запропонованого рішення є можливість використовувати ві-

домий теоретико-імовірнісний метод при визначенні трудомісткості в реальних виробничих умовах при технічній підготовці виробництва АК. Такі результати дали змогу сформулювати пропозиції та рекомендації щодо скорочення термінів технічної підготовки виробництва АК.

Основні наукові результати, наведені в першому розділі, опубліковано в працях автора [1, 7, 12, 17, 22, 26, 27, 29, 30].

Зазначені задачі є важливою науково-технічною проблемою зі створення авіаційних конструкцій із застосуванням технологій РІ за умови обмеженого часу, на вирішення якої сфокусовані дослідження, тому **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** дослідження:

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 РІ) 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.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА БАЗІ МЕТОДІВ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ ЗА УМОВИ ОБМЕЖЕНОГО ЧАСУ

В основу створення аналітичної геометрії деталей покладено аналітичний метод Декарта як спосіб уявлення геометричних об’єктів, коли кожна крива описана рівнянням.

Потреба виготовлення складнопрофільних АК створила умови для формування геометричного моделювання на основі сплайнів. Найбільш вдалим описом складних форм об'єктів виробництва виявилися сплайни NURBS (Non-uniform rational B-spline – неоднорідний раціональний B-сплайн) [93], патентовласником та розробником яких є француз П'єр Безьє, інженер з компанії Рено, а також Поль де Кастельжо, співробітник компанії Сітроен [95, 96, 97]. При NURBS-моделюванні будується каркас на базі сплайн-кривих (CV (Control Vertex)-крива та P (Point)-крива), що слугує основою для генерації результуючої тривимірної поверхні [98, 99, 100]. Моделі, утворені на основі сплайнів, мають плавні і гнучкі форми з певною кількістю точок, що в свою чергу стають основою для формування полігональної моделі (Polygon), які можуть наближати до тривимірної форми об’єкта [101].

Нині відсутній єдиний підхід до найменування цифрових прототипів. У середовищі розробників і користувачів паралельно функціонують різні терміни: від «математичної моделі» та «майстер-моделі» до «електронного макета» чи «віртуальної деталі».

Наприклад, під терміном «Електронна модель деталі», наведеному у вітчизняному стандарті ДСТУ ГОСТ 2.052:2006 [102], розуміють документ, що містить електронну геометричну модель деталі та вимоги до її виготовлення та контролю. Залежно від стадії розроблення виробу він мыстить граничні відхилення розмірів, шорсткості поверхонь та ін. Таке визначення не дає уявлення про спосіб опису об'єкта виробництва, про статус такої моделі для опису життєвого циклу виробу.

Поняття «електронний» не пов’язане ні зі структурою моделі, ні способом її зберігання, воно лише вказує на використання комп'ютера під час її застосування.

Тому під електронні моделі підпадають як описи виробів у CAD/CAM системах, так і скановані з паперових носіїв зображення креслеників.

Ще один термін, електронний макет – електронна модель виробу, яка описує його зовнішню форму та розміри, що дає змогу повністю або частково оцінити його взаємодію з елементами виробничого та/або експлуатаційного оточення, яке призначено для ухвалення рішення під час розроблення виробу та процесів його виготовлення та використання [102]. Зазвичай, такий макет виконується на підставі моделі складальної одиниці з використанням мультимедійних технологій, що показують динаміку переміщення і крайні положення рухливих частин, які переміщуються, висуваються або відкидаються – важелів, кареток тощо.

Електронний макет розробляють на проєктних стадіях і використовуються тільки конструкторськими підрозділами, тобто він не призначений для виготовлення виробів і, зазвичай, не містить даних для виготовлення та складання. З одного боку, електронний макет є документом, який описує об'єкт виробництва. Але з іншого – його позиціонують як спосіб опису процесу, правда, без цілей використання цих описів під час виробництва та експлуатації виробу. Однак, АЕ несе в собі більше інформації за електронну модель, оскільки математично описує геометрію деталі, подану об’єднанням елементарних об’ємів, поверхонь, ліній і точок, розроблену засобами та інструментами CAD-систем. До всього ж АЕ описує деякі властивості, наприклад, масу, об’єм, координати центру тяжіння тощо.

Наукові основи впровадження АЕ як першоджерела інформації в систему виробництва подано в роботах науковців Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» Мялиці А.К., Бичкова І.В. та інших авторів [103, 104, 105, 106]. Запропоноване поняття АЕ інтегрує математичний спосіб представлення геометрії та роль моделі як первинного джерела даних, що забезпечує єдність інформаційного супроводу виробу [107, 108]. Відсутність аналогічної змістової наповненості в інших поширених термінах зумовила доцільність використання саме цього поняття в межах дисертаційного дослідження.

2.1 Основа інформаційного супроводу деталей АК

2.1.1 Аналітичний еталон деталі

Опис деталі як об’єкта виробництва починається з опису аналітичного еталона деталі ($АЕ_Д$), що має містити такі типи моделей:

– еталонну модель геометрії поверхні та допусків макровідхилень ($ЕМ_Г$);

– еталонну модель геометрії кромок деталі та допусків на їх відхилення ($ЕМ_{Кр}$);

– еталонні моделі мікрорельєфу поверхні деталі (шорсткість, хвилястість) та її кромок ($ЕМ_{МіКр}$);

– еталонні моделі властивостей (щільність матеріалу, твердість, тип покриття; зносостійкість тощо) деталі, її поверхонь та кромок ($ЕМ_В$);

– еталонні моделі ПЧ поверхні та кромок деталі ($ЕМ_{ПЧ}$).

Моделі покриттів, твердості поверхні, шорсткості та допусків будуються на базі $ЕМ_Г$, яка створюється конструктором за допомогою топологічних операцій CAD-системи з окремих об’ємів (Solid) або поверхонь (Surface). Наприклад, зображена на рис. 2.1 деталь утворена вісьма поверхнями: 1, 7 – площини; 2, 6 – поверхні циліндра; 3, 5 – плоскі кільця; 4 – поверхня циліндра з отворами від перетину її циліндричною поверхнею отвору 8.

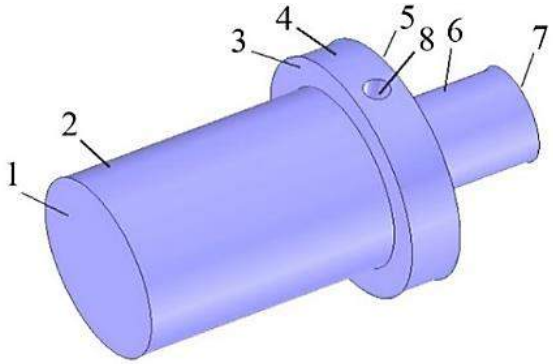
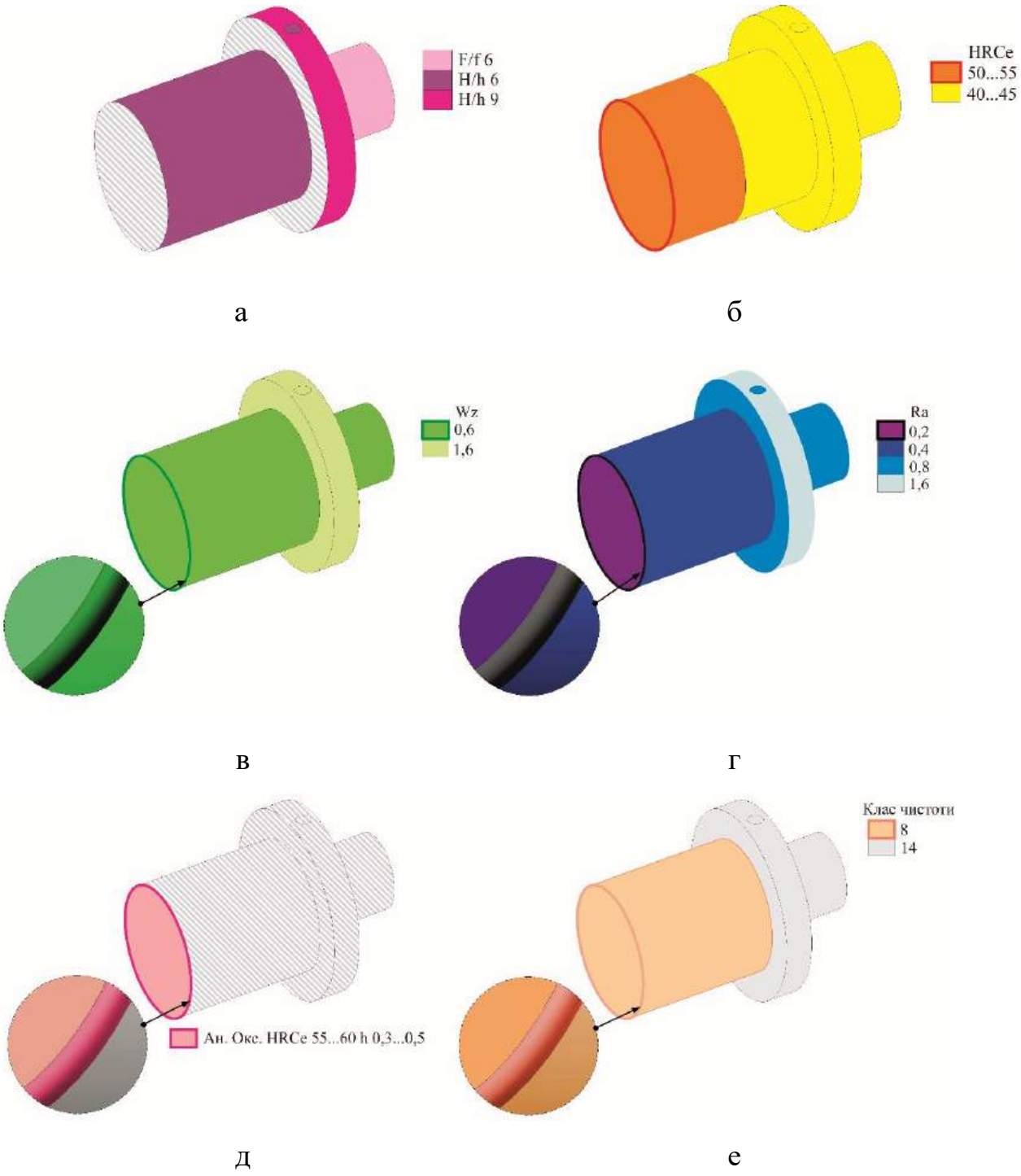


Рис. 2.1 – Зображення еталонної моделі геометрії деталі [5]

Інструментарій CAD-систем дозволяє візуалізувати технологічні параметри шляхом нанесення умовних кольорів і фактур на поверхні моделі. Приклад формування такого аналітичного зразка (рис. 2.2) демонструє ефективність передачі виробничої інформації в такий спосіб.



а б

в г

д е

а – еталонна модель геометрії $EM_Г$ та допустимих відхилень поверхонь та кромок; б – модель твердості поверхонь та кромок; в – модель хвилястості поверхонь та кромок; г – модель шорсткості поверхонь і кромок; д – модель покриттів поверхонь та кромок; е – модель ПЧ поверхонь та кромок

Рис. 2.2 – Формування аналітичного зразка деталі на основі геометрії еталонної моделі [5]

На етапі конструювання виробу після побудови $ЕМ_Г$ деталі розробники кожному атрибуту поверхні задають свої значення відповідно до прийнятого на підприємстві стандарту. Такий підхід гарантує уніфікацію та однозначність інтерпретації даних усіма суб'єктами життєвого циклу виробу. Шкали колірної градації параметрів моделювання розробляються одноразово та регламентуються відповідними стандартами підприємства. Трудомісткість внесення інформації при формуванні моделей незначна порівняно з часом побудови $ЕМ_Г$.

Застосування наведених вище підходів дає змогу реалізувати використання на робочих місцях виробничих підрозділів $АЕ_Д$ замість креслень. Скорочення трудомісткості залежить від кратності застосування $АЕ_Д$ у процесі супроводу процесів виготовлення та експлуатації виробу. Якщо кількість користувачів $АЕ_Д$ буде на кілька порядків більше кількості їх розробників, то проблема трудомісткості формування таких моделей, нехай навіть й високої, перестане бути актуальною, оскільки інформація буде однозначно сприйнята всіма учасниками (суб'єктами) життєвого циклу виробу, що гарантує позитивну ефективність виробництва, у тому числі й економічну.

2.1.2 Портрет деталі

Після виготовлення деталі наступним стає процедура контролю її якості, яка полягає в оцінці відповідності деталі еталону шляхом порівняння еталонної геометрії з фактичної. Остання представляє собою «цифровий портрет» (portrait) реального виробу у формі «хмари точок» (англ. point cloud), зазвичай збереженої у форматі «*.STL» [5]. Формування портрета геометрії деталі ($ПГ_Д$) багато в чому визначається вибором мови її опису. Якщо для еталона $ЕМ_Г$ вибрано мову аналітичної геометрії, то і портрет деталі $ПГ_Д$ також повинен бути описаний цією мовою. Таким чином, $ПГ_Д$ є аналітичною моделлю, побудованою за результатами вимірювань, що описує форму та розміри реальної деталі або її фрагмента в системі координат $АЕ_Д$.

Для реалізації процедур контролю деталі її портрет має містити такі моделі:

– портрет геометрії поверхонь ($ПГ_п$);

– портрет геометрії кромок ($ПГ_{кр}$);

– портрети геометрії мікрорельєфу деталі (шорсткість, хвилястість) та її кромок ($ПГ_{МіКр}$);

– портрети властивостей (щільність матеріалу, твердість, тип покриттів; зносостійкість тощо) деталі, її поверхонь та кромок ($П_В$);

– портрети ПЧ – поверхні та кромок деталі ($П_{ПЧ}$).

Портрети формуються лише для параметрів, які піддаються подальшому контролю. Якщо якісь параметри виробу не контролюються, то відповідні вимірювання не проводяться й портрети не формуються. На рис. 2.3 показано приклад портрета геометрії фрези ($ПГ_ф$), створений за результатами вимірювань реально фізично існуючої фрези. Результати порівняння еталонної моделі геометрії фрези та її портрета геометрії подано на рис. 2.4.

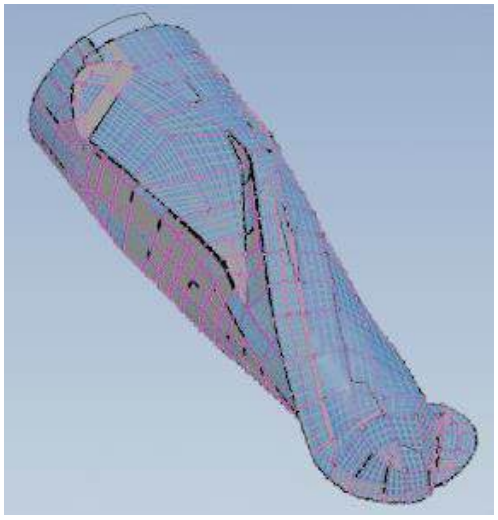


Рис. 2.3 – Портрет геометрії фрези $ПГ_ф$ [28]

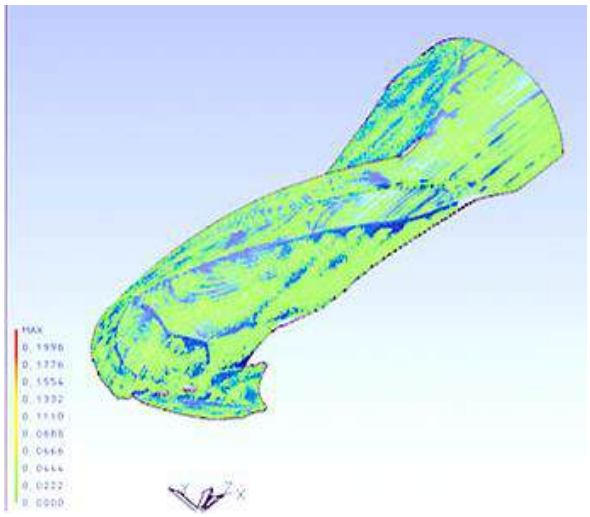


Рис. 2.4 – Порівняння еталонної моделі геометрії та портрета геометрії фрези [28]

Візуалізація відхилень від еталона здійснюється за допомогою колірної шкали: позитивні значення позначаються теплим спектром (від жовтого до червоного), а негативні — холодним (від світло-зеленого до насиченого синього).

Таким чином, ефективний інформаційний супровід виробництва авіаційних конструкцій (АК) для забезпечення їх якості потребує комплексного підходу, що інтегрує геометричні параметри, фізичні властивості та функціональне призначення деталей.

2.2 Розроблення моделі процесів формоутворення на етапі технологічної підготовки виробництва АК

Термін «технологічна підготовка виробництва» (ТПВ) означає «сукупність заходів, яка охоплює проєктування технологічних процесів виробництва, вибір та розміщення устаткування, визначення технологічного оснащення, розроблення методів технічного контролю, нормування матеріально-технічних витрат і забезпечує випуск продукції потрібного рівня якості за певних термінів та обсягів випуску» [109]. ТПВ за стандартом визначається як «наявність на підприємстві повних комплектів конструкторської та технологічної документації та засобів технологічного оснащення, необхідних для виконання заданого обсягу випуску продукції з певними техніко-економічними показниками» [110]. Отже ТПВ розглядається як комплекс взаємопов'язаних процесів, що включає проєктування технологій, вибір засобів виробництва, розробку систем контролю та нормування ресурсів. Тоді метою ТПВ є забезпечення планових обсягів випуску продукції заданої якості у встановлені терміни [111].

Нині використовують сучасні інжинірингові методи з використанням інтелектуальних технологій, автоматизації, роботизації тощо на базі CAD/CAM/CAE-систем, що в свою чергу скорочує терміни ТПВ. Однак сучасний стан ТПВ характеризується низкою системних проблем, а саме:

– інформаційний розрив, тобто невідповідність між застарілою паперовою документацією (виробів минулих поколінь) та сучасними вимогами до електронного опису (АЕ АК);

– висока трудомісткість, що продиктована значними часовими витратами на проєктування складного технологічного оснащення і програм для верстатів із ЧПК;

– складність інтеграції нових модифікацій та ремонтних рішень із технологічною базою, що була сформована понад 20 років тому;

– фрагментарне використання CAD/CAM/CAE-систем, що перешкоджає створенню єдиного наскрізного циклу ТПВ.

Розв’язанню цих проблем сприяють технології PI на основі встановлення єдиного першоджерела інформації, що в результаті реалізує концепцію «ідея – макет – виріб» замість традиційної «ідея – креслення – виріб» [112].

2.2.1 Технологічні заходи для скорочення термінів ТПВ на базі єдиного першоджерела інформації

ТПВ АК на серійному заводі містить такі роботи [113–114]:

– технологічне оброблення серійних креслень АК;

– проведення робіт із забезпечення технологічності;

– проєктування та впровадження передових технологічних процесів виготовлення АК;

– застосування методів та засобів технічного контролю якості виготовлення АК;

– проєктування, виготовлення та налагодження технологічного оснащення для устаткування всіх видів технологічних процесів, а також спеціального обладнання та засобів механізації;

– визначення прогресивних розрахунково-технічних норм режимів технологічного процесу та витрат часу на виконання операцій, витрати матеріалів та інструменту, палива та енергії для технологічних цілей, а також використання обладнання;

– розрахунок потрібних обсягів енергетичних ресурсів;

– проєктування та впровадження передових форм організації виробничих процесів та праці;

– визначення обсягів робіт цехів основного виробництва («розцеховування» виробу) та розроблення документації технологічного планування;

– розрахунок обладнання та площ, складання планувань цехів та технічного плану реконструкції заводу.

Удосконалення організаційних форм ТПВ означає насамперед:

– маневрування кількістю виконавців у технічних підрозділах за принципом скорочення критичного шляху;

– розбиття процесу підготовки технологічного обладнання на етапи.

Зазвичай розрізняють три черги виготовлення оснащення [110, 115].

До першої черги належить технологічне оснащення, що є критично необхідним для забезпечення заданого рівня якості виробу. Саме цей комплекс засобів уможливлює випуск першого зразка АК та виробництво головної серії.

До другої черги належить оснащення, що в поєднанні з першою чергою формує повний технологічний комплект виробу, спроєктований за принципами серійної технології. Застосування цієї групи засобів спрямоване на радикальне зниження трудомісткості та суттєве скорочення виробничих циклів.

До третьої черги належить дублювальне оснащення у кількості, необхідній для досягнення цільових обсягів виробництва. Вона також охоплює засоби поглибленої механізації, що спрямовані на мінімізацію ручної праці, зниження трудомісткості та адаптацію процесів до конструктивних змін чи модифікацій виробу.

Третя черга оснащення забезпечує:

– серійне виробництво виробів, що встановилося;

– визначення місця, послідовності та тривалості виготовлення деталей, вузлів, агрегатів та виробу в цілому;

– визначення порядку руху, комплектування та складання деталей, вузлів, агрегатів та виробу;

– раціональне розміщення всіх ділянок виробництва на виробничих площах з урахуванням потокового виробництва.

Важливим етапом є забезпечення технологічної раціональності виробу, що передбачає мінімізацію витрат ресурсів і часу при збереженні заданих експлуатаційних характеристик, що наведено в [116, 117, 118]: технологічність конструкції визначається сукупністю її властивостей, що дає змогу застосувати під час виготовлення прогресивні технологічні процеси, високопродуктивне автоматизоване або автоматичне обладнання, нові матеріали та забезпечити високу якість за мінімальних витрат праці та часу.

У цих та інших джерелах нечітко проглядається три складові (аспекти) поняття технологічності, також взаємозв'язаних між собою, що закладаються (формуються) здебільшого на етапах проєктування виробу (проєктна технологічність), і реалізуються на стадії виробництва (виробнича технологічність) і в процесі експлуатації (експлуатаційна технологічність).

Деякі автори зазначають, що великі резерви скорочення ТПВ криються у взаємодії та узгодженості конструктивної (проєктної) технологічності та виробничої технологічності [116]. Експлуатаційна технологічність визначає свої якості в процесі експлуатації виробу і є переважно результатом конструкторського етапу ТПВ. На цьому етапі технічного розвитку найважливішим чинником скорочення термінів ТПВ є стан інформаційної автоматизованої підтримки ТПВ АО [117, 118].

Основним резервом підвищення ефективності ТПВ та скорочення термінів її виконання є реалізація системи автоматизованого конструювання та виготовлення пристроїв при ТПВ АО у режимі віртуальної реальності [117].

Зміст робіт з ТПВ нової АК залежить від великої кількості факторів:

– складності та новизни технічних рішень у створюваному виробі;

– масштабів майбутнього виробництва;

– розподілу робіт між проєктними та виробничими підприємствами;

– наявність експериментальної бази на підприємствах;

– рівня автоматизації праці інженерно-технічного персоналу;

– досвіду та структури виробничо-адміністративних підрозділів підприємства.

Найбільш важливою проблемою ТПВ є поєднання етапів конструкторської та технологічної підготовки, що представлені у таблиці 2.1 [119].

При вирішенні сучасних наукових проблем, що належать до проблеми створення АК, доводиться одночасно вирішувати питання конструкторського та технологічного відпрацювання у ТПВ, включаючи створення нового обладнання, нових технологічних процесів та виробництв, підготовку кадрів та ін.

Відмінною рисою ТПВ є її багатоваріантність, під якою розуміють можливість отримання заданих параметрів процесів, вузлів та виробів у цілому різними

способами. Тому найважливіше завдання, що вирішують технологи, полягає у пошуку оптимальних рішень, які дають змогу забезпечувати випуск запланованої продукції за найменших трудових і матеріальних ресурсів.

Табл. 2.1 – Поєднання етапів ТПВ [119]

Конструкторський етап ТПВ	Технологічний етап ТПВ
Технічне завдання	–
Технічна пропозиція	–
Ескізний проєкт	Попередній проєкт
Технічний проєкт	
Розроблення робочої документації на дослідний зразок	Розроблення технічної документації
Виготовлення та випробування зразка (серії)	Виготовлення та випробування зразка (серії)
Серійне виробництво	Серійне виробництво

При цьому методологія ТПВ передбачає інтегроване вирішення конструкторсько-технологічних завдань, спрямоване на інтенсифікацію праці, оптимізацію витрат ресурсів та скорочення повного циклу створення і супроводу виробу за заданих параметрів якості.

Істотним викликом на етапі проєктування є інформаційна невизначеність багатьох техніко-економічних показників. Це зумовлює необхідність жорсткої координації дій виконавців та застосування верифікованих методів планування, що нівелюють ризики часових і фінансових втрат.

В авіабудуванні система планування базується на узгодженні локальних графіків підрозділів із наскрізним планом об’єкта. Функцію зведеного планування виконує бюро ТПВ, забезпечуючи моніторинг, актуалізацію документації та безперервний контроль реалізації етапів робіт.

Ключовими складовими системи календарного планування ТПВ є:

– розробка та постійна актуалізація нормативної бази (часових витрат, тривалості виробничих циклів та собівартості ТПВ);

– моніторинг і верифікація фактичного стану виконання робіт згідно із затвердженими графіками;

– адміністрування та координація планових заходів у межах технологічної підготовки.

Усі подані роботи та конструктивно-технологічні рішення, які виконуються при ТПВ та описані вище, у сучасному виробництві будуються на єдиному носії інформації – АЕ. Усі процеси формоутворення при ТПВ АК на базі АЕ реалізовуються шляхом вирішення прямих та зворотних завдань [119]. Саме після створення АЕ як носія первинної інформації виробу починається розбудова ТПВ.

АЕ дає змогу на початку проведення ТПВ сформулювати коректну постановку прямих і зворотних завдань в умовах промислових підприємств, в інформаційному супроводі цих процесів, у наявності та ефективному застосуванні економічно виправданих інструментальних засобів. Конструктор подає інформацію про об'єкт виробництва за допомогою АЕ деталі для всіх учасників виробничого процесу.

Технологічний процес містить опис змін об’єкта виробництва у часі, що означає необхідність розроблення моделей формотворчих процесів, зміни заготовки до отримання деталі, виконання технологічних вимірювань для отримання її портрета і порівняння з АЕ у межах процедур контролю.

АЕ складання описує взаємне розташування у просторі всіх комплектувальних виробів, а складальний технологічний процес являє собою опис операцій із встановлення деталей у складальне положення, з’єднання їх у вузли, панелі, агрегати та АК у цілому в часі з виконанням контрольних процедур, що означає необхідність розроблення відповідних моделей процесів.

2.2.2 Модель процесів формоутворення на етапі ТПВ АК за допомогою PI при розв’язанні прямого та зворотного завдань формоутворення

Формоутворення дослідної АК у виробництві при розв’язанні прямих і зворотних завдань реалізовується з використанням сучасних центрів з ЧПК шляхом оснащення їх засобами контролю, де пряме завдання вирішується на етапах проєктування, а зворотне – на етапах контролю. Безпосередньо перед виготовленням АК

виконуються проєктувальні розрахунки для отримання геометрії – $АЕ_{АК}$. Відповідно до технічного завдання визначаються аеродинамічні характеристики профілів, виконуються додаткові уточнювальні розрахунки для формування аналітичного еталона заготовки – $АЕ_{АКЗ}$. Наступним етапом вирішення прямого завдання формоутворення стає вибір обладнання, інструменту, способу кріплення матеріалу в стані поставки та розробляються моделі процесів отримання заготовки – $МП_{АОЗ}$, за яким саме і виготовляються заготовка та остаточна деталь.

Зворотне завдання формоутворення реалізовується за технологією РІ за результатами вимірів реальної АК з подальшою відбудовою аналітичних даних $АЕ_{АК}$ за необхідності. Зворотне завдання формоутворення – це операції контролю готової АК шляхом порівняння портрета $П_{АО}$, отриманого 3D-скануванням АК, з аналітичним еталоном $АЕ_{АК}$. За результатами контролю з урахуванням перевірочних розрахунків приймається рішення щодо якості виготовленої АТ і при позитивному рішенні завдання формоутворення вважається виконаним, а при негативному – виконується коригування $АЕ_{АК}$ і $МП_{АКЗ}$.

У табл. 2.2 наведено укрупнені алгоритми процесів формоутворення для виробництва АК [119]:

– постачання матеріалу та доведення його до стану заготовок, при цьому наявність аналітичного еталона заготовки $АЕ_З$ (модель 1) є обов’язковою умовою початку цих процесів;

– формоутворення для виготовлення деталей відповідно до аналітичного еталона деталі $АЕ_Д$ (модель 2);

– 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 $АЕ_{КОМП}$ (модель 3). При застосуванні клепальних автоматів попереднє складання комплектів агрегатів виконується у спрощених складальних пристроях;

– 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).

Табл. 2.2 – Модель процесів формоутворення АО на стадії ТПВ

Аналітичні еталони:				
Заготовок	Деталей	Складального комплекту	Складеного виробу	Формоутворюючого оснащення
1 $AE_З$	2 $AE_Д$	3 $AE_{КОМП}$	4 $AE_{СВ}$	5 $AE_{ФО}$
Процеси формоутворення:				
Заготовок	Деталей	Складального комплекту	Складеного виробу	Оснащення
6 $МП_З$	7 $МП_Д$	8 $МП_{СВ}$		9 $МП_О$
Процеси вимірювань:				
Заготовок	Деталей	Покупних виробів	Складеного виробу	Оснащення
10 $МП_{ВЗ}$	11 $МП_{ВД}$	12 $МП_{ВПВ}$	13 $МП_{ВСВ}$	14 $МП_{ВО}$
Аналітичні портрети:				
Заготовок	Деталей	Покупних виробів	Складеного виробу	Оснащення
15 $П_З$	16 $П_Д$	17 $П_{ПВ}$	18 $П_{СВ}$	19 $П_О$
Виконання процедур контролю:				
20 Порівняння $П_З$ та $AE_З$	21 Порівняння $П_Д$ та $AE_Д$	22 Порівняння $П_{ПВ}$ та $AE_{КОМП}$	23 Порівняння $П_{СВ}$ та $AE_{СВ}$	24 Порівняння $П_О$ та $AE_О$
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

Наявність відповідних АЕ для них перед початком виконання кожного з перелічених вище етапів дає змогу формулювати постановку прямого та зворотного завдань формоутворення.

На першому етапі пряме завдання формоутворення зводиться до отримання заготовок за наявними $АЕ_З$. Для реалізації цього завдання вибирається обладнання, інструмент, спосіб кріплення матеріалу в стані постачання та розробляються моделі процесу отримання заготовок $МП_З$ (модель 6). Закінчення виконання $МП_З$ означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотне завдання формоутворення – за результатами вимірювань будують аналітичні портрети заготовок $П_З$ (модель 15). Для реалізації процедур контролю (модель 20) необхідно виконати порівняння $АЕ_З$ та їх портретів $Пз$ (модель 15):

$$\left|F(АЕ_З)-F(П_З)\right| \le F(\Delta), \qquad (2.1)$$

де $F(АЕ_З)$ – визначальні параметри $АЕ_З$;

$F(П_З)$ – визначальні параметри портретів заготовок;

$F(\Delta)$ – допустимі похибки визначальних параметрів.

Позитивні результати виконання умови (2.1) означає завершення вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення (модель 27) на цьому етапі, що дає змогу почати виконувати наступний етап.

На другому етапі пряме завдання формоутворення передбачає виготовлення деталей за інформацією з $АЕ_Д$ (модель 2). Для реалізації цього завдання вибирається обладнання, інструмент, спосіб кріплення заготовок та розробляються моделі процесу одержання деталей $МП_Д$ (модель 7). Якщо як обладнання вибрано верстат з ЧПК, то моделі процесів містять керувальні програми. Закінчення виконання моделей процесу означає вирішення прямого завдання формоутворення з виготовлення деталей. Потім необхідно розв'язати зворотне завдання формоутворення для виконання контрольних операцій. Якщо при виготовленні деталей використовувалося обладнання з ЧПК, то раціонально виконати на цьому обладнанні вимірювальні процедури, замінивши формоутворювальний інструмент вимірювальним. Для виконання процедур вимірювання деталі необхідно розробити

відповідні моделі процесів вимірювання деталей $МП_{ВД}$ (модель 11). За результатами вимірювань будують аналітичні портрети деталей $П_Д$ (моделі 16). Для реалізації процедури контролю (модель 21) необхідно виконати порівняння $АЕ_Д$ (модель 2) з їх портретами $П_Д$ (модель 16):

$$\left|F\left(АЕ_Д\right)-F\left(П_Д\right)\right| \le F(\Delta), \qquad (2.2)$$

де $F(АЕ_Д)$ – визначальні параметри $АЕ_Д$;

$F(П_Д)$ – визначальні параметри портретів деталей.

Третій етап не передбачає вирішення прямого завдання формоутворення за інформацією $АЕ_{КОМП}$ (модель 3), оскільки всі деталі виготовлені з виконанням процедур контролю. Для цього етапу передбачено вирішення зворотного завдання формоутворення щодо проведення контрольних операцій для покупних виробів (модель 22) за умовою (2.2), що дає змогу прийняти рішення про якість покупних виробів перед їх складанням (процедура 29).

На четвертому етапі метою прямого завдання формоутворення є створення аналітичного еталона складеного виробу $АЕ_{СВ}$ (модель 4). Для реалізації цього завдання вибирають складальні пристрої та інструмент, після чого створюють модель складеного виробу $МП_{СВ}$ (модель 8). Закінчення складання означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотне завдання – отримання аналітичного портрета складеного виробу та виконання процедур порівняння.

Для виконання вимірювальних процедур необхідно розробити відповідні моделі процесів вимірювання $МП_{ВСВ}$ (модель 13). За результатами вимірювань будується аналітичний портрет складеного виробу $П_{СВ}$ (модель 18).

Процедура контролю (модель 23) полягає у порівнянні $АЕ_{СВ}$ (модель 4) та $П_{СВ}$ (модель 18):

$$\left|F\left(АЕ_{СВ}\right)-F\left(П_{СВ}\right)\right| \le F(\Delta), \qquad (2.3)$$

де $F(АЕ_{СВ})$ – визначальні параметри $АЕ_{СВ}$;

$F(П_{СВ})$ – визначальні параметри $П_{СВ}$.

Виконання умови (2.3) означає, що вирішення завдання формоутворення на етапі складання виробу (процедура 30) успішно завершено.

Аналіз складальних операцій дав змогу виявити деякі особливості інформаційного супроводу таких процесів. Якщо потрібно вирішити пряме завдання формоутворення шляхом складання об'єкта виробництва, то крім аналітичного еталона $АЕ_{СВ}$ розроблення моделі процесу складання $МП_{СВ}$ (модель 8) необхідно мати аналітичні зразки геометрії складального оснащення $АЕ_{О}$ (модель 5).

Розроблення АЕ обладнання з ЧПК, у тому числі й клепальних автоматів, не потребує великих трудовитрат, оскільки в багатьох CAD/CAM-системах вже сформовані бази з моделями найпопулярнішого обладнання. У більшості систем є можливість створення моделей обладнання, що бракує.

Тому після виконання ТПВ в інформаційну систему підприємства можуть бути включені всі одиниці обладнання з ЧПК та все технологічне оснащення. Використання інформації у такому вигляді створює можливість вирішення великої кількості завдань з обслуговування формоутворювальних систем, розроблення матеріальних та трудових норм, проведення робіт з розроблення планів-графіків ТПВ, впровадження технологічних процесів, нормалізації та уніфікації технологічного обладнання, модернізації обладнання тощо.

Отже, вирішальну роль у скороченны термінів при ТПВ АО відіграють процеси формоутворення, які реалізовані шляхом вирішення прямих та зворотних завдань на базі АЕ як носія повної інформації виробу.

Складність ТПВ АК полягає у створенні коректного АЕ для всіх учасників виробничого процесу, від якого залежить взаємозв’язок конструкторських і технологічних етапів ТПВ.

ТПВ для виготовлення АК поєднує вирішення двох завдань (прямих і зворотних) за допомогою РІ, де пряме завдання формоутворення виготовлення АО виконується відповідно до інформації з моделі процесу $МП_{АО}$ за аналітичним еталоном $АЕ_{АО}$, а процес створення $АЕ_{АО}$ з реального АК стає зворотним завданням формоутворення.

Тоді зниження термінів загальної трудомісткості ТПВ АК стає можливим саме завдяки використанню єдиного АЕ для будь-яких алгоритмів при вирішенні прямих та зворотних завдань.

2.2.3 Інформаційний супровід АК протягом життєвого циклу виробу за АЕ

Для опису складеного об'єкта виробництва використовується поняття АЕ складання (вузла, агрегату, виробу), який містить (рис. 2.5): модель системи координат складання; склад виробу та його структуру; координати аналітичного еталона кожної деталі та їх орієнтацію відносно системи координат складання; посилання на аналітичні еталони деталей.

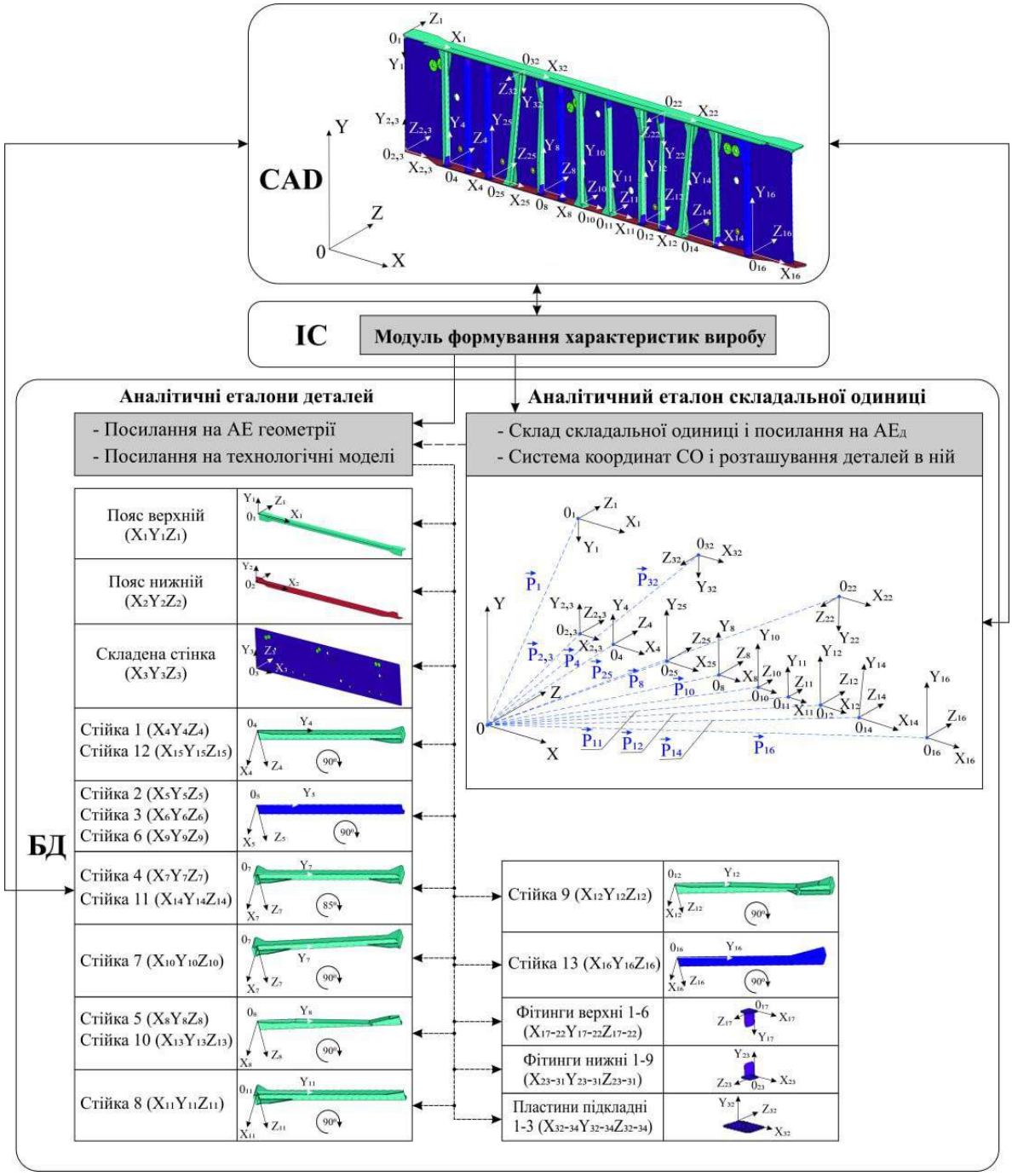


Рис. 2.4 – Аналітичний еталон складання (структура АЕ складання):
БД – база даних; ІС – інформаційний супровід; CAD – 3D-модель (АЕ) СО [120]

З метою оптимізації бази даних та запобігання надмірності (дублюванню) інформації, зберігання організовано виключно для АЕ оригінальних деталей. Використання механізму динамічних посилань дозволяє автоматично оновлювати складальні одиниці при внесенні конструктивних змін у базові елементи.

Якщо життєвий цикл екземпляра АК це послідовність процесів від початку запуску виробу у виробництво до його утилізації, то й АЕ має представляти еталонний опис АК на цих стадіях від початку його запуску у виробництво до закінчення утилізації. Тоді АЕ АК є моделлю, що описує ідеальну послідовність станів АК від початку запуску у виробництво до закінчення утилізації (рис. 2.6).



Рис. 2.6 – Стадії ЖЦ АК та інформаційний супровід АЕ [5]

Опис життєвого циклу примірника АК можна спрощено уявити такою послідовністю взаємозв'язаних моделей:

– постачання матеріалу та доведення його до стану заготовок, аналітичні еталони яких позначені як $AE_З$, що дає змогу розробити моделі процесів виготовлення заготовок ($МП_З$);

– виготовлення деталей відповідно до аналітичних еталонів деталей ($AE_Д$) згідно з відповідними моделями процесів ($МП_Д$);

– комплектація деталей перед складанням відповідно до аналітичного еталона складального комплекту ($AE_{КОМПЛ}$) після виконання контролю цеху виробника згідно з відповідними моделями процесів ($МП_{КОМПЛ}$);

– виконання всіх складальних операцій ($МП_{СКЛ}$), у тому числі шляхом зміни геометрії сполучних елементів і опису стану виробу за аналітичним еталоном складальної одиниці ($AE_{СКЛ}$);

– виконання випробувань, спорядження та заправка всіх систем, нівелювання реперних точок виробу для врахування можливих змін геометрії конструкції під впливом сили тяжіння, сил тертя в механізмах або інших факторів згідно з $МП_{ВИПР}$, що описується аналітичним еталоном виробу після випробувань ($АЕ_{ВИПР}$);

– експлуатація до проведення перших регламентних робіт, наприклад після нальоту 50 годин, що описується аналітичним еталоном виробу перед регламентними роботами ($АЕ_{Р1}$) та процесами щодо їх виконання ($МП_{Р1}$);

– експлуатація до виконання капітального ремонту, що описується аналітичним еталоном виробу перед капітальним ремонтом ($АЕ_{КАПР}$) та процесами його виконання ($МП_{КАПР}$);

– експлуатація до закінчення ресурсу, що описується виконанням певних процедур ($МП_{ЗЕР}$), а у відповідному аналітичному еталоні ($АЕ_{ЗЕР}$) вказано параметри, досягнення яких має означати закінчення експлуатації;

– утилізація виробу, що означає виконання певних процесів ($МП_{УТИЛ}$), які описують перехід до аналітичного еталона виробу після його утилізації ($АЕ_{УТИЛ}$).

2.3 Прототипування складних за формою деталей АК за методами РІ за умов забезпечення заданої точності

2.3.1 Аналіз відкритих джерел із застосування РІ деталей АК

Звичайний (традиційний або класичний) РІ у сучасному виробництві – це комплекс операцій, що передбачає не тільки відтворення АЕ, а й контроль на різних етапах життєвого циклу зразка АК [5, 121] і в системах автоматизації [13, 121, 122].

Авторами робіт [123, 124] описано можливості реалізації технології РІ, зокрема прототипування, для випадків, коли відсутня будь-яка технічна документація на реально фізично існуючу деталь. Окремо виділено процес роботи з «хмарою точок» та розпізнавання поверхонь шляхом їх сегментації для виявлення їх геометрії. Зокрема запропоновано техніку розроблення бази даних з «хмар точок» й спосіб

швидкої інтеграції технології PI в CAD/CAM/CAE-системи, але їх використання можливе лише в спеціальному програмному забезпеченні на комерційній основі.

У роботі [125] показано ефективність використання КВМ та сканерів із забезпеченням точності вимірів поверхонь деталей на рівні 0,01…0,05 мм. Це дасть змогу відтворити АЕ без додаткових геометричних побудов, але й не унеможливлює існування додаткового етапу із його створення.

У [126] подано технічні рішення щодо особливостей створення АЕ у вигляді колекції 3D-моделей, яка відображує фізичну суть дослідного зразка АК у CAD/CAE-системі. Однак в цих рішеннях передбачено наявність конструкторської документації, тому вони потребують подальшого доопрацювання.

У роботі [127] розглядаються концепції відновлення АК на засадах PI, що базуються на аналізі технічного стану та ідентифікації об’єкта. Запропонований авторами метод обробки відсканованих поверхонь (портретів) дозволяє відтворити лише геометричну форму оригінального зразка, однак відкритим лишається питання щодо достатності даних для об'єктивного контролю. З огляду на це, обґрунтовано доцільність створення повноцінного АЕ. Це дозволить оптимізувати процедуру верифікації шляхом порівняння отриманого портрета реального об’єкта з його цифровим еталоном.

Складність створення АЕ підтверджено в роботі [128], де показано його побудову за аксіомами метричної геометрії Евкліда або Гільберта або Гіркгова. На сьогодні технології PI належать до низки інструментарію вирішення надсучасної задачі створення віртуального продукту, його виробництва та контролю в єдиному інформаційному просторі. Однак саме прагнення забезпечити високі показники термінів виробництва при збереженні якості створили передумови для спрощення PI до сталого. Єдиною складністю є робота з отриманим портретом, внаслідок чого дослідники пропонують ту чи іншу методику їх оброблення з використанням відповідного програмного забезпечення.

Так, у роботі [129] подано методологію на основі алгоритмів MATLAB, що виконує генерацію поверхні в ручному режимі користувача. Такий метод був перевірений на реальній моделі захисного елемента носка черевика. Слід зауважити, що

досліджувана поверхня не мала складних геометричних конструктивів, наприклад гострих кутів або отворів діаметром менше 5 мм. Тому не зважаючи на практичну значущість отриманих результатів, технологію сталого РІ не розглянуто в достатній мірі. Варіантом вирішення цієї проблеми може бути використання методу за рекомендаціями роботи [130]. Для роботи з отриманим портретом пропонується попередньо розбити його на прості геометричні фігури (трикутники чи прямокутники), окремо опрацювати «хмари точок» з наступним поєднанням таких фігур в єдину сітку, тобто портрет форматом «*.STL». Незважаючи на позитивність отриманих результатів, що підтверджено при контролі виготовленої деталі за адитивними технологіями, використання поданого методу для авіаційних деталей високої точності викликає сумніви, оскільки необхідно забезпечити точність ±0,01…0,5 мм і більше.

Отже за допомогою РІ вирішується два завдання формоутворення:

– пряме – створення першоджерела інформації деталі АК і безпосереднє виготовлення за ним реального зразка;

– зворотне – контроль цього зразка шляхом порівняння його оригінальної геометрії з відповідною геометрією установленого першоджерела інформації.

Як було сказано раніше, реалізація зворотного завдання РІ починається зі сканування оригінального зразка і створення єдиної «хмари точок» файлу форматом «*.STL», тобто портрету. Відхилення портрета виготовленої деталі від установленого першоджерела інформації деталі саме й відображає похибку формоутворення, що в свою чергу говорить про точність виготовлення. У той же час, портрет дослідної деталі АК дає дані з геометрії, використовуючи які, можна побудувати 3D-модель з поновленням втраченої геометрії для пошкоджених або зношених кромок і поверхонь у тому числі, що в свою чергу дає змогу створити єдине першоджерело інформації такої деталі, тобто її АЕ.

Таким чином технологія РІ реалізовується за такою послідовністю:

1. Сканування деталі.

2. Оброблення портрета деталі.

3. Опис моделі процесів і функцій деталі.

4. Створення АЕ деталі.

5. Створення 3D-моделі для вибраної технології виготовлення деталі

або

6. Створення 3D-моделі і її перетворення в модель файлу форматом «*.STL» для виготовлення деталі 3D-друком або на верстаті з ЧПК.

7. Виготовлення деталі.

Отже фактично йде перетворення отриманого з оригінальної деталі портрету (п. 2) в еталонний портрет (п. 6) з «нульовими відхиленнями». З цього виходить, що при прототипуванні деталі адитивними або екстрактивними технологіями стає достатнім використання портрету (п. 1–2), геометрію якого уточнено і визначено як першоджерело інформації, тобто прийнято як еталонний портрет. Надалі такий метод РІ, що дозволяє прототипувати деталі виключно з отриманого і доопрацьованого портрету (еталонного), оминаючи етапи зі створення АЕ, названо сталим реверс-інжинірингом (англ. Sustainable reverse engineering), а метод РІ з повним циклом утворення АЕ – звичайним. Зважаючи на різницю в кількості етапів позначених методів РІ, для сталого РІ час, вартість і трудомісткість робіт з прототипування деталей АК значно менша, ніж за звичайним РІ.

Однак в свою чергу звичайний РІ забезпечує відтворення першоджерела інформації з «нульовими відхиленнями», тоді як для сталого РІ така гарантія відсутня і особливо це стосується деталей зі зношеними або пошкодженими кромками і поверхнями.

Тому лишається відкритим питання щодо розуміння умов використання того чи іншого методу (сталого чи звичайного) РІ при виробництві деталі АК в найкоротші терміни із забезпеченням вимог точності, що стає актуальним дослідженням у цьому напрямку. Цей факт дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення серії випробувань авіаційних деталей складної форми з визначення точності створених еталонних портретів і виготовлених за ними деталей-прототипів АК; порівняння за часом використання сталого і звичайного методів РІ на одній і тій же деталі, що має різні складні геометричні рішення (отвори, радіуси в кутах тощо), а

також створенню методів і підходів, що забезпечують точність виготовленої і прототипованої деталі АК за PI і за сталим PI у тому числі.

2.3.2 Конструктивно-технологічний аналіз деталі АК та підбір 3D-сканера

На рис. 2.7 показано дослідний зразок – корпус рульової машини АК.



а б

а – внутрішня сторона; б – зовнішня сторона

Рис. 2.7 – Корпус рульової машини АК

Вибір даного корпусу як об’єкта дослідження зумовлений його складною геометричною конфігурацією, що характеризується наявністю наскрізних отворів різної топології, сполученням кутових елементів та перетином поверхонь складних форм. Конструктивно-технологічний аналіз показав, що корпус має:

– наскрізні отвори різних діаметрів (від 10 до 41,6 мм) і форм (квадратні, трапецієподібні, круглі);

– тонкі стінки між отворами (до 1,6 мм);

– кути 90° і радіуси скруглення в них (до 1–4 мм);

– товщину стінок корпусу 2,4 мм;

– міжцентрову дистанцію отворів від 58,2 до 83,9 мм;

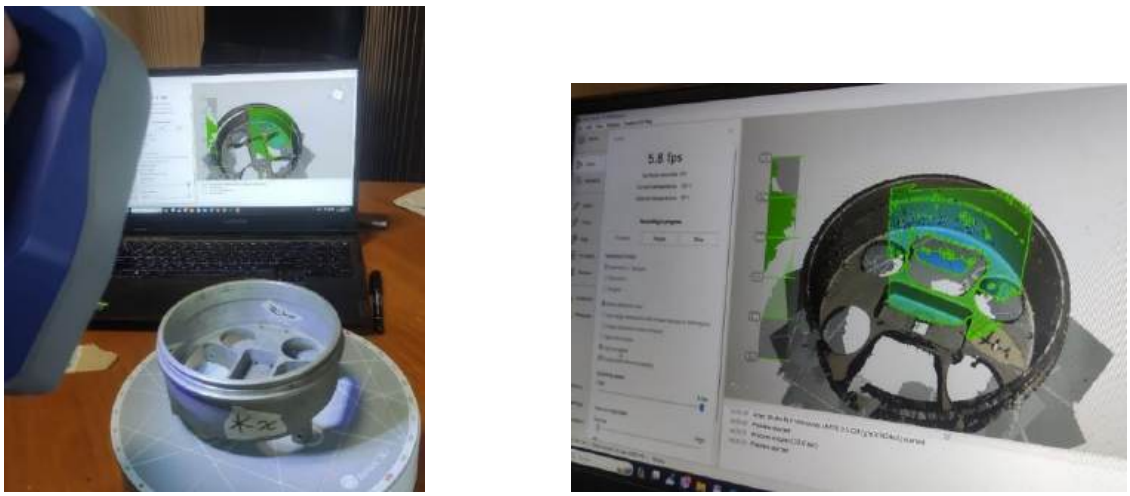
– товщину стінки між краєм деталі та отвором до 5 мм.

Для отримання цифрової копії використано 3D-сканер Artec Space Spider (Люксембург), що забезпечує точність сканування 0,05 мм при роздільній здатності

до 0,1 мм [131]. Метрологічні характеристики приладу повністю відповідали встановленим допускам досліджуваної деталі, що визначено за результатами її конструктивно-технологічного аналізу.

2.3.3 Створення портрета та АЕ корпусу рульової машини АК

Отримання замкнутої геометрії деталі передбачало послідовне сканування її поверхонь з обох боків. Результатом цього етапу (рис. 2.8) стали два незалежні хмари точок, кожна з яких була зорієнтована у локальній системі координат сканера. Для суміщення результатів сканування різних боків досліджуваної деталі використовувалися реперні маркери (рис. 2.9), що дозволило сформувати єдину полігональну сітку в середовищі Artec Studio. На основі цих ідентифікаторів проведено вирівнювання сканованих поверхонь за спільною геометрією, в результаті чого отримано портрет у форматі «*.STL» (рис. 2.10). Подальша постобробка портрета (фільтрація шумів, усунення дефектів сітки та редукція кількості полігонів зі збереженням вихідної топології) реалізована в програмному комплексі Geomagic Design X.



а б

а – сканування корпусу; б – поява сканувальних поверхонь в програмі Artec Studio

Рис. 2.8 – Процес сканування корпусу рульової машини АК 3D-сканером Artec Space Spider

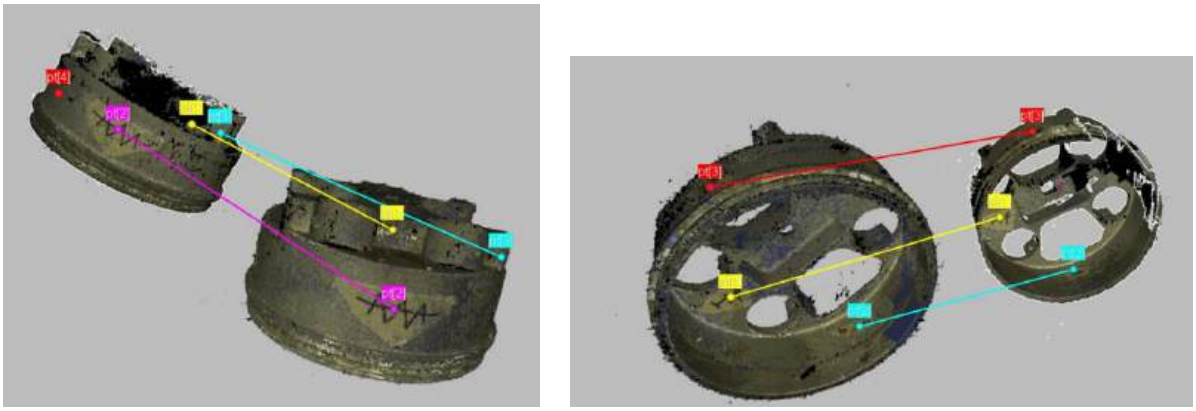


Рис. 2.9 – Процес вирівнювання відсканованих боків між собою



а б

а – без текстури; б – з текстурою

Рис. 2.10 – Створений реальний портрет корпусу рульової машини АО

Для фінальної корекції та оптимізації полігональної моделі в середовищі Geomagic Design X було застосовано наступний інструментарій.

Healing Wizard – для верифікації структури сітки та автоматичного усунення топологічних дефектів, таких як самоперетини, «шипи», розриви та дрібні ізольовані компоненти.

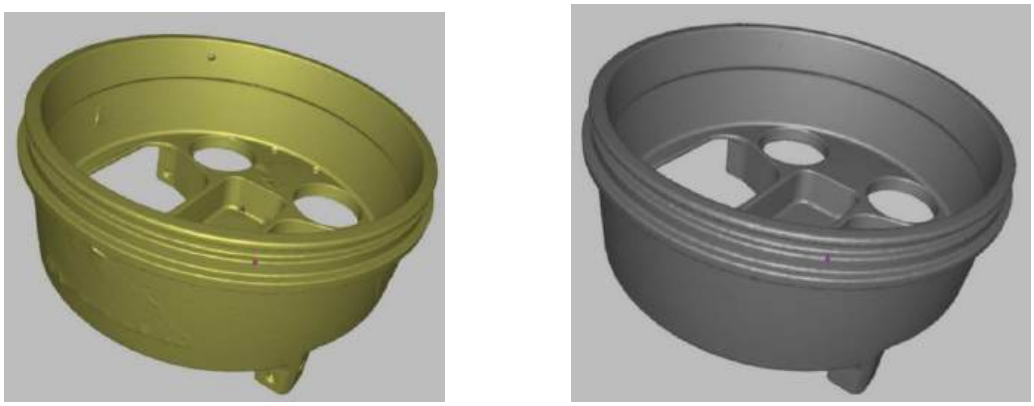
Decimate – з метою раціонального зменшення щільності полігональної сітки до заданих параметрів за умови збереження високої деталізації та точності відтворення форми об'єкта.

Optimize Mesh – для покращення якості сітки шляхом формування більш рівномірної структури трикутників.

Defeature – для інтелектуального видалення з поверхонь сторонніх елементів (маркерів трекінгу), технологічних дефектів та небажаних отворів із подальшою автоматичною реконструкцією ділянок.

Fill Holes – для герметизації (заповнення) розривів та сколів, що дозволяє коректно опрацьовувати отвори зі складною геометрією за допомогою функцій побудови «мостів» та згладжування граней.

На рис. 2.11 наведено два портрети: реальний і еталонний. Останній – це очищений та замкнутий реальний портрет без недоліків, що отримано в результаті перетворень. Еталонний портрет доцільно використовувати для вписування параметричних поверхонь для побудови АЕ, що в свою чергу збільшує точність геометрії.



а б

а – реальний; б – еталонний

Рис. 2.11 – Портрет корпусу рулевої машини АК формату файлу «*.STL»

На рис. 2.12 зображено ескіз за полігональною сіткою, а на рис. 2.13 – побудований ескіз цього силуета для створення АЕ [131].

Наступним стало формоутворення АЕ за даними геометрії отриманого еталонного портрета рульової машини АК в програмному забезпеченні Geomagic Design X з такою послідовністю операцій [132]:

1. Сегментація поверхонь: за допомогою функції Auto Segment здійснено автоматичну декомпозицію полігональної сітки на геометричні примітиви (площини, циліндри, конуси). Ділянки, що не підлягали аналітичному опису, класифіковано як поверхні вільної форми (криволінійні).

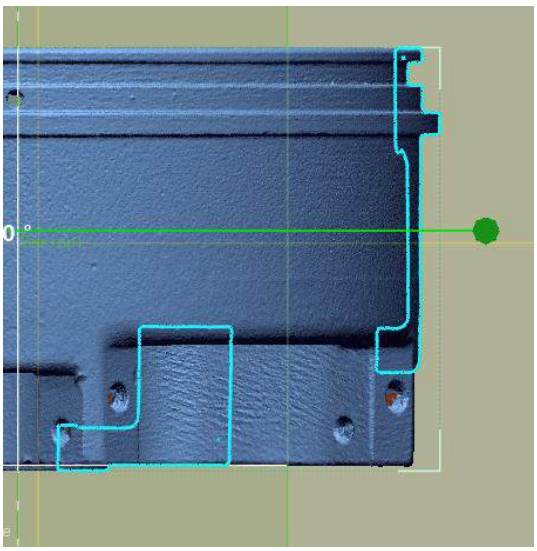


Рис. 2.12 – Ескіз за полігональною сіткою портрета дослідної деталі

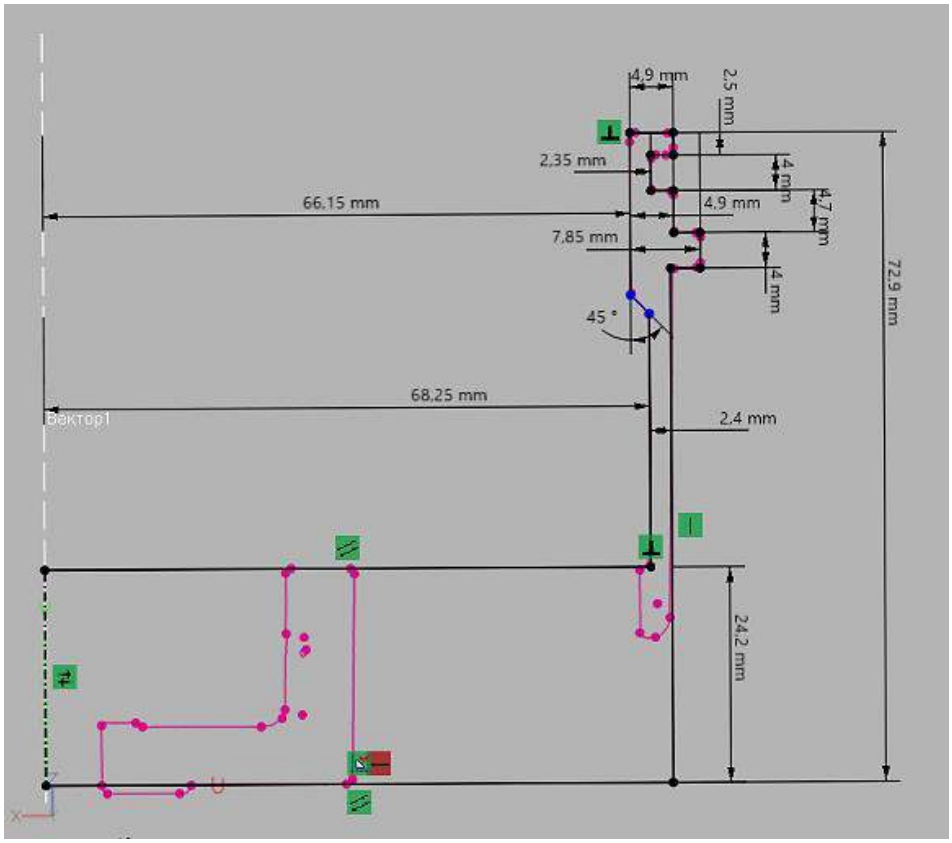


Рис. 2.13 – Побудований ескіз силуета, який було вилучено з перерізу

2. Просторове орієнтування: виконано базування та вирівнювання моделі відносно глобальної системи координат за допомогою інструменту Interactive Alignment.

3. Параметричне ескізування: на основі перерізів полігональної сітки (Mesh Sketch) отримано 2D-контури об’єкта, які були апроксимовані стандартними елементами геометрії (лініями, дугами, колами).

4. Твердотільне моделювання: шляхом операції обертання (Revolve) сформовано основне тіло моделі (рис. 2.13).

5. Конструктивна деталізація: аналогічно до етапу ескізування побудовано профілі отворів, які згодом були реалізовані в моделі методом екструзії (Extrude) на задану глибину або наскрізь (рис. 2.14).

6. Верифікація точності: протягом усього циклу моделювання здійснювався моніторинг відхилень за допомогою вбудованого модуля Accuracy Analyzer™. На рис. 2.15 продемонстровано результати ітераційного контролю відповідності побудованого АЕ вихідному «портрету» деталі.

7. Фіналізація геометрії: на завершальному етапі виконано побудову радіусів заокруглень та спряжень граней для досягнення повної геометричної ідентичності.

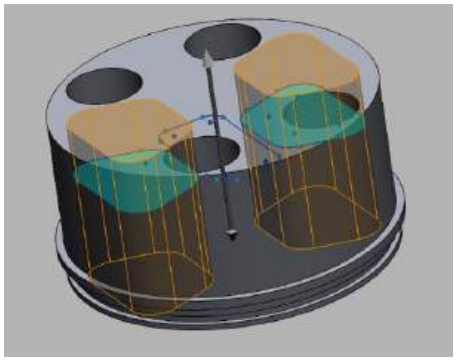


Рис. 2.14 – Побудова тривимірного твердого тіла

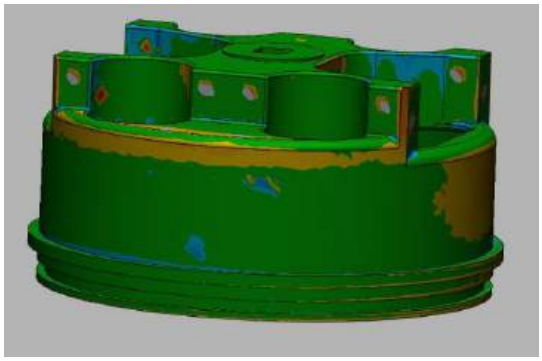
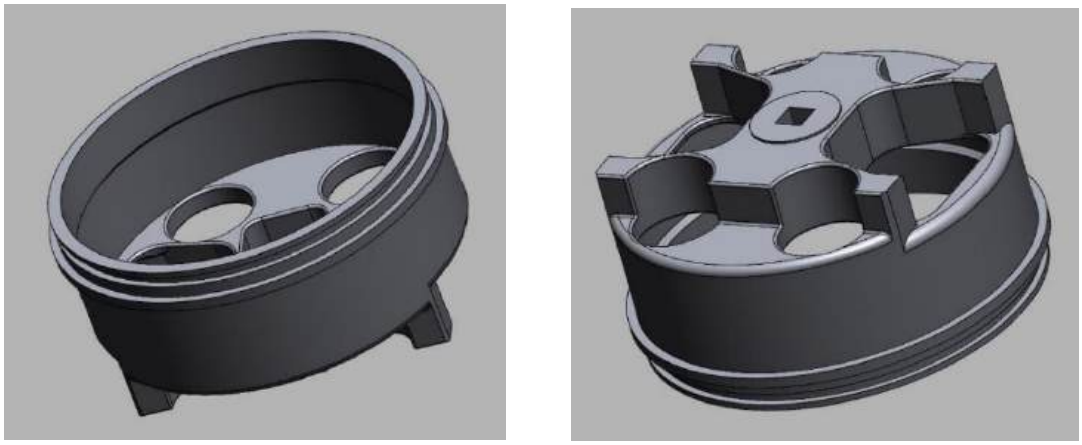


Рис. 2.15 – Контроль побудови АЕ за портретом деталі

На рис. 2.16 показано АЕ корпусу рульової машини АК, що збережена в одному з доступних форматів. Слід зазначити, що важливою перевагою Geomagic Design X є підтримка прямого експорту повної історії побудови (LiveTransfer) до провідних CAD-систем, таких як SOLIDWORKS, Creo (Pro/E), Autodesk Inventor, Siemens NX та AutoCAD. Це дозволяє отримати в цільовому середовищі статичну геометрію повністю параметризованої моделі із деревом побудови, яку можна коригувати за необхідності.

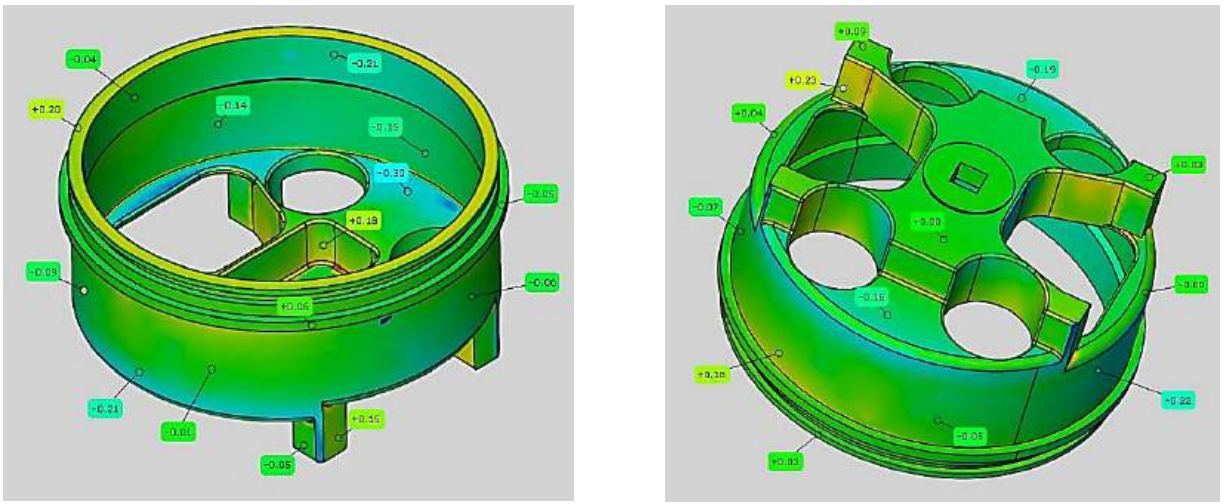


а б

а – з одного боку; б – з іншого

Рис. 2.16 – Готовий АЕ корпусу рульової машини АК

Результати порівняльного аналізу геометричної точності побудованого АЕ та еталонного портрета корпусу рульової машини АК представлено на рис. 2.17.



а б

а – з одного боку; б – з іншого

Рис. 2.17 – Контроль еталонного портрета за АЕ корпусу рульової машини АК

Доведено, що максимальні відхилення останнього від АЕ становлять від – 0,30 мм до + 0,23 мм. Найменші відхилення спостерігалися на вертикальних і горизонтальних площинах (від –0,04 мм до +0,08 мм), а найбільші – в місцях нахилів площин, кутів і маленьких радіусів.

2.3.4 Аналіз прототипування корпусу рульової машини АК за методами РІ на предмет забезпечення заданої геометричної точності

Згідно з результатами досліджень [20, 134], при застосуванні адитивних технологій похибка виготовлення деталей може сягати від –0,37 мм до +0,14 мм, що формально вписується у загальний допуск ±0,5 мм. Проте це підтверджує, що первинний, тобто еталонний портрет досліджуваної деталі («*.STL») не забезпечує стабільної геометричної точності ні для 3D-друку, ні для механічної обробки на верстатах з ЧПК.

З огляду на це, пряме використання результатів сканування без додаткової обробки є недоцільним. Тому виникає необхідність верифікації та прийняття рішення з: використання еталонного портрета для виготовлення деталі 3D-друком чи на верстаті з ЧПК або побудови АЕ на основі даних еталонного портрету і виготовлення прототипу деталі за обраною технологією. Для складних корпусних деталей АК, що мають елементи з радіусами до 0,5 мм та складні кутові спряження, технологія сталого РІ є недостатньою. У таких випадках рекомендується впровадження повного циклу РІ, тобто звичайного РІ, результатом якого є створення параметричного АЕ. В цьому випадку саме на основі АЕ, конвертованого у формат «*.STL» або переданого в CAM-систему, досягається гарантована точність виготовлення деталей як адитивними методами, так і фрезеруванням.

Тому для таких складнопрофільних деталей як корпус рульової машини АК, що мають непросту геометрію з радіусами округлення до 0,5 мм, кутів тощо, рекомендується використовувати повний цикл робіт на основі звичайного РІ. Маючи АЕ, стає необхідним збереження цих даних у файлі формату «*.STL», що можна використати в адитивному виробництві або виготовленні деталі фрезеруванням на верстатах з ЧПК.

2.3.5 Аналіз витраченого часу для сталого і звичайного РІ

Аналіз витраченого часу для сталого і звичайного РІ досліджуваної деталі показав таке. Загальний час при звичайному РІ корпусу рульової машини АК становив 13 годин, а на кожний етап (рис. 2.18) такий:

– 1 – сканування деталі та оброблення портрета деталі $П_Д$ – 2 години;

– 2 – опис моделі процесів і функцій деталі $МП_Д$ – 2 години;

– 3 – створення АЕ деталі $АЕ_Д$ – 8 годин;

– 4 – створення 3D-моделі для вибраної технології виготовлення деталі – 30 хвилин;

– 5 – створення файлу форматом «*.STL» для виготовлення деталі за адитивними технологіями або з використанням станків із ЧПК – 30 хвилин.

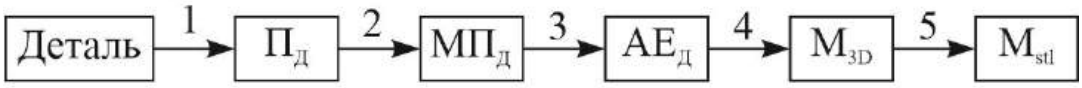


Рис. 2.18 – Схема етапів реалізації звичайного РІ

Загальний час при сталому РІ корпусу рульової машини АК становив 5 годин, а на кожний етап (рис. 2.19) такий:

– 1 – сканування деталі та оброблення портрета деталі $П_Д$ – 2 години;

– 2 – створення еталонного портрета деталі файлу форматом «*.STL» для виготовлення деталі за адитивними технологіями або з використанням станків із ЧПК – 3 години.



Рис. 2.19 – Схема етапів реалізації сталого РІ

Різниця в часі становила 8 годин на користь сталого РІ.

Проведені дослідження, спрямовані на порівняння сталого та звичайного РІ, дозволили виявити їхні ключові переваги та недоліки. Зокрема, до переваг звичайного РІ належать:

– відсутність потреби у додатковому доопрацюванні отриманого портрета до еталонного стану (коригування кутів, радіусів тощо), оскільки такі недоліки автоматично усуваються під час побудови АЕ;

– можливість формування 3D-моделей на основі АЕ у форматах, сумісних із більшістю систем числового програмного керування;

– можливість проєктування 3D-моделей технологічної оснастки для виготовлення деталей незалежно від їхніх габаритів і складності;

– можливість розроблення повного комплекту конструкторської, технологічної та експлуатаційної документації на основі даних АЕ.

До недоліків звичайного РІ належить необхідність повторного перетворення сформованого АЕ у формат портрета «*.STL» при виготовленні деталі за допомогою адитивних технологій або на верстатах з ЧПК, що зумовлено вимогами програмного забезпечення відповідного обладнання.

Водночас до переваг методу сталого РІ можна віднести:

– відсутність потреби у створенні АЕ або окремих 3D-моделей, що забезпечує суттєве скорочення загальної тривалості виконання робіт;

– підвищену швидкість виготовлення та зниження вартості виробництва деталей простої форми при використанні адитивних технологій або верстатів з ЧПК.

До недоліків методу сталого РІ належать:

– відсутність гарантії забезпечення високої точності виготовлення (на рівні ±0,5 мм) для деталей складної геометрії;

– необхідність побудови 3D-моделі на основі портрета у форматі «*.STL» при виготовленні деталі на верстатах з ЧПК, що обумовлено вимогами їхнього програмного забезпечення;

– обмеженість у формуванні конструкторської, технологічної та експлуатаційної документації на основі даних портрета.

2.3.6 Перспективи сталого РІ порівняно зі звичайним

Існує значна кількість підходів і алгоритмів зворотного проєктування на основі РІ, які розроблені з урахуванням специфічних вимог досліджуваних задач [134–136]. До таких вимог належать забезпечення високої точності відтворення поверхонь, реконструкція складних конструкцій, робота з великогабаритними об’єктами або, навпаки, спрощення геометрії шляхом її апроксимації базовими примітивами [137]. Водночас зазначені задачі практично не розглядалися з позицій

оптимізації процесів за критерієм мінімізації часу виконання при забезпеченні достатнього рівня точності результатів.

У підпунктах 2.3.3–2.3.5 виконано дослідження та порівняльний аналіз реалізації двох методів реверс-інжинірингу – сталого та звичайного – на прикладі корпусу рульової машини АК. Об’єктом дослідження виступала геометрична точність сформованого портрета відносно АЕ корпусу, а також часові витрати для кожного з підходів. Отримані результати свідчать, що сучасні програмні продукти не забезпечують можливості коректного доопрацювання портрета в зонах складної геометрії та перетину поверхонь (зокрема радіусів, гострих кутів тощо) без втрати точності. За умов підвищених вимог до точності виникає необхідність у додаткових етапах побудови АЕ, що, у свою чергу, призводить до збільшення тривалості виробництва [138].

Водночас метод сталого РІ, порівняно зі звичайним, демонструє суттєві переваги у задачах оперативного відновлення та виготовлення виробів [139], що набуває особливої актуальності для України в умовах воєнного стану.

Проте проблема відновлювального ремонту деталей і складових озброєння, особливо іноземного виробництва, зокрема трофейних зразків, полягає у відсутності конструкторсько-технологічної документації на їхні елементи. За таких умов виникає необхідність побудови АЕ, оскільки застосування сталого РІ не забезпечує належної геометричної точності досліджуваної деталі. Разом із тим отриманий АЕ як цифрове першоджерело може бути ефективно інтегрований у наявні виробничі системи та використаний у межах єдиного інформаційного простору CAD/CAE/CAM [140, 141]. Це створює передумови для його широкого впровадження у виробничу практику та визначає перспективність подальших досліджень у цьому напрямі.

Основним обмеженням застосування як сталого, так і звичайного РІ є підвищені вимоги до точності досліджуваної деталі. Це зумовлює необхідність додаткового сканування із використанням більш високоточних засобів або навіть застосу-

вання КВМ. При цьому похибка сканувального обладнання повинна бути на порядок меншою за встановлений допуск на деталь, а виконання таких робіт потребує залучення 2–3 висококваліфікованих фахівців.

Отже, актуальним і перспективним залишається розвиток сталого РІ, що задовольняє замовника за умов використання мінімуму часу, відповідності геометричної точності та реалізовує швидке виробництво дослідної деталі. Слід зазначити, що формат моделі, яка можлива при сталому РІ, є хмарою точок файлу «*.STL». У свою чергу, це означає використання при виготовленні зразка АК за адитивними методами та/або на верстатах із ЧПК. Останнє забезпечує геометричну точність ±0,1 мм. Тобто, якщо портрет деталі максимально доопрацьовано до еталонного, то його можна використовувати для виготовлення деталі АК не тільки за адитивними, а й за екстрактивними технологіями. Для останньої збільшення точності виготовлення деталі можливо при збільшенні точності віртуального базування моделі.

2.4 Метод збільшення точності віртуального базування еталонного портрета дослідної деталі АК при її виготовленні на верстаті з ЧПК

2.4.1 Аналіз існуючих методів віртуального базування

Методи віртуального базування постійно вдосконалюються у зв’язку з їх основною особливістю – збільшення точності виготовленої деталі на верстаті з ЧПК. У більш ранніх роботах розглядалися задачі про віртуальне базування тіл призматичної форми шляхом мінімізації відстані між заготовкою та деталлю. Здебільшого вони стосувалися симетричного базування деталей з попередньо обробленими елементами і елементами, що підлягають різанню. Наприклад, Гоу та співавтори [142] знайшли ефективні рішення локалізації для симетричних частин (таких як циліндри, конуси і сфери), зменшивши проблемний простір від евклідова до одновимірного. Сюн і Лі [143] визначили підхід до розв’язання задачі у випадку, якщо локалізація деталі не вдалася і заготовка не змогла покрити оброблювані елементи. Рішенням такої задачі стало збільшення додаткового матеріалу на заготовку. Гесснер і Станік [144] використали оптичний пристрій для сканування литих заготовок і

застосували звичайний метод локалізації заготовок. Чателан і Фортін [145] надавали ваги вимірюваній точці на основі складності додавання матеріалу до його елемента і швидко визначали місця дефіциту матеріалу на заготовці, розрахувавши орієнтовану евклідову відстань від виміряних точок до деталі.

Пізніше з'явилися роботи, які стосувалися проблеми віртуального базування деталей складної форми. Сюн [146] розв'язав задачу віртуального базування поверхні у вільній формі, використовуючи метод множників Лагранжа і евклідову відстань. Шен і співавтори в [147] запропонували ієрархічний алгоритм локалізації великих заготовок з вільною формою поверхонь. За запропонованим алгоритмом при грубій підгонці відстань між центром ваги деталі та вимірюваними точками на кутах поверхні зводиться до мінімуму, а при точній підгонці орієнтовані відстані від виміряних точок до проєктної поверхні призначалися з різними масами, а потім додавалися. Ян і співавтори [148] розробили алгоритм грубої і точної локалізації для оброблення поверхні і контролю. Мехрад [149] грубо локалізувала поверхню проєкту, мінімізувавши відстань між вимірюваними та проєктними поверхнями, що зменшило невизначеності точної локалізації.

Деякі дослідження стосувалися того, як розрахувати відстань між вимірюваними точками і проєктною поверхнею. В [150] Чжу і співавтори визначили функцію відстані від точки до поверхні і досліджували властивості комплексної помилки поверхні. Колектив авторів роботи [151] створили нову функцію відстані для поліпшення точності локалізації сильно вигнутих поверхонь. Сюй і співавтори [152] намагалися використовувати метод поділу з використанням багатовимірних поліномів Бернштейна для обчислення точкової проєкції на поверхні вільної форми. Хе і співавтори [153] побудували ефективну і надійну функцію відстані, а Флорі і Хофер [154] розширили функцію відстані до підгонки поверхні та реєстрації хмари точок. У роботі [155] подано метод стартового розташування CAD-моделі досліджуваної деталі при віртуальному базуванні. Дослідники Планковський С. І., Цегельники Є. В., Комбаров В. В. та інші автори опрацювали математичну модель та метод розв'язання задачі віртуального базування [156], а розвиток теорії на тонкостінних деталях літальних апаратах показано в [157].

Реалізація підвищення точності і надійності локалізації деталі вимірювання заготовок обговорювалися багатьма дослідниками. В цілому слід відзначити, що задача віртуального базування далека від остаточного розв'язання, а відомі методи побудовано на емпіричних припущеннях.

Заслуговує уваги підхід, побудований на застосуванні двостадійного розв'язання задачі з використанням попередньої (грубої) та остаточної (точної локалізації.

Зазначимо, що поза увагою дослідників залишаються задачі віртуального базування за наявності заборонених зон, наприклад, коли в заготовці методами неруйнівного контролю виявлено дефекти. Крім того, поза увагою у більшості досліджень залишається проблема опрацювання геометричної інформації щодо моделей у форматах, які застосовуються сучасними CAD-системами.

Таким чином, задача побудови ефективних алгоритмів віртуального базування деталей довільної форми залишається відкритою та актуальною.

2.4.2 Постановка математичної моделі задачі

Використовуючи підходи робіт [158, 159] при формулюванні задачі віртуального базування будемо розглядати деталь як тривимірний геометричний об'єкт $D \in R^3$ довільної геометричної форми, а заготовку як область розміщення $Z \in R^3$. Будемо вважати, що для об'єкта D дає змогуться трансляція на вектор $u(x, y, z) \in R^3$ та обертання на кути $\theta = (\theta_x, \theta_y, \theta_y)$. Вектор руху, який визначає розташування об'єкта D в області $Z \in R^3$, позначимо як $\vartheta = (u, \theta)$. Відстань між деталлю та межею області розміщення позначимо як $d_{D,Z}=min\|O_Z - O_D\|$, де O_Z , O_D – точки, для яких виконуються умови $O_Z \in Z$, $O_D \in D$.

Сформулюємо задачу віртуального базування у такому вигляді: знайти такий вектор $\vartheta=(u, \theta)$, для якого $D \in Z$ і при цьому виконуються умови оптимальності розміщення. Такими умовами можуть бути:

- максимізація математичного очікування відстані між поверхнями деталі та заготовки $M(d_O)\to max$, де d_O – відстань між точками O_Z і O_D поверхней деталі та заготовки;
- максимізація мінімальної відстані між поверхнями деталі та заготовки $min\|OZ-OD\|\to max$;
- мінімізація максимальної відстані між поверхнями деталі та заготовки $max\|OZ-OD\|\to min$;
- комбінація вказаних умов.

Попередньо розглянемо задачу оптимізації розташування в області матеріальної точки, а як критерій оптимальності її розміщення використовуємо мінімізацію математичного очікування квадрата відстані між точкою і межею області розміщення $M(\|O_Z-O\|^2)\to min$. Для спрощення викладок будемо розглядати задачу в двовимірній постановці. Для цього випадку розглянутий критерій може бути записаний у вигляді

$$M\left(\|O_Z-O\|^2\right)=\frac{1}{L_Z}\int G_Z\left(\left(x_Z-x_O\right)^2+\left(y_Z-y_O\right)^2\right)dG_Z\to\min, \tag{2.1}$$

де G_Z – межа області розміщення, а L_Z – довжина кривої G_Z.

При одиничній щільності кривої G_Z вірні вирази

$$\int_{G_Z} x^2dG_Z=J_y^Z,\ \int_{G_Z} y^2dG_Z=J_x^Z;$$

$$\int_{G_Z} xdG_Z=L_Zx_{c.w.}^Z,\ \int_{G_Z} ydG_Z=L_Zy_{c.w.}^Z \tag{2.2}$$

де J_x^Z, J_y^Z – осьові моменти інерції кривої G_Z відповідно відповідної осі, а $x_{c.w.}^Z$, $y_{c.w.}^Z$ – координати її центру ваги.

Виберемо осі OX і OY таким чином, щоб вони проходили через центр ваги кривої G_Z. Тоді з урахуванням залежностей (2.2) умова (2.1) набуває вигляду:

$$M\left(\|O_Z-O\|^2\right)=\left(J_x^Z+J_y^Z\right)/L_Z+\left(x_o^2+y_o^2\right)\to\min. \tag{2.3}$$

З урахуванням того, що сума осьових моментів інерції кривої відносно осей, що проходять через її центр ваги, є постійною величиною, з (2.3) випливає, що $M\left(\|O_Z-O\|^2\right)=\left(J_x^Z+J_y^Z\right)/L_Z\to\min$ при x_o=y_o=0, оптимальним за умовою (2.1) розташуванням

матеріальної точки буде центр ваги кривої G_Z, що є межею області розміщення. Для випадку розташування в області *3* двовимірного об'єкта *D* з межею, заданою кривою G_D, умова (2.1) записується у вигляді

$$M\left(\left\|O_Z - O_D\right\|^2\right) = \frac{1}{L_Z L_D}\int_{G_Z}\left[\int_{G_D}\left(\left(x_Z - x_D\right)^2 + \left(y_Z - y_D\right)^2\right)dG_D\right]dG_Z \to \min \qquad (2.4)$$

і виконується при збігу центрів ваги G_Z і G_D.

Аналогічного висновку при оптимізації розміщення призводить застосування критерію максимізації різниці квадратів центральних радіусів інерції границь заготовки *3* і розміщуваної деталі *D*:

$$r_Z^2 - r_D^2 = \frac{1}{2L_Z}\int_{G_Z}\left(x_Z^2 + y_Z^2\right)dG_Z - \frac{1}{2L_D}\int_{G_Z}\left(x_D^2 + y_D^2\right)dG_D \to \max \qquad (2.5)$$

Недоліком критеріїв (2.4) та (2.5) є те, що вони не дають змоги визначити орієнтацію об’єкта Д відносно осей OX і OY, оскільки їх екстремальні значення не залежать від кута повороту ϑ. Для вирішення цього завдання замість різниці квадратів центральних радіусів інерції як критерії оптимізації можна використати різницю квадратів радіусів інерції меж заготовки і деталі відносно головних центральних осей інерції кривої G_Z. Для визначеності будемо вважати, що максимальний головний центральний момент інерції кривої, що збігається з межою заготовки, J^Z_{max} відповідає моменту інерції відносно осі OY, а мінімальний J^Z_{min} – відносно осі OX. При цьому слід виконувати такі умови:

$$r^2_{max\,Z} - r^2_{yD} = \frac{J^Z_{max}}{L_Z} - \frac{\left(J^Z_{max}\cos^2\theta + J^D_{min}\sin^2\theta\right)}{L_D}, \qquad (2.6)$$

$$r^2_{min\,Z} - r^2_{xD} = \frac{J^Z_{min}}{L_Z} - \frac{\left(J^Z_{min}\cos^2\theta + J^D_{max}\sin^2\theta\right)}{L_D}, \qquad (2.7)$$

де J^D_{min}, J^D_{max} – головні центральні моменти інерції G_D.

Обидва критерії виконуються при $\theta = 0$, що призводить до необхідності збігу головних центральних осей кривих G_Z та G_D. У тривимірному випадку ці умови мають формулюватися для тонких оболонок Ω_Z та Ω_D, натягнутих на зовнішню поверхню заготовки і розміщуваної деталі.

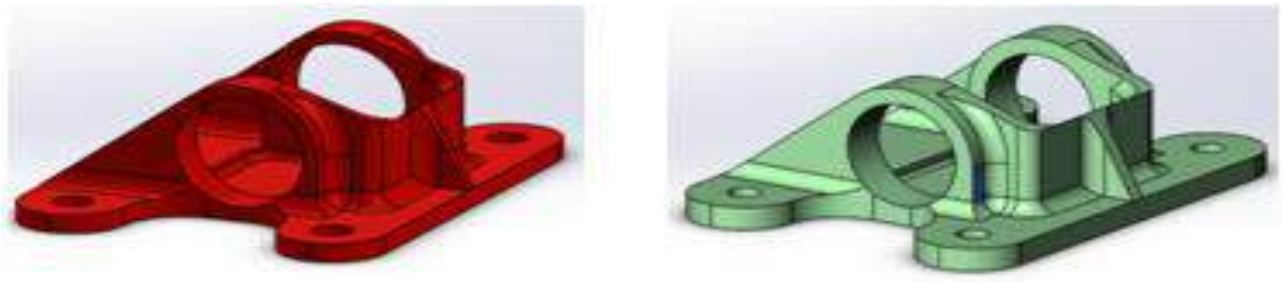
Зазначимо, що найбільшої ефективності використання запропонованого способу віртуального базування слід очікувати у випадках, коли поверхні заготовки та

розміщуваної деталі близькі до еквідестантних. При суттєвій різниці їхніх форм застосування цього критерію не може гарантувати не тільки рівномірного припуску на оброблення, але й виконання основної умови – розташування деталі всередині заготовки. Але, обмежуючись випадками близьких за розмірами заготовок та деталей, можна очікувати, що запропонований критерій дасть змогу принаймні визначити якісне перше наближення розв'язання задачі віртуального базування.

2.4.3 Числове розв'язання тестової задачі віртуального базування та обговорення результатів

Як тестова задача розглядалося віртуальне базування кронштейна в заготовці, відносно близькій до еквідестантної, яка умовно відповідає формі заготовки, яку одержано за адитивною технологією як однією з ефективніших (рис. 2.19).

Файли геометрії у форматі Parasolid імпортувалися до модуля геометрії DesignModeler пакета Ansys, де транслювалися та оберталися відносно глобальної системи координат на довільно вибрані відстані та кути. Таким чином, імітувалося розташування заготовки в системі координат верстата.

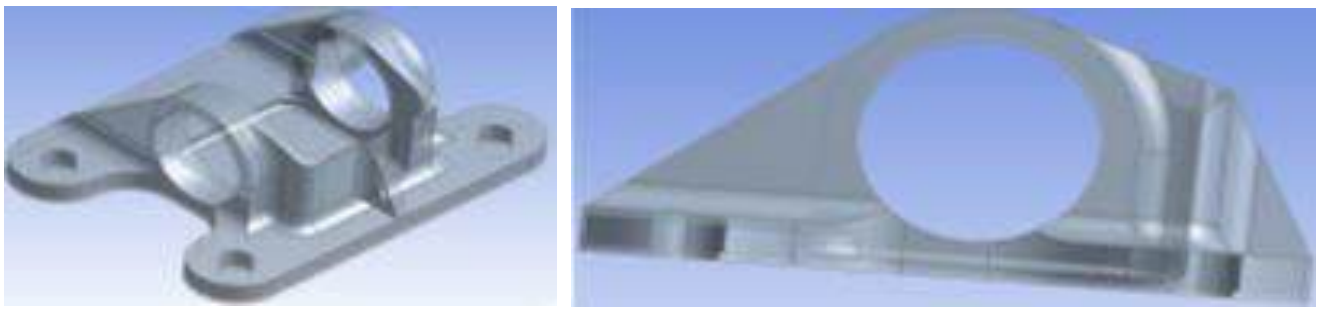


а б

а – деталь; б – заготовка

Рис. 2.19 – Моделі тестової задачі кронштейна [159]

Після цього за формулами, наведеними вище, виконано розрахунок центрів ваги, положення головних осей моментів інерції. За координатами центрів ваги та напрямами головних центральних осей інерції розташовували модель деталі в модель заготовки (рис. 2.20).



а б

а – розташування деталі в заготовці; б – загальний вигляд по осях XY

Рис. 2.20 – Віртуальне базування [159]

У результаті виконання позиціонування деталі за описаним алгоритмом вона виявилась повністю розташованою всередині заготовки, але припуск на оброблення виявився дещо нерівномірним. Такий результат можна пояснити похибками числового розрахунку. Але в цілому задачу, яка ставилася на цьому етапі досліджень, можна вважати виконаною, оскільки в результаті одержано принаймні задовільний розв’язок задачі попереднього базування, який може уточнюватися при застосуванні алгоритмів нелінійної оптимізації.

Отже, удосконалено метод віртуального базування заготовок, які за формою наближені до кінцевої деталі, при їх обробленні на ЧПК шляхом запропонованого підходу на основі математичної моделі віртуального базування. Таке базування може бути проведене при суміщенні центрів мас та головних центральних осей інерції тонких оболонок, що збігаються з зовнішніми поверхнями заготовки та деталі. Результати розв’язання тестової задачі підтвердили, що запропонований підхід на основі математичної моделі віртуального базування дає змогу виконати умови розташування деталі всередині заготовки. Слід враховувати, що припуск на обробку при цьому є дещо нерівномірним. Результат може бути покращено завдяки підвищення точності числових розрахунків, а також застосуванню більш точних алгоритмів нелінійної оптимізації на етапі покращення результату задачі попереднього базування. У свою чергу отримані результати за алгоритмом віртуального базування збільшать точність виготовлення деталі на верстаті з ЧПК, що отримана за сталим PI при прототипуванні.

2.5 Метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту за умови обмеженого часу

2.5.1 Виробничий досвід технологій виготовлення деталей АК, раціональних за якістю та часом

Сувора конкуренція серед виробників машинобудівної галузі щодо швидкого виробництва або відновлення деталей із забезпеченням потрібної якості потребує використання надсучасних технологій РІ, адитивних та екстрактивних технологій на базі високошвидкісного оброблення (ВШО) (high speed cutting – HSC) або фрезерування на верстаті з ЧПК [20, 160], а також інформаційної автоматизованої підтримки виробництва [90]. У роботі [161] наведено позитивні результати від упровадження технологій РІ в уже існуюче налагоджене виробництво. Зазначається, що зменшення строків виробництва є можливим уже на етапах ТПВ. Слід зауважити, що найменші показники трудомісткості на прикладі виготовлення стабілізатора гелікоптера були при застосуванні РІ з метою створення АЕ. Позитивні результати від застосування РІ на базі різних методів і додатків подано у низці робіт [162, 163, 164], що підтверджує перспективність таких технологій.

Гідною конкуренцією традиційним технологіям (штампування та фрезерування на базі ЧПК) є адитивні технології. Так, у роботі [165] показано ефективність оснастки з PLA-пластику, що виготовлена 3D-друком методом наплавлення (FDM – Fused Deposition Modeling), порівняно з такою ж оснасткою з інструментальної сталі, що виготовлена фрезеруванням з плити. У [166] показано переваги селективного лазерного спікання (SLS) і тривимірного друку сполучної речовини (3DP) порівняно з литтям. Результати роботи [167] доводять переваги технології адитивного виготовлення лазерним спіканням технологічної оснастки, зокрема штампів складної форми, завдяки усуненню процесів корекції після виробництва та оброблення поверхні.

Окремо слід зазначити, що у наведених роботах [165, 166, 167] відсутні дослідження трудомісткості використання адитивних технологій.

Зауважимо, що основою для всіх зазначених технологій є АЕ деталі, що відображує фізичну суть об’єкта у системі CAD як першоджерело інформації [5]. Тому виробництво деталей починається саме зі створення АЕ. Наступним кроком має бути прийняття рішення щодо використання технології виготовлення деталь: традиційними методами штампування, лиття або фрезерування на базі ЧПК або 3D-друком і фінішними операціями за необхідності тощо. Аналізуючи роботи [20, 90, 160 – 167], можна зробити висновки про те, що автори уникають кількісного оцінювання при створенні АЕ та виробництва по ньому деталі.

На думку багатьох авторів, швидке виробництво деталі досягається шляхом використання сучасних засобів отримання, передачі та оброблення інформації. В літературних джерелах бракує повних даних щодо часу і трудомісткості робіт РІ, адитивних й екстрактивних технологій.

У той же час створення оптимальної технології швидкого ремонту, яка поєднує в собі технологічні системи РІ, виробництво за адитивними й екстрактивними технологіями, потребує проведення економічних розрахунків як на етапах проєктування, так і під час її подальшого вдосконалення.

2.5.2 Розрахунок трудомісткості робіт за методами РІ

Об’єктами цього дослідження є деталі військової техніки та літальних апаратів, які підлягають швидкому виробництву та/або відновлювальному ремонту, за умови відсутності для них конструкторської документації й які потребують створення першоджерела виробництва засобами РІ. При цьому першоджерелом інформації є саме приклад відновлювальної деталі. У більшості випадків це стосується одиничного та дрібносерійного виробництва. Вибір ефективної технології швидкого виробництва та/або відновлювального ремонту таких АК базується на мінімізації часу виробництва, зокрема трудомісткості робіт за умови забезпечення заданих показників якості об’єкта виробництва.

Аналіз трудомісткості виготовлення деталей за досліджуваними технологіями проведено поетапно. Так, перший етап технології відновлювального ремонту

засобами РІ, який є однаковим для усіх розглянутих у подальшому технологій, відповідно до умов поставленої задачі, що містить операції відновлення геометрії деталі (рис. 2.21). Зокрема, перший етап містить такі технологічні операції: 1 – відтворення з існуючої деталі (Деталь) засобами спеціальних КВМ або сканерів портрета деталі ($П_Д$), 2 – створення моделі процесів ($МП_Д$) і 3 – побудова аналітичного еталона деталі ($АЕ_Д$).

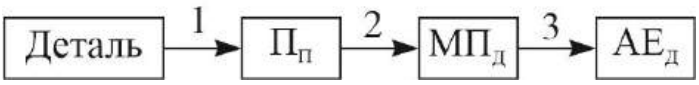


Рис. 2.21 – Схема технологічних операцій зі створення АЕ деталі РІ

Етапи операцій 1-2-3 є однаковими для будь-якої технології виготовлення деталі. Наступні технологічні операції 4-5-6-…-n для кожного вибраного методу виготовлення змінюються.

В дослідженні розглядаються тільки кількісні характеристики трудомісткості окремих операцій виготовлення деталей за різними технологіями. Зазначимо, що одні тільки показники трудомісткості не дають повної економічної картини процесу. В то й же час висновки цього дослідження дають змогу порівняти ефективності досліджуваних технологій за умови, що трудомісткість виготовлення є вирішальним фактором.

Наведені у табл. 2.3 постійні показники і аналіз часу виконання етапів технології РІ базуються на даних роботи [90] і відповідають схемі технологічних операцій зі створення АЕ деталі (див. рис. 2.21).

Табл. 2.3 – Постійні показники [90]

Технологічна операція/етап	1	2	3
Трудомісткість $\begin{bmatrix} t_{\max} \\ t_{\min} \end{bmatrix}$, люд.-год.	$\begin{bmatrix} +3 \\ +2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +8 \\ +6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +12 \\ +9 \end{bmatrix}$

Аналізуючи дані табл. 2.3 можна сказати, що загальна трудомісткость РІ до створення АЕ деталі становить $[+23,0;+17,0]$. Індивідуальні показники визначалися методом експертного оцінювання, опитуванням спеціалістів підприємств, довідкової літератури. Для складання величин вирішено використовувати метод максимума-мінімума (max-min) з прямою передачею величини значення, враховуючи, що параметр трудомісткості нас задовольняє як результат, тобто максимальний і мінімальний [90]. Показники трудомісткості визначалися як для звичайного механооброблення на базі ЧПК, так і для високошвидкісного оброблення (hight speed cutting – HSC). На рис. 2.22 подано схему технологічних операцій 4-5 виготовлення деталі фрезеруванням плити на верстаті з ЧПК.

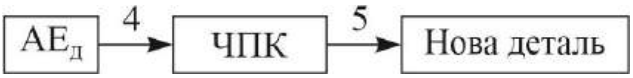


Рис. 2.22 – Схема технологічних операцій виготовлення деталі фрезеруванням плити

При використанні технології фрезерування заготовки в деталь на кожен відповідний етап потрібно враховувати такий час:

- етап 4 – створення моделі процесів оброблення $МП_Д$ заготовки – $[+15;+6]$ люд.-год.;
- етап 5 – виготовлення безпосередньо деталі з заготовки – $[+1,17;+0,02]$ люд.-год. для HSC і $[+11,73;+0,21]$ люд.-год. для лиття.

У таблиці 2.4 наведено час, необхідний для оброблення заготовки (див. етап 5, рис. 2.22), для маси деталі (1 кг) з алюмінієвих сплавів або високоміцної сталі.

Табл. 2.4 – Витрати часу виготовлення 1 кг деталі з використанням ВШО і ЧПК

Витрати часу	Підготовка заготовки	Оброблення ВШО алюмінієвого сплаву	Оброблення на ЧПК алюмінієвого сплаву	Оброблення ВШО сталі	Оброблення на ЧПК сталі
Час, хв	$\begin{bmatrix}+20\\+2\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}+70,37\\+3,70\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}+704\\+37\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}+23,75\\+1,25\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}+237,5\\+12,5\end{bmatrix}$

Продуктивність механообробки при ВШО було взято 100 см^3/хв·кВт і відповідно 10 см^3/хв·кВт при звичайній механообробці на базі ЧПК. Вважалося також, що при обробці деталі видаляється приблизно 5...10 % маси заготовки, виготовленої литтям, і 10...20 % маси заготовки, виготовленої штампуванням.

На рис. 2.23 наведено схему технологічних операцій 4–8 виготовлення деталі обробленням з ЧПК з відлитої у форму заготовки.

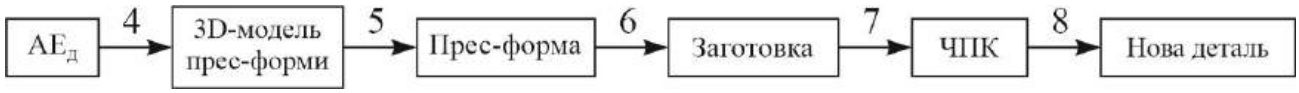


Рис. 2.23 – Схема технологічних операцій виготовлення деталі литтям

Під час використання технології лиття при виготовленні деталі на кожен відповідний етап потрібно враховувати такий час:

- етап 4 – створення АЕ технологічного засобу (тут прес-форма) і модель його оброблення – $[+11,73;+0,62]$ чол.-год;
- етап 5 – виготовлення форми, формування, сушка – $[+6;+3]$ чол.-год;
- етап 6 – лиття, охолодження, очищення заготовки – $[+4;+3]$ чол.-год;
- етапи 7-8, що ідентичні етапу 5 (рис. 2.25), – виготовлення деталі шляхом оброблення заготовки після лиття (зняття 5…10 % матеріалу) – $[+0,12;+0,01]$ чол.-год для ВШО і $[+1,17;+0,02]$ чол.-год для ЧПК.

На рис. 2.24 подано схему технологічних операцій 4–8 виготовлення деталі штампуванням з наступним обробленням за допомогою ЧПК.

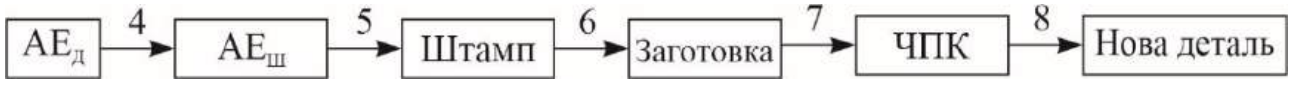


Рис. 2.24 – Схема технологічних операцій виготовлення деталі штампуванням

Під час використання технології штампування заготовки при виготовленні деталі на кожен відповідний етап потрібно враховувати такий час:

– етап 4 – створення АЕ технологічного засобу (тут штамп) і модель його оброблення – [+8;+4] чол.-год;

– етап 5 – виготовлення штампу на ЧПК або іншим методом –[+24;+16] чол.-год;

– етап 6 – штампування заготовки, нагрівання, обрубка, термообробка, галтування – [+1,0;+0,5] чол.-год на 1 деталь;

– етапи 7-8, що ідентичні етапу 5 (рис. 2.25), – виготовлення деталі шляхом оброблення заготовки після штампування (зняття 10…20 % матеріалу) – [+0,24;+0,02] люд.-год. для ВШР і [+2,34;+0,04] чол.-год для ЧПК.

На рис. 2.25 подано схему технологічних операцій 4–7 виготовлення деталі 3D-друком або лазерного спікання з наступними фінішними операціями [167] для забезпечення заданої якості поверхонь деталі.



Рис. 2.25 – Схема технологічних операцій виготовлення деталі 3D-друком/лазерним спіканням

При використанні технології лазерного спікання або 3D-друку заготовки/деталі на кожен відповідний етап потрібно враховувати такий час:

– етапи 4-5 – створення моделі процесів для 3D-друку/лазерного спікання – [+4;+3] чол.-год;

– етапи 6-7 – механообробка, термообробка, фінішні операції за необхіності – [+2;+1,5] люд.-год.

У табл. 2.5 подано розрахунки трудомісткості робіт виготовлення однієї деталі при ВШО і ЧПК, відповідно до схем адитивної й екстрактивної технологій (див. рис. 2.21– 2.25), починаючи з етапів 4-…-n та включаючи дані трудомісткості РІ (див. табл. 2.3).

Табл. 2.5 – Трудомісткість робіт виготовлення однієї деталі за методом «максимуму-мінімуму»

Обрана технологія виготовлення деталі	Трудомісткість робіт етапів 4-…-n $\begin{bmatrix} t_{max} \\ t_{min} \end{bmatrix}$, люд.-год		Загальна трудомісткість робіт етапів 1-…-n $\begin{bmatrix} t_{max} \\ t_{min} \end{bmatrix}$, люд.-год	
	ВШО	ЧПК	ВШО	ЧПК
Лиття	$\begin{bmatrix} +21,85 \\ +6,63 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +22,9 \\ +6,64 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +44,85 \\ +23,64 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +45,9 \\ +23,64 \end{bmatrix}$
Фрезерування з плити	$\begin{bmatrix} +16,17 \\ +6,02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +26,73 \\ +6,21 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +39,17 \\ +23,02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +49,73 \\ +23,21 \end{bmatrix}$
Штампування	$\begin{bmatrix} +33,24 \\ +20,52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +35,34 \\ +20,54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +56,24 \\ +37,52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +58,94 \\ +37,54 \end{bmatrix}$
3D-друк або лазерне спікання	$\begin{bmatrix} +6,0 \\ +4,5 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} +29,0 \\ +21,5 \end{bmatrix}$	

З використанням схем (див. рис. 2.21 – 2.25) отримано розрахунок трудомісткості для партії деталей 100 шт. Результати трудомісткості з урахуванням ТПВ виготовлення однієї і партії деталей (100 шт) подано в табл. 2.6.

Результати загальної трудомісткості з урахуванням усіх етапів виробництва, включаючи РІ, виготовлення однієї і партії деталей (100 шт) подано в табл. 2.7.

Табл. 2.6 – Трудомісткість робіт при виготовленні однієї і 100 шт деталей

Вибрана технологія виготовлення деталі	Трудомісткість $\begin{bmatrix} t_{max} \\ t_{min} \end{bmatrix}$, люд.-год				
	ТПВ	Виготовлення однієї деталі		Виготовлення 100 шт деталей	
		ВШО	ЧПК	ВШО	ЧПК
Лиття	$\begin{bmatrix} +34,73 \\ +17,62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +10,12 \\ +6,01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +11,17 \\ +6,02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1012 \\ +601 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1117 \\ +602 \end{bmatrix}$
Фрезерування з плити	$\begin{bmatrix} +38,0 \\ +21,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1,17 \\ +0,02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +11,73 \\ +0,21 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +117 \\ +2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1173 \\ +21 \end{bmatrix}$
Штампування	$\begin{bmatrix} +55,0 \\ +37,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1,24 \\ +0,52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +3,34 \\ +0,54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +124 \\ +52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +334 \\ +54 \end{bmatrix}$
3D-друк або лазерне спікання	$\begin{bmatrix} +23,0 \\ +17,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +6,0 \\ +4,5 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} +600 \\ +450 \end{bmatrix}$	

Табл. 2.7 – Загальна трудомісткість робіт при виготовленні однієї і партії деталей 100 шт

Обрана технологія виготовлення деталі	Загальна трудомісткість на одну деталь $\begin{bmatrix} t_{max} \\ t_{min} \end{bmatrix}$, люд.-год		Загальна трудомісткість на 100 шт. деталей, $\begin{bmatrix} t_{max} \\ t_{min} \end{bmatrix}$, люд.-год	
	ВШО	ЧПК	ВШО	ЧПК
Лиття	$\begin{bmatrix} +44,85 \\ +23,63 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +45,9 \\ +23,64 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1046,73 \\ +618,62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1151,73 \\ +619,62 \end{bmatrix}$
Фрезерування з плити	$\begin{bmatrix} +39,17 \\ +21,02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +49,73 \\ +21,21 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +155 \\ +23 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1211 \\ +42 \end{bmatrix}$
Штампування	$\begin{bmatrix} +56,24 \\ +37,52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +58,34 \\ +37,54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +179 \\ +89 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +389 \\ +91 \end{bmatrix}$
3D-друк або лазерне спікання	$\begin{bmatrix} +29,0 \\ +21,5 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} +623 \\ +467 \end{bmatrix}$	

За результатами розрахунків побудовано діаграму трудомісткості виготовлення партії деталей до 100 шт. (рис. 2.26).

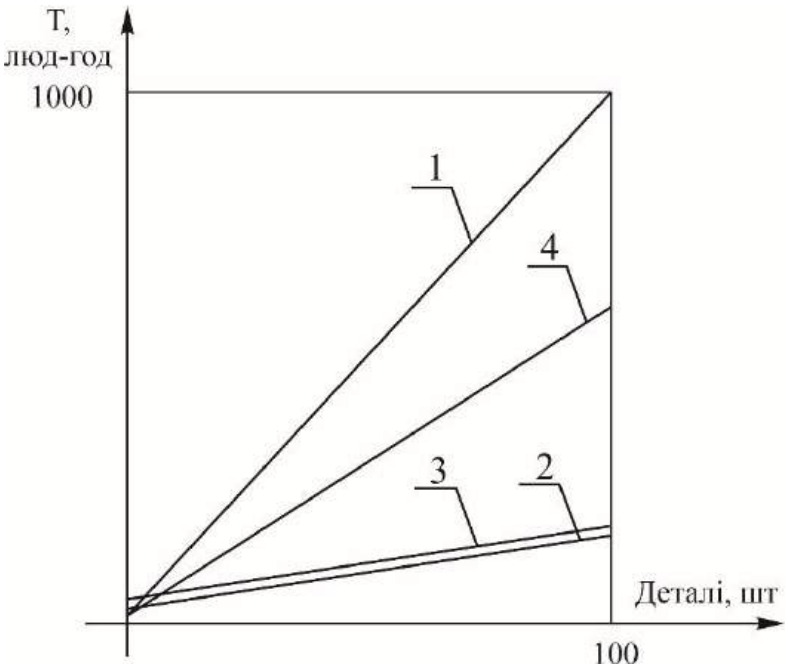


Рис. 2.26 – Діаграма трудомісткості виготовлення литтям (1), фрезеруванням ВШО/ЧПК з плити (2), штампуванням (3) і 3D-друком (4) партії деталей до 100 шт.

Аналіз діаграми показує, що за умови найменшої трудомісткості найбільш ефективною технологією є РІ та ВШО штампованої заготовки або фрезерування заготовки на ЧПК з плити. В усіх інших випадках (лиття і 3D-друк) трудомісткість незначно знижується при ВШО і його використання можна вважати не доцільним. Слід зазначити, що найгірші показники трудомісткості при дрібносерійному виробництві має лиття через велику кількість операцій, тривалих за часом. 3D-друк суттєво програє процесам розмірної обробки з видаленням припуску при дрібносерійному виробництві головним чином через низьку продуктивність нанесення матеріалу друком. Але якщо головним є швидке виготовлення однієї деталі, то майже всі розглянуті технології мають відносно однакову трудомісткість за умови, що на підприємстві вже є матриця, форма для лиття, ВШО та/або обладнання з ЧПК або 3D-принтер. Якщо мова йде про необхідність створення технологічних засобів, то більш доцільним стає використання 3D-друку для виготовлення до 10 деталей.

2.5.3 Конструктивно-технологічний аналіз дослідної деталі АК та створення її АЕ

Для експериментальних досліджень було вибрано зношену деталь, зображену на рис. 2.27. Враховуючи відсутність конструкторської документації на досліджувану деталь, для створення її геометрії використовувалася технологія РІ. Слід зазначити, що деталь мала потертий вигляд з нечіткими краями та поверхнями. Деталь відсканована за допомогою 3D-сканера ARTEC SPACE SPIDER і за технологічними операціями звичайного РІ створено її $АЕ_Д$ (рис. 2.28) із визначенням її розмірів (рис. 2.29).



Рис. 2.27 – Дослідна деталь

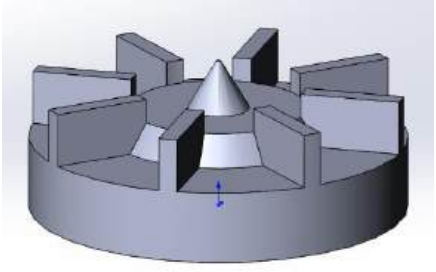
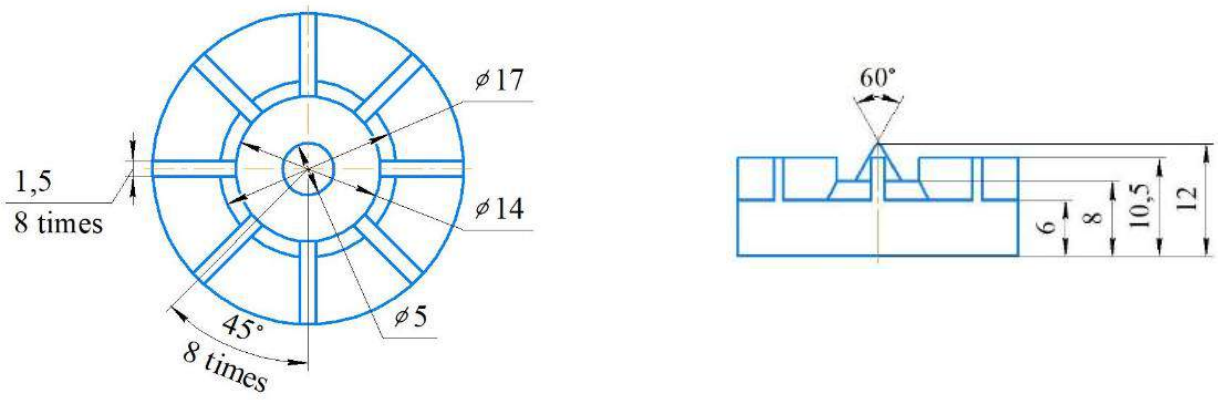


Рис. 2.28 – Аналітичний еталон деталі $АЕ_Д$



а б

а – вигляд зверху; б – вигляд збоку

Рис. 2.29 – Геометричні розміри дослідної деталі

Конструктивно-технологічний аналіз досліджуваної деталі (рис. 2.29) показав, що в деталі присутні тонкі ребра товщиною 1,5 мм у кількості 8 шт. та конус висотою 6 мм з діаметром основи 5 мм та кутом при основі 60°.

2.5.4 Експериментальні дослідження з вибору технологій швидкого виробництва за параметрами точності та часом: 3D-друк

Наступними діями стали підготовка до виготовлення деталі за адитивною технологією відповідно до технологічних операцій етапів 4–7 (рис. 2.25).

На рис. 2.30 наведено деталь, виготовлену за допомогою 3D-друку.

Для розуміння необхідності виконання фінішних операцій деталь було додатково відскановано та отримано її портрет з метою порівняння отриманої геометрії деталі за 3D-друком з її аналітичною геометрією, тобто з $АЕ_д$ (рис. 2.31).



Рис. 2.30 – Деталь, виготовлена 3D-друком

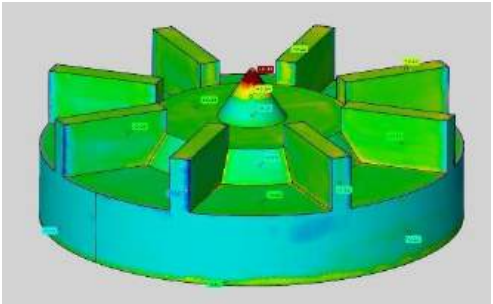


Рис. 2.31 – Контроль геометрії деталі, виготовленої 3D-друком

Аналіз контролю деталі, виготовленої за 3D-друком, з її аналітичною геометрією $АЕ_р$ показав відхилення в точності адитивної технології від –0,03 до +0,49 мм.

Максимальне відхилення спостерігається у верхньому конусі деталі (виділено червоним кольором на рис. 2.31), що не є критичним при допуску на відхилення деталі в ±0,5 мм.

У такому випадку в розрахунках трудомісткості робіт з виготовлення деталі не потрібно враховувати етапи фінішних операцій 6-7 (див. рис. 2.25), що зменшить її показники.

Якщо вимоги щодо точності виготовлення деталі більш жорсткі, тобто відхилення менші за ±0,5 мм, то слід враховувати етапи фінішних операцій в розрахунках трудомісткості, що збільшить її показники.

2.5.5 Експериментальні дослідження з вибору технологій швидкого виробництва за параметрами точності та часом: штампування

Штампування заготовки досліджуваної деталі (див. рис. 2.29) здійснювалося в штампі, показаного на рис. 2.32.



а б в г

а – заготовка; б – штамп; в – матриця; г – пуансон

Рис. 2.32 – Підготовка до штампування

Відштамповану заготовку (рис. 2.33) також було відсканована для отримання портрета для контролю її розмірів та порівняння з аналітичною геометрією деталі $АЕ_Д$ (рис. 2.34).

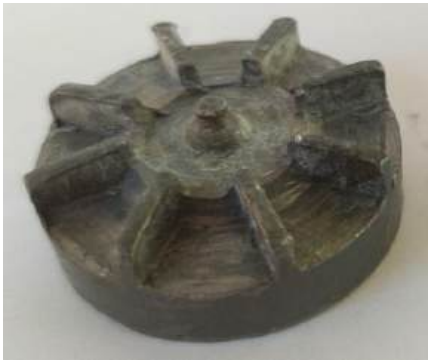


Рис. 2.33 – Деталь, виготовлена штампуванням

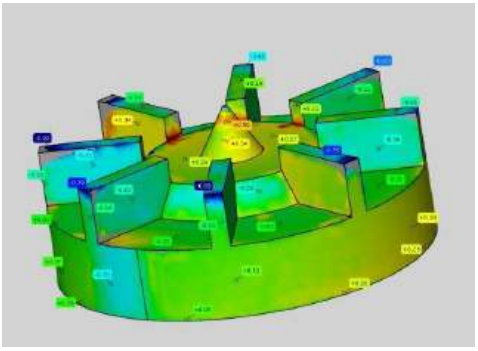


Рис. 2.34 – Контроль відштампованої деталі

Контроль геометрії відштампованої деталі з її АЕ показує відхилення в точності від –0,94 до +0,58 мм (див. рис. 2.34). Максимальне відхилення спостерігається у верхньому конусі деталі аналогічно деталі, що виготовлена 3D-друком. Такий результат може бути задовільним за умови допуску на деталь ±1,0 мм. У такому випадку в розрахунках трудомісткості робіт з виготовлення деталі штампуванням не потрібно враховувати етапи 7-8 оброблення заготовки в остаточну деталь за допомогою ВШО або ЧПК (див. рис. 2.24), що зменшить її показники. У той же час отримані відхилення є критичними при допуску на розміри деталі в ±0,5 мм і менше. Тому доцільно буде використання наступних етапів 7-8 оброблення відштампованої заготовки ВШО або ЧПК (див. рис. 2.26), що збільшить показники трудомісткості.

2.5.6 Порівняльний аналіз трудомісткості робіт виготовлення деталі 3D-друком і штампуванням

Розрахунками доведено, що загальна трудомісткість операцій зворотного проєктування створення АЕ деталі становить від 17 до 23 люд.-год (див. табл. 2.3). Для досліджуваної деталі (див. рис. 2.33) експериментально отримано загальну трудомісткість робіт – 18 люд.-год. Отримані експериментальні значення підтверджують розрахункові дані для зворотного проєктування та беруться для подальших етапів виготовлення деталі.

Підготовка деталі до друку виконувалася відповідно до технологічних операцій схеми наведеної на рис. 2.25. Час на підготовку до друку і безпосередньо друку досліджуваної деталі (етапи 4-5, рис. 2.25) становив $[+2;+1,5]$ люд.-год, що в порівнянні з попередньо встановленими $[+4;+3]$ люд.-год є в 2 рази меншим. Це можна пояснити тим, що деталь має нескладну форму, невеликі розміри та маленьку вагу до 100 г (див. рис. 2.27). За необхідності виконання фінішних операцій (див.етапи 6-7, рис. 2.25), трудомісткість робіт етапів 4-7 становить $[+4;+3]$ люд.-год, а загальна трудомісткість робіт із урахуванням етапів PI – $[+27;+17]$ люд.-год. При задовільно отриманій якості надрукованої деталі як такої, де не потрібні фінішні операції етапів 6-7 (див. рис. 2.25), загальна трудомісткість має найменші показники – $[+25;+18,5]$ люд.-год.

Результати експериментальних досліджень часу виготовлення і трудомісткості робіт досліджуваної деталі штампуванням за схемою (див. рис. 2.24) і з урахуванням PI (рис. 2.21) майже повністю збігаються (відхилення на етапах не перевищує ±1 %). На показники трудомісткості суттєво впливає необхідність виконання фінішних операцій з оброблення поверхонь, кромок тощо. Слід зауважити, що час штампування заготовки в штампі порівняно з друкуванням різко відрізняється, зокрема для друкування тестової деталі потрібно 1–1,5 години, а для штампування в штампі – тільки 30 секунд. Загальна трудомісткість робіт з урахуванням етапів реверс-інжинірингу для виготовлення досліджуваної деталі 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 етапи 7-8 (див. рис. 2.24), загальна трудомісткість несуттєво зменшується та становить $[+44;+37,5]$ люд.-год.

2.5.7 Метод вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту деталей АК

Вище доведено, що на час виробництва суттєво впливає задана якість і кількість деталей. Якщо мова йде про часто замінювану деталь в одній і навіть більшій

кількості складальних одиниць АК, то доцільним буде виготовляти її на постійній основі в штампі. Якщо це поодинокий випадок або партія містить максимум 10 шт., тобто в межах дрібносерійного виробництва, то доцільним все ж таки буде використання адитивних технологій і 3D-друку. Однак, якщо при тих же умовах головним чинником стає час під час швидкого виробництва, то найменший час виготовлення деталей забезпечує саме штампування в штампі порівняно з її 3D-друкуванням. Так, на одну досліджувану деталь (рис. 2.33) необхідно до 30 с штампування в штампі і 1–1,5 години на 3D-друкування.

Відповідно до зазначених умов швидкого виробництва та/або ремонту деталей вибір раціональної технології за параметром мінімізації часу виробництва може бути здійснено на основі аналізу таких вхідних даних як обсяг виробництва, точність розмірів деталі, строки виготовлення, наявність технологічного оснащення і обладнання, тощо. Метод такого вибору для дослідженого зразка деталі розроблено і подано на рис. 2.35.

Особливістю запропонованих технологій швидкого виробництва та/або ремонту деталей є те, що вони базуються на спільному етапі отримання першоджерела інформації засобами РІ й подальшому використанню екстрактивних, адитивних технологій, а також традиційних технологій штампування й лиття.

Відповідно до запропонованого методу вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту, наприклад деталей у кількості більше 10 шт. в умовах дрібносерійного виробництва (до 100 шт.) та точності розмірів більше ±0,5 мм, обґрунтоване використання технології штампування. При тій же кількості деталей, але геометричній точності менше ±0,5 мм доцільним буде використовувати ЧПК або ВШО оброблення зі штампованої заготовки або фрезерування з плити ЧПК обробленням або ВШО обробленням.

При кількості деталей менше 10 шт. та геометричній точності більше ніж ±0,5 мм, рекомендується використання 3D-принтера з подальшим ручним зачищенням. При тій же кількості деталей, але геометричній точності менше ніж ±0,5 мм, доцільно застосування ЧПК або ВШО при фрезеруванні з плити або заготовки-штамповки.

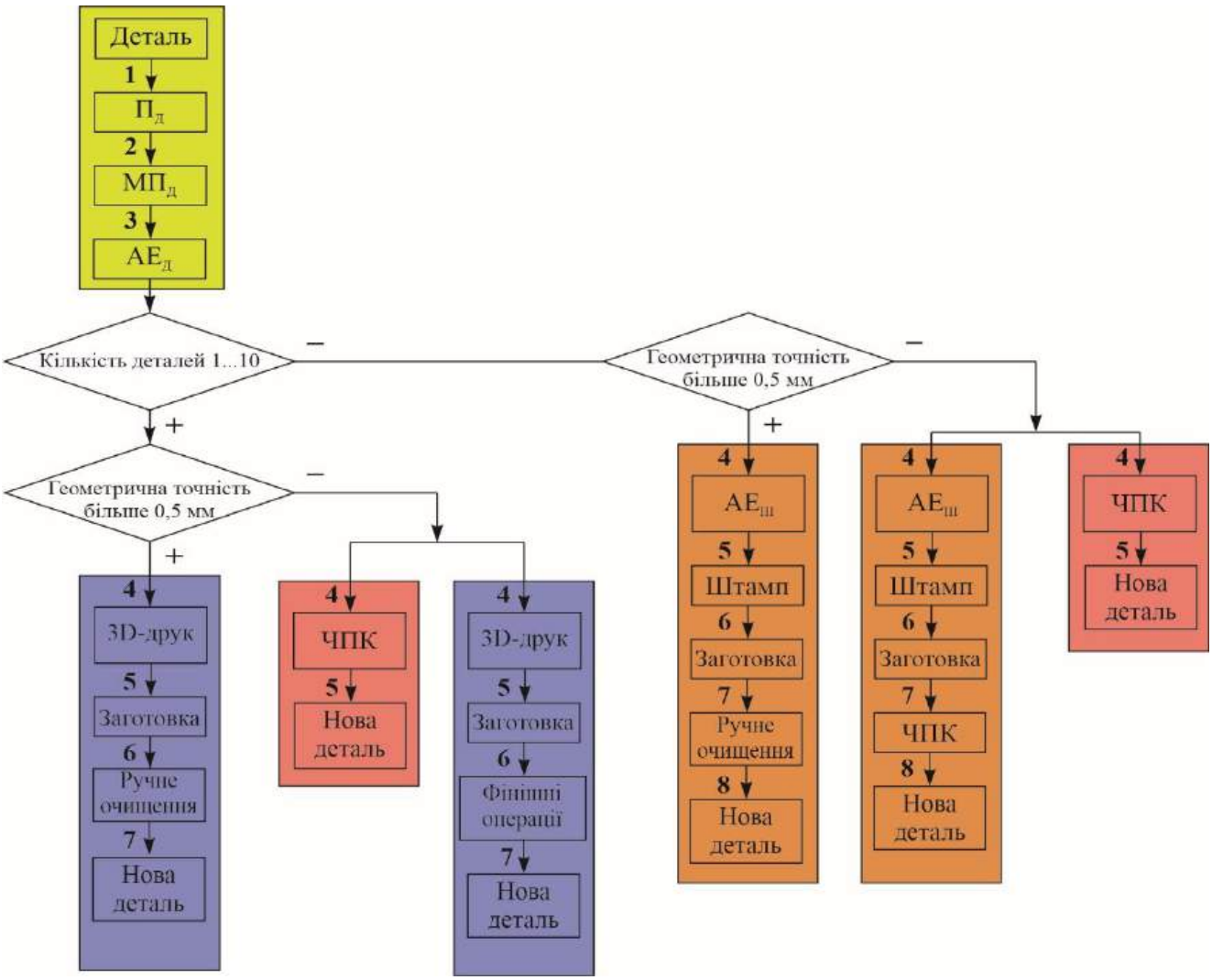


Рис. 2.35 – Метод вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту деталей [134]

Етапи 4-…-n у наведеному алгоритмі (див. рис. 2.35) можуть змінюватися залежно від вхідних умов (складності деталі, наявності внутрішніх порожнин, показників шорсткості тощо) та вихідних даних (парку існуючого устаткування, обладнання тощо). Етапи 1-3 лишаються однаковими для будь-якого вибраного методу виготовлення деталі до етапу створення її аналітичної геометрії АЕ.

Зазначимо, що трудомісткість і час, необхідний для створення АЕ, буде майже однаковим для різних за дизайном деталей за умови використання відповідних КВМ або сканера.

2.6 Висновки за розділом

1. Доведено, що технологію швидкого виготовлення та/або ремонту деталей може бути побудовано на базі операцій РІ, адитивних й екстрактивних технологій, що зменшує показники часу виробництва. При цьому суттєвий вплив мають обсяг випуску деталей та вимоги якості.

2. Розраховано трудомісткість технологічних операцій РІ, що має постійні показники за методом максимуму-мінімуму. Наведені дані можуть бути використані для оцінювання часу виробництва за досліджуваними технологіями. Запропоновано метод вибору раціональної технології швидкого виготовлення та/або ремонту деталей за умови мінімізації трудомісткості та часу виготовлення з урахуванням точності та обсягу виготовлення.

3. Визначено технологічні заходи при ТПВ та їх роль з метою скорочення термінів ТПВ. Визначено також взаємозв'язані такі складові: поняття «проєктна технологічність» та «технологічність» як складові процесу розроблення виробу, а також «виробнича технологічність» та «експлуатаційна технологічність» як складові процесу виробництва та експлуатації.

4. Показано, що вирішальну роль у скороченні термінів при ТПВ АК відіграють процеси формоутворення, які реалізовано шляхом вирішення прямих та зворотних завдань на базі АЕ як носія повної інформації виробу. Складність ТПВ АК полягає у створенні коректного АЕ для всіх учасників виробничого процесу, від якого залежить взаємозв'язок конструкторських і технологічних етапів ТПВ.

5. Запропоновано модель процесів формоутворення для виготовлення АК при ТПВ, які базуються на вирішенні прямих та зворотних завдань. Показано, що пряме завдання формоутворення виготовлення АК виконується відповідно до інформації щодо моделі процесу $МП_{АК}$ за аналітичним еталоном $АЕ_{АК}$, а процес створення $АЕ_{АК}$ з реального АК стає зворотним завданням формоутворення.

6. Обґрунтовано зниження показників загальної трудомісткості ТПВ АК завдяки використанню єдиного АЕ для будь-яких алгоритмів при вирішенні прямих та зворотних завдань. Показано, що АЕ стикується з ЧПК та CAD/CAM-системами.

Основні наукові результати, наведені в другому розділі, опубліковано в працях автора [2, 3, 4, 21, 25, 31].

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЧАСТКОВО ЗРУЙНОВАНИХ, ПОШКОДЖЕНИХ АБО ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ АК ОПУКЛО-ВГНУТИХ ФОРМ МЕТОДАМИ РІ В УМОВАХ ШВИДКОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1 Визначення опукло-вгнутої форми авіаційних деталей та особливості їх сканування

До опукло-вгнутих форм деталей АК підпадають всі групи деталей, що сформовано в класифікаторі табл. 1.1, окрім деталей типу «плоскі панелі». До таких груп відносять просторові за формою панелі одинарної та подвійної кривизни (рис. 3.1), а також лопаті гелікоптера, лопатки двигуна (рис. 3.2) тощо.

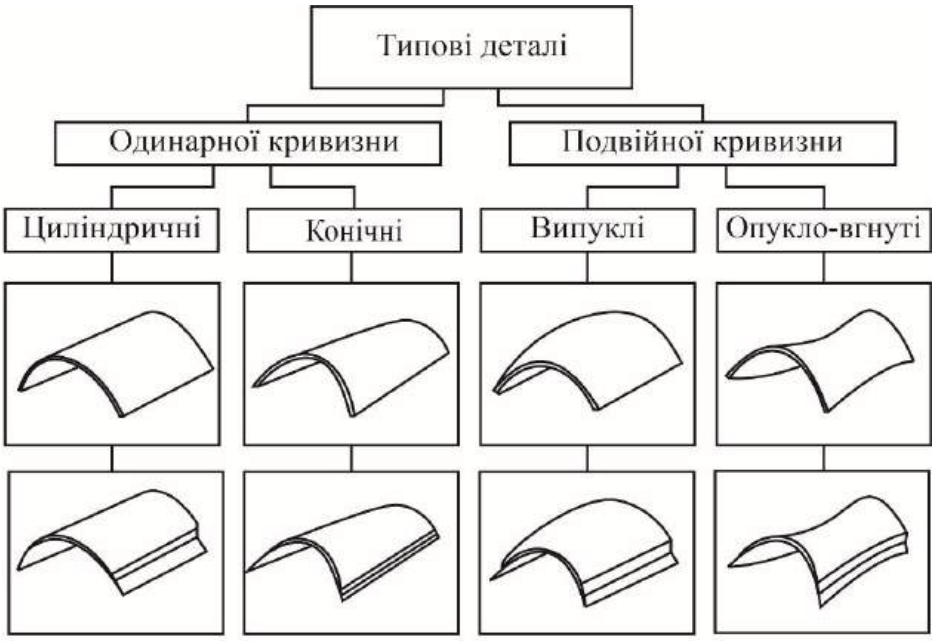


Рис. 3.1 – Типові деталі АК



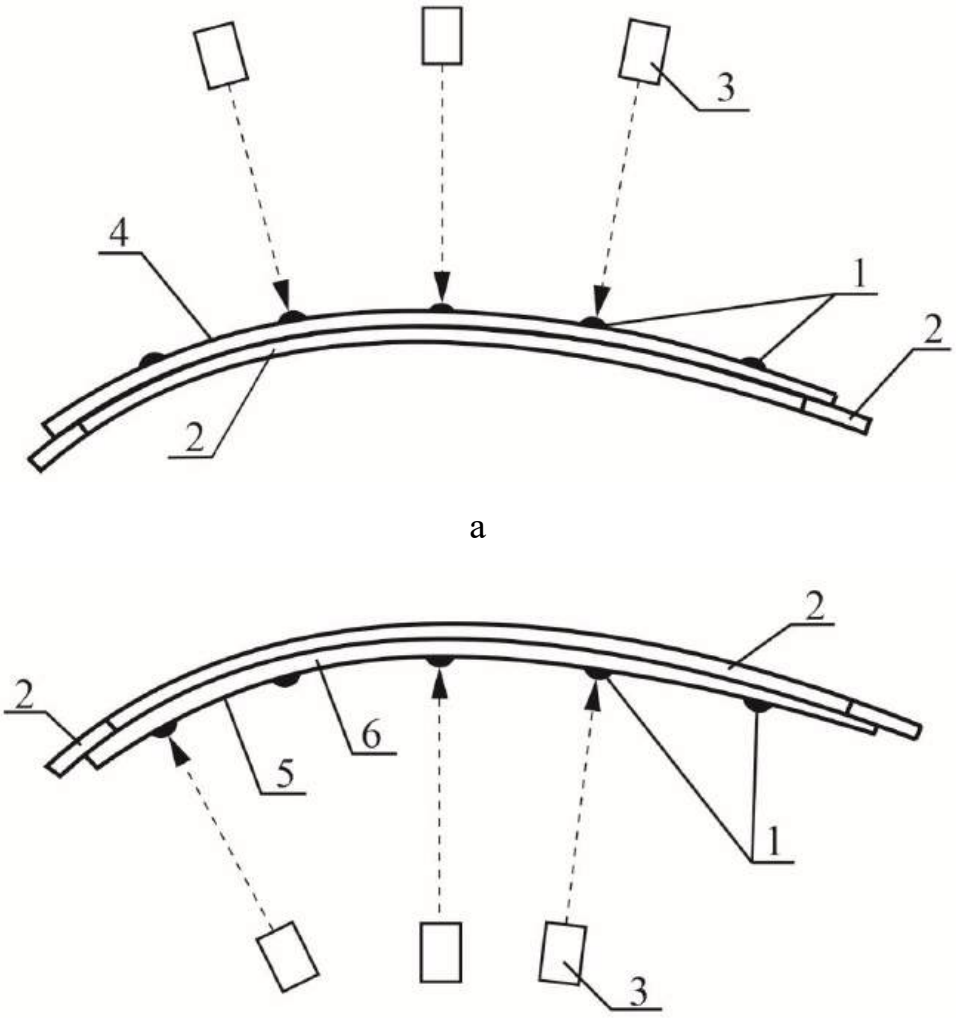
Рис. 3.2 – Приклади форм лопаток двигуна АК [167]

На рис. 3.3 наведено послідовність дій задля сканування та створення портрета дослідної опукло-вгнутої деталі АК у вигляді схеми.



Рис. 3.3 – Схема послідовності дій задля сканування та створення портрета дослідної опукло-вгнутої деталі АК

На рис. 3.4 подано схему виконання сканування опукло-вгнутої досліджуваної деталі АК.



а – перший ракурс; б – другий ракурс

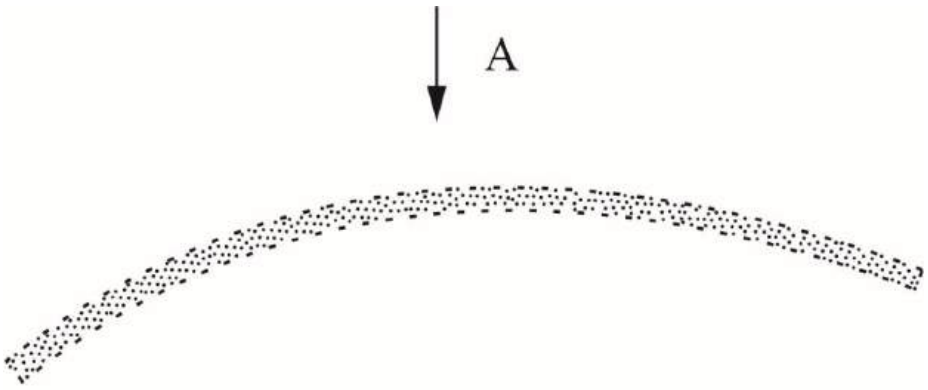
Рис. 3.4 – Схема сканування опукло-вгнутої досліджуваної деталі АК [168]

Відповідно до схем (рис. 3.3 і 3.4) сканування рекомендується реалізовувати за наступною послідовності. Досліджувану деталь 6 попередньо очистити від бруду і пилу, чорні та блискучі поверхні затонувати тальком або антивідбивний спреєм. Розмістити маркери/мітки 1, що виконані з пластиліну, або нанести мітки крейдою, фломастером, малярним скотчем тощо. Маркери/мітки 1 розташовувати з кроком щонайменше 50 мм, наприклад у шаховому порядку, особливо для таких, що більші 1 м за розмірами, встановлювати по всій, наприклад, опуклій поверхні 4, що сканується першою. Використання маркерів/міток 1 з кроком щонайменше 50 мм у шаховому порядку особливо для об’єктів, що за розмірами більше 1 м, дає змогу

сканувати саме за цими маркерами/мітками і не застосовувати трекінг за текстурою і геометрією об’єкта, це створює додаткові хмари точок та збільшує в рази точність сканування. З іншої сторони вгнутої поверхні 5 вздовж всієї кромки деталі, якщо вона за товщиною менше 5 мм, установити маркер/мітку 2 з малярного скотчу так, щоб скотч виходив за розміри кромки на 50 мм і щоб він був дотичний до цієї сторони та був у полі зору з іншої сторони об’єкта – опуклої поверхні 4, що сканується. Зазначимо, що використання кроку менше 50 мм призведе до збільшення трудомісткості процесу оброблення і отримання хмар точок. Для збільшення продуктивності процесу сканування деталь можна сканувати за траєкторією типу «змійка» з поверненням на раніше відскановані ділянки та з їх перекриттями одна на одну ручним або автоматизованим переміщенням сканера 3 перпендикулярно до опуклої поверхні 4 деталі з захопленням зони маркера/мітки 2 з малярного скотчу, тим самим поступово отримуючи в програмному забезпеченні хмару точок – перший ракурс. Після цього опуклу поверхню 4 слід очистити від маркерів/міток 1 та повторити такі ж підготовчі операції для сканування з іншої сторони вгнутої поверхні 5 з отриманням в програмному забезпеченні хмари точок – другий ракурс. Щоб отримати без розривів і помилок хмари точок, слід сканувати з дотриманням відстані від 350 до 1000 мм перпендикулярно до поверхні, що сканується, при переміщенні сканера 3.

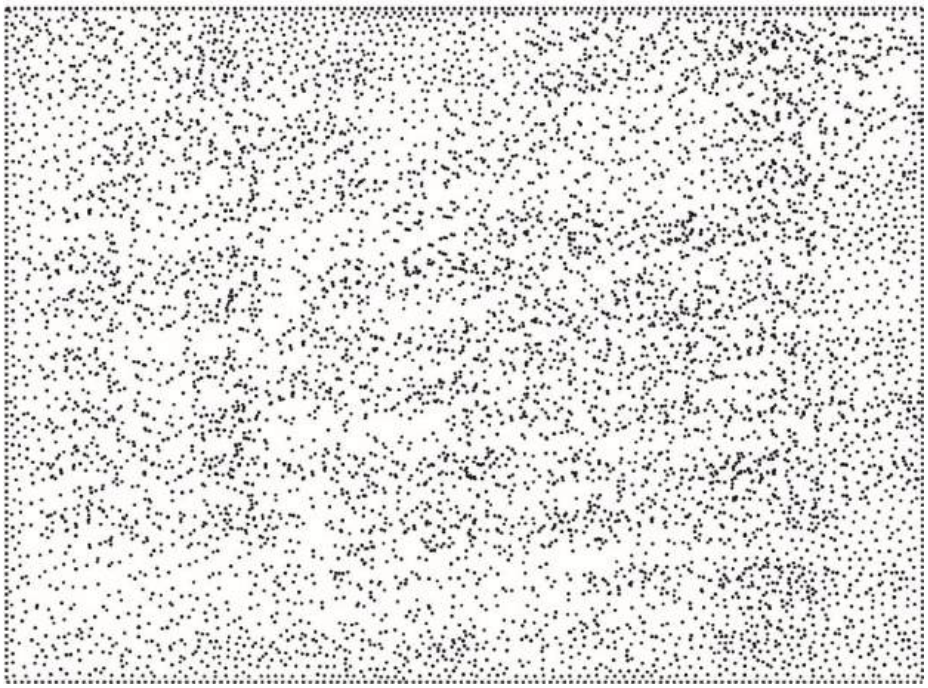
Далі провести об’єднання хмар точок першого та другого ракурсів сканування у програмному забезпеченні на комп’ютері, що відповідає характеристикам сканера, таким чином, щоб досягти поєднання хмар точок за умови мінімального шуму хмар точок маркерів і хмар точок протилежної сторони об’єкта. Зазначимо, що після встановлення мінімального шуму досягається точна відстань між хмарами точок, які є результатом першого та другого ракурсів сканування. Таким чином, буде досягнута точність об’єкта в цілому, незважаючи на складність форм обох сторін об’єкта. Далі фіксувати положення хмар точок, а частки хмар точок, що є результатом сканування маркерів, видалити.

На рис. 3.5 схематично показано відкориговану хмару точок – портрет деталі $П_Д$.



а

Вигляд А



б

а – вигляд з боку; б – вигляд зверху/знизу

Рис. 3.5 – Відкоригована хмара точок – портрет деталі ($П_Д$) (схематично) [168]

Далі хмари точок трансформують у комп’ютерну модель об’єкта, при цьому перехід форми від однієї до іншої сторони об’єкта (кромки) у комп’ютерній моделі виконують з використанням В-сплайнової апроксимації. Отриманий остаточний портрет деталі ($П_Д$) є базовою геометрією для створення АЕ досліджуваної деталі АК.

3.2 Дослідження зі встановлення параметрів допустимих відхилень геометрії деталі при прототипуванні за методами РІ

3.2.1 Постановка задачі

Дослідження, наведені в розділі 2, дозволили встановити, що ключовим результатом РІ є не лише створення АЕ досліджуваної деталі АК, але й забезпечення можливості її виготовлення із дотриманням заданого рівня якості. Це, у свою чергу, дало підстави виокремити в технології РІ два підходи до формування цифрової моделі: звичайний [123] та сталий [128].

Метод сталого РІ охоплює всі етапи оцифрування, включаючи фінальне оброблення хмари точок і формування портрета деталі. Такий підхід орієнтований на оперативне виготовлення виробу безпосередньо за отриманим портретом із застосуванням адитивних технологій [129]. Натомість звичайний РІ включає етапи сталого РІ та додаткові процедури, пов’язані з відновленням CAD-моделі (АЕ) на основі геометрії портрета деталі. Отриманий таким чином АЕ надає можливість обирати різні технології виготовлення, зокрема й адитивні [9].

Якщо звичайний РІ забезпечує побудову АЕ / CAD-моделі практично без відхилень від вихідної геометрії, то для сталого РІ така точність наразі недосяжна. Це зумовлено передусім обмеженими функціональними можливостями сучасного програмного забезпечення. Водночас у виробничій практиці сталий РІ активно застосовується з використанням додаткових рішень, зокрема: розроблення спеціалізованих програмних модулів і калібрування сканувального обладнання під конкретні задачі [169]; використання комбінованих систем, що включають декілька сканерів і координатно-вимірювальні машини (КВМ) [170]; застосування методів штучного інтелекту для корекції отриманої геометрії [171]; а також створення нових підходів до «напівавтоматичного» оброблення хмар точок у відповідному програмному забезпеченні [123] тощо.

Однак застосування таких рішень є доцільним лише за умови, що сформований портрет деталі АК забезпечує необхідну геометричну точність і належну якість поверхонь виготовленої на його основі деталі.

У цьому контексті ключовим є проведення натурних випробувань, тобто дослідження реального зразка шляхом порівняння його портрета з еталонним портретом деталі АК, створеним як першоджерело інформації. Недоліком такого підходу є додаткові фінансові витрати та збільшення часу на випробування, особливо для деталей розміром понад 150×150×150 мм. Проте навіть у разі подолання цих обмежень залишається невизначеним граничне значення допустимих відхилень геометрії виготовленої деталі від її портрета. Це питання стає особливо актуальним при необхідності відновлення пошкоджених деталей або прототипування виробів, для яких відсутня будь-яка конструкторсько-технологічна документація.

Отже, визначення допустимих відхилень геометричних розмірів деталей, виготовлених за портретом як першоджерелом інформації, є актуальним напрямком досліджень.

Завданням дослідження було проаналізувати відкриті джерела щодо забезпечення геометричної точності виготовлених деталей АК, зокрема великих за габаритами та складними за формою, а також визначити параметри допустимих відхилень геометрії деталей, виготовлених за портретом досліджуваної деталі АК як першоджерела інформації.

3.2.2 Аналіз літературних джерел та стан питання

У роботі [14] проаналізовано існуючі концепції відновлення та ремонту на основі PI, виділивши ключові технологічні етапи: оцінку технічного стану, ідентифікацію конструкції та її вузлів, визначення технічних характеристик і повне відтворення технічної документації. Запропоновано обробку відсканованих поверхонь – портретів – за допомогою технологій розпізнавання образів. Однак такий підхід дозволяє отримати лише дані про геометрію та форму зразка, що недостатньо для повноцінної оцінки адекватності контролю. Тому більш ефективним є створення АЕ, яке спрощує контроль через порівняння портрета реального об’єкта, отриманого скануванням, з його АЕ.

Автори роботи [15] розробили додатковий алгоритм у MATLAB для генерації портрета деталі під контролем користувача. Методологія була перевірена на реальній моделі елемента захисного носка черевика. Водночас досліджувана поверхня не містила складних форм, таких як гострі кути чи отвори, і вимоги до точності були значно нижчими порівняно з деталями АК. До всього ж залишається відкритим питання інтеграції цього алгоритму в існуючі CAD/CAM/CAE-системи виробництва. Тому, незважаючи на позитивні результати, технологія сталого PI досліджена недостатньо.

Широкого використання серед інженерів набув метод розбиття на прості геометричні фігури отриманих відсканованих поверхонь, де окремо опрацьовуються їх скоординовані «хмари точок» з наступним кроком поєднання таких фігур в єдину сітку, тобто в портрет «*.STL» [16]. Позитивні результати підтверджено натурними дослідженнями шляхом виготовлення деталі адитивними технологіями за доопрацьованим портретом. Проте автори не навели конкретних даних щодо відхилень геометрії надрукованої деталі від попередньо опрацьованого портрета.

Дослідження авторів роботи [17] корелюються з роботами [15, 16], де описано можливості технології PI для прототипування деталі, коли відсутня будь-яка конструкторсько-технічна документація на неї. Окремо виділено процес роботи з портретом та розпізнавання поверхонь шляхом їх сегментації для виявлення їх геометричної суті. Зокрема запропоновано техніку розроблення бази даних з «хмар точок» і спосіб швидкої інтеграції технології PI в CAD/CAM/CAE-системи, але їх використання є можливим лише у спеціальному програмному продукті на комерційній основі. Також зазначимо, що згідно з указаними рішеннями мається на увазі лише точність вимірів поверхонь деталей на рівні 0,1…0,05 мм, що належить до характеристик використаного сканувального пристрою або КВМ.

Результати досліджень за сталим та звичайним PI для однієї і тієї ж деталі показано в [18]. В роботі досліджено складнопрофільну деталь – корпус рульової машини АК, що має отвори різних розмірів і перехідні поверхні.

Для обробки «хмар точок» і формування єдиного портрета використано стандартні функції програми Geomagic Design X. Слід зазначити, що в дослідженнях

були опущені отвори діаметром менше 5 мм та з внутрішньою різзю. Встановлено, що максимальні відхилення портрета рульової машини АК від АЕ становили від –0,30 мм до +0,23 мм, тобто отриманий АЕ не містив відхилень, які були присутні в портреті. Мінімальні відхилення спостерігалися на вертикальних і горизонтальних площинах (від –0,04 мм до +0,08 мм), тоді як найбільші – у місцях нахилу площин, кутів та отворів діаметром понад 5 мм (без внутрішньої різі). Автори зазначили, що при виготовленні деталі адитивними технологіями за отриманим портретом можуть додатися похибки 3D-друку (усадка матеріалу, неточність режиму друку тощо), що збільшить відхилення геометрії готової деталі. Водночас у роботі [18] не визначено допуски на відхилення розмірів, які впливають на рішення про пропуск деталі у виробництво.

Проблема зникає у разі наявності чітко визначених параметрів якості, зокрема даних щодо геометричної точності виготовленої авіаційної деталі та/або допустимих відхилень її розмірів, як показано в роботі [20]. Проте такий підхід реалізується на стадії створення АЕ деталі при звичайному РІ і не призначений для сталого РІ, тобто для сталого РІ дослідження відсутні.

У роботі [20] наведено порівняння звичайного РІ з традиційними технологіями виготовлення деталей у системі «швидкого виробництва та/або ремонту» (штампування, лиття, фрезерування на ЧПК тощо). Під цим поняттям розуміють скорочення витрат робочого часу на виробництво або відновлювальний ремонт деталей АК, які не виготовлялися в Україні. Основним критерієм є трудомісткість, яку можна зменшити за рахунок правильного вибору сучасних прогресивних методів отримання заготовок, малоопераційності обробки тощо. Автори дійшли висновку, що для дрібносерійного виробництва (до 100 шт.) при кількості деталей понад 10 шт. і геометричній точності більше ±0,5 мм доцільним є використання штампування або 3D-друку, при цьому достатньо ручного зачищення кромок. Якщо геометрична точність менше ±0,5 мм, перевагу слід віддавати фрезеруванню з плити на ЧПК. Водночас залишається невирішеним питання щодо показників точності, які можна забезпечити портретом при його використанні для 3D-друку або обробки на верстаті з ЧПК.

В роботах [18-20] досліджувані деталі мають невеликі розміри до 150х150х150 мм, тому проведення натурних випробувань обраних технологічних рішень не спричиняло б значних труднощів чи фінансових витрат. Водночас залишається відкритим питання щодо більших за зазначені розміри деталей АК. Автори роботи [21] запропонували метод прототипування опукло-вгнутих деталей за технологією сталого РІ на прикладі лопатки насосної гідроелектростанції з габаритними розмірами 230х641 мм. В його основі покладено доопрацювання отриманого портрета лопаті до еталонної геометрії та пропорційне зменшення розмірів під характеристики вибраного 3D-принтера для друку пробного зразка. Отримані експериментальні дослідження зі сканування зразка лопаті в зменшеному розмірі та порівняння з еталонним портретом показали, що відхилення становили від –0,123 мм до +0,120 мм. Останнє не перевершувало визначене поле допуску 0,25 мм. Натурні випробування показали позитивні результати щодо запропонованого методу прототипування опукло-вгнутих деталей АК, а результати контролю вважалися як достовірні та адекватні.

Слід зазначити, що допуск на розмір визначається параметром відносної геометричної точності, номінальним розміром деталі та квалітетом її виготовлення. Отже, встановлення допустимих відхилень геометрії виготовлених деталей АК будь-яких розмірів за доопрацьованим портретом є актуальним завданням, особливо для потреб швидкого виробництва адитивним способом при прототипуванні, ремонті та заміні деталей АК.

3.2.3 Визначення параметрів допустимих відхилень геометрії деталі

Геометрична точність виготовлення деталей авіаційних конструкцій визначається комплексом властивостей технологічного процесу формоутворення їх поверхонь та відповідністю цього процесу й отриманих результатів встановленим технічним вимогам. Аналіз виробничого досвіду і відкритих джерел свідчить, що ключовими факторами, які впливають на забезпечення геометричної точності готових деталей, є: рівень якості застосовуваного обладнання та інструменту; фізико-хімічні, механічні та інші властивості вихідних матеріалів і заготовок; досконалість

розробленого технологічного процесу; а також рівень виконання оброблення і контролю, що разом формує надійну основу для досягнення заданих параметрів точності [172].

У загальному машинобудуванні показник геометричної точності деталей безпосередньо корелює з точністю їх оброблення [173]. Фактичні розміри, форма та взаємне розташування поверхонь, отримані в процесі обробки, визначають реальні зазори та натяги при складанні деталей у виріб, що, у свою чергу, впливає на технічні характеристики авіаційних конструкцій, їх експлуатаційну надійність, працездатність та економічні показники виробництва [174, 175]. Таким чином, геометрична точність виготовлених деталей повинна забезпечувати відповідність встановленим конструктивним допускам та технічним вимогам, визначеним умовами експлуатації в авіаційних конструкціях.

Фактична геометрична точність виготовленої поверхні деталі відрізняється від номінальної (еталонної) поверхні, яка у випадку звичайного РІ задається АЕ деталі, а при сталому РІ – портретом. Похибка оброблення визначається як відхилення фактично отриманого геометричного параметра поверхні від заданого [172]. У разі відсутності встановлених допустимих відхилень форми та розташування поверхонь їх значення обмежується полем допуску на розмір [173, 176–178]. У табл. 3.1 і 3.2 наведено допустимі відхилення форми циліндричних та плоских поверхонь залежно від квалітету допуску розміру та рівня відносної геометричної точності.

У табл. 3.1 позначено таке. Під номінальним розміром розуміють номінальний діаметр поверхні. Допуски циліндричності, круглості і профілю поздовжнього перерізу, що відповідають рівням: А – нормальний, В – збільшений, С – високої відносної геометричної точності, що становить приблизно 30, 20 і 12 % допуску розміру. Допуски форми обмежують відхилення радіуса. Допуск діаметра може бути жорсткий, проте виконання точності циліндричністі є більш складною технологічною вимогою. Допуски геометрії, для яких використовується менше 12 % допуску розміру, характеризують особливо високу геометричну точність поверхні. Допуски геометрії призначають в тих випадках, коли вони мають бути менше допуску розміру. У табл. 3.2 під номінальним розміром розуміють розмір найбільшої сторони плоскої поверхні.

Табл. 3.1 – Допуски (мкм) форм циліндричних поверхонь (циліндричності, круглості і профілю поздовжнього перерізу) залежно від квалітету допуску розміру [173]

Квалітети допуску розміру за рівнем відносної геометричної точності			Інтервал номінальних розмірів, мм											
			До 3	Від 3 до 10	Від 10 до 18	Від 18 до 30	Від 30 до 50	Від 50 до 120	Від 120 до 250	Від 250 до 400	Від 400 до 630	Від 3 до 10	Від 630 до 1000	Від 1000 до 2500
A	B	C												
		4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,5	3	4
	4	5	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,5	3	4	5	6
4	5	6	0,8	1	1,2	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8	10
5	6	7	1,2	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16
6	7	8	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25
7	8	9	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	30	40
8	9	10	5	6	8	10	12	16	20	25	30	40	50	60
9	10	11	8	10	12	16	20	25	30	40	50	60	80	100
10	11	12	12	16	20	25	30	40	50	60	80	100	120	160
11	12		20	25	30	40	50	60	80	100	120	160	200	250
12			30	40	50	60	80	100	120	160	200	250	300	400

Табл. 3.2 – Допуски (мкм) прямолінійності, площинності і паралельності площин залежно від квалітету допуску розміру [173]

Квалітети допуску розміру за рівнем відносної геометричної точності			Інтервал номінальних розмірів, мм									
			До 3	Від 3 до 10	Від 10 до 18	Від 18 до 30	Від 30 до 50	Від 50 до 120	Від 120 до 250	Від 250 до 400	Від 400 до 630	Від 630 до 1000	Від 1000 до 1250
A	B	C											
		4	0,81	1	1,2	1,6	1,6	2-2,5	3	4	5	8	8
		5	1	1,6	2	2	2,5	3-4	5	6	8	10	10
	4		1,2	1,6	2	2,5	2,5	3-4	5	6	8	12	12
4			2	2,5	3	4	4	6	8	10	12	20	20
	5	6	1,6	2-2,5	2,5-3	3	4	5-6	6-8	8-10	10-12	12-16	16
5	6	7	2,5	3-4	4-5	5	6	8-10	10-12	12-16	16-20	20-25	25
6	7	8	4	5	6	8	10	12	16	20	25	30	40
7	8	9	6	8	10	12	16	20	25	30	40	50	60
8	9	10	10	12	16	20	25	30	40	50	60	80	100
9	10	11	16	20	25	30	40	50	60	80	100	120	160
10	11	12	25	30	40	50	60	80	100	120	160	200	250
11	12		40	50	60	80	100	120	160	200	250	300	400
12			60	80	100	120	160	200	250	300	400	500	600

Слід підкреслити, що розміри допусків форми циліндричних та плоских поверхонь, а також значення їх шорсткості залежать від квалітетів допусків розмірів та рівнів відносної геометричної точності [172]. У випадках, коли необхідно прототипувати або відновити деталь за відсутності будь-якої технічної документації, тобто без даних щодо квалітету допуску розміру, слід здійснити конструктивно-технологічний аналіз досліджуваної деталі та визначити відповідні параметри розміру на основі довідкових даних таблиць 3.1 і 3.2. Отримані значення виступають як остаточні параметри, що визначають коректність геометрії портрета досліджуваної деталі, виготовленої за методами РІ та адитивними технологіями.

3.2.4 Обговорення результатів і перспективи розвитку РІ

При формуванні остаточного рішення щодо прийняття рішення пропуску деталі у виробництво ключеве значення мають використання статистичних, довідкових і набутих практичним виробничим досвідом даних, що наведені у табл. 3.1 і 3.2. Так, фактично при прототипуванні великогабаритних деталей виникаюча необхідність з апробації отриманої геометрії за РІ як для звичайного, так і сталого методів шляхом виготовлення досліджуваної деталі адитивним способом, вирішується друкуванням деталі будь-яких прийнятних розмірів, що визначаються з урахуванням: робочої зони 3D-принтера; діаметра сопла або діаметра вихідного розплавленого пластику (зазвичай 0,2 мм); мінімізації використання матеріалу та часу друку (нормально до 8 годин робочого дня); точності друку (приблизно 40 мкм); підтримки формату файлу портрета; точності геометрії на виготовлений зразок тощо.

Слід зазначити, що основною метою пропорційного зменшення розмірів досліджуваного зразка під час апробації геометрії, отриманої за методами РІ, є мінімізація витрат матеріалу та часу на виготовлення пробних зразків, а також оптимізація режимів друку і шарування з урахуванням забезпечення точності кутів, радіусів заокруглень та інших критичних елементів поверхні.

Єдиною обмежувальною умовою застосування даного підходу є необхідність узгодження характеристик 3D-сканера, що може визначати допустимі фактичні розміри зразка для забезпечення стабільного трекінгу поверхонь на етапах контролю.

Водночас зазначена проблема вирішується за наявності на виробництві відповідної лінійки 3D-сканерів та 3D-принтерів. Це дозволяє здійснювати попередні випробування на пробних зразках для досліджуваних деталей розміром понад 150×150×150 мм із застосуванням методів РІ, зокрема за допомогою наступного обладнання:

– 3D-сканер EVA Lite ARTEC для створення АЕ деталі у разі звичайного РІ або портрета деталі при сталому РІ;

– виготовлення пробного зразка у зменшеному масштабі відповідно до робочої зони обраного або доступного 3D-принтера, наприклад CREATBOT F430 (CHINA);

– контроль отриманого зразка за допомогою 3D-сканера Space Spider ARTEC з урахуванням встановлених допусків, наведених у табл. 3.1 і 3.2.

Нижче наведені дослідження, що демонструють практичну реалізацію і засвідчують коректність та адекватність теоретичних засад методу прототипування на прикладі великогабаритної опукло-вгнутої деталі АК, для якої відсутня конструкторсько-технологічна документація.

3.3 Метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої точності їх виготовлення

Дослідження з прототипування деталей АК обумовлено його широким попитом для використання при виробництві деталей та ремонті різних конструкцій. Значну роль у забезпеченні геометричної точності виготовленої деталі відіграють висока кваліфікація виконавця та побудова АЕ. Слід зазначити, що інформаційний обсяг АЕ досить великий і потребує потужної комп’ютерної техніки та програмного забезпечення. Тому виробники деталей АК створюють на базі існуючого АЕ цифрові близнюки (англ. digital twin), закріплюючи за ними конкретні функції або технологічні процеси [179, 180]. Однак прагнення зменшити трудомісткість та час

ТПВ наштовхнуло на зменшення кількості технологічних етапів шляхом доопрацювання створеного портрета в еталонний (див. п. 2.3). Тому виконано дослідження з оброблення отриманого портрета деталі $П_Д$ (файл «*.STL») з високою точністю та перевіркою геометричної точності за зразком, виготовленим 3D-друком, як розвиток теорії методу, запропонованим дисертантом в [134]. Перевірку та підтвердження адекватності еталонного портрета виконано за теорією п. 3.2.

3.3.1 Передумови створення методу прототипування опукло-вгнутих деталей за методом сталого PI

Значну роль у забезпеченні геометричної точності АЕ відіграє висока кваліфікація виконавця та використане відповідне обладнання з 3D-сканування. Так, у роботі [170] подано порівняння отриманих замірів деталей під час різання при застосуванні КВМ і трьох оптичних сканерів. Зазначено, що КВМ зберігає свої позиції за точністю сканування отриманих портретів, але надаються позитивні прогнози і для 3D-сканерів за умови підвищення точності та розроблення відповідного програмного забезпечення. Продовженням досліджень роботи [170] є результати, подані у дослідженнях [169], де поєднано в систему роботизовану руку, 3D-сканер та поворотний стіл, на якому розташована проста промислова деталь. Автори пропонують додати до програмного забезпечення калібрування системи «камера сканера-обертання об’єкта на столі», що дає змогу відтворювати віртуальне 3D-сканування з підвищеною точністю. Отримані експериментальні результати продемонстрували високу точність і кращу продуктивність у системному калібруванні, обчисленні шляху сканування та з’єднанні даних сканування в декількох ракурсах на деталях загального машинобудування простих форм. Однак для складнопрофільних, опукло-вгнутих деталей такі підходи будуть довгими за часом і складними у виконанні, оскільки потребують покрокового контролю у відповідних перерізах. Як показано у роботі [181], навіть при використанні одного і того ж програмного забезпечення із широкими функціональними можливостями суттєвим у скануванні є характеристики вибраного 3D-сканера не тільки за точністю сканування, а й за

роздільною здатністю. Шляхом правильного підбору сканера, розташування та кількості маркерів на поверхні досліджуваної деталі можна скоротити час на оброблення отриманого скануванням портрета та збільшити його точність. Отже, дослідження [134, 169, 170, 181] довели, що найголовніше – це отримання з високою точністю портрета, що, в свою чергу, впливає на прийняття рішення щодо необхідності побудови АЕ за умови виготовлення деталі або за адитивною або екстрактивною технологією. Так, у роботі дисертанта [129] продемонстровано достатність геометричної точності портрета формату файлу «*.STL», що задовольняє вимоги до сумарно допустимої похибки на виготовлену деталь за адитивними технологіями. Незважаючи на позитивність отриманих результатів, що підтверджено при контролі виготовленої деталі 3D-друком, використання наведеного методу, який названо стабільним PI, породжує сумніви щодо забезпечення геометричної точності складнопрофільних і опукло-вгнутих деталей. Так, автори роботи [182] зробили висновки про те, що існуючі можливості програмного забезпечення для корекції портрета в еталонний не завжди забезпечують вимоги точності до ±0,5 мм на виготовлення складнопрофільної деталі 3D-друком. У цьому випадку портрет деталі, що має поверхні з радіусом округлення до 0,5 мм, гострими кутами, різьбою тощо, може стати лише базовою геометрією для побудови АЕ певних розмірів. Альтернативою стає робота [132], в якій подано методологію PHENIX, що дає змогу виконати 3D-моделювання АЕ за отриманим портретом опукло-вгнутих деталей (профільні труби і лопаті подвійної кривизни). Доведено, що отримані результати з відбудови АЕ за допомогою PHENIX вважаються позитивними за вимогою забезпечення точності відбудови АЕ від 0,8 до 1,2 мм для профільних труб і 1,0 мм для лопаті подвійної кривизни. Однак автори роботи [132] не врахували того, що при виготовленні деталі набігає похибка і для прийняття рішення щодо позитивності результатів слід враховувати саме остаточну сумарну похибку. Зазначимо також, що відбудова АЕ є досить трудомісткою і порівняно з вимогами геометричної точності не менше ±0,5 мм [121] такі результати не можуть бути позитивними для пропуску в виробництво. Тому використання PHENIX є можливим лише для прототипування і модернізації за умови коригування АЕ за геометрією, але не для операцій

контролю. У низці подальших робіт [123, 183] показано важливість отримання і доопрацювання портрета з високою точністю в еталонний, а також вибору методу апроксимації та оброблення отриманих поверхонь 3D-скануванням. Так, у [183] проаналізовано можливості програмного забезпечення з оброблення плоских поверхонь та поверхонь, що перетинаються та мають радіуси заокруглення кутів. У роботі [123] запропоновано підхід щодо доопрацювання хмари точок (портрета «*.STL»), що, в свою чергу, усуває потребу в додаткових операціях сканування. Єдиним недоліком є їх автоматичне постооброблення, що зменшує точність геометричних розмірів. У роботі [184] продемонстровано три варіанти отримання поверхонь (фотограмметрія, 3D-сканування та 3D-моделювання), де остаточним результатом є порівняльний аналіз загального часу та якості виготовлення прототипованих деталей за адитивними технологіями. Автори зробили висновки на користь 3D-сканування, однак даних з отриманої геометричної точності не подано. У роботі [185] показано повний цикл прототипування деталі за РІ та адитивними технологіями. Однак у цьому разі мова йде про створення АЕ з отриманого портрета деталі та його використання для виготовлення деталі 3D-друком. Контроль геометрії отриманої деталі реалізовувався також за даними АЕ. Отже, адекватність прийнятих інженерних рішень при обробленні портрета і відбудові АЕ РІ пояснюється саме за виготовленою за ними деталлю. Слід зауважити, що для великогабаритних опукло-вгнутих деталей (панелі АК, лопаті атомних та гідроелектростанцій тощо) натурні експерименти завжди є дорогими і потребують високої кваліфікації виконавців. Тому виникла потреба у створенні методу прототипування таких деталей АК із забезпеченням заданої геометричної точності за умови обмеженого часу та фінансових можливостей. Це дасть можливість досить швидко впроваджувати інженерні рішення РІ з доопрацювання та відбудови як отриманих портретів і АЕ, так і з підвищення точності виробництва натурної деталі.

Дослідження виконувалося за такими кроками: 1 – конструктивно-технологічний аналіз досліджуваного зразка; 2 – підбір необхідного сканувального пристрою; 3 – 3D-сканування; 4 – оброблення отриманих відсканованих поверхонь і створення портрета – файлу формату «*.STL»; 5 – створення еталонного портрета

з геометрії даних отриманого портрета; 6 – 3D-друк натурного зразка у зменшеному розмірі за даними еталонного портрета файлу формату «*.STL», що відповідно зменшено; 7 – контроль і порівняння портрета, отриманого з натурного зразка у зменшеному розмірі, з відповідно зменшеним еталонним портретом; 8 – аналіз отриманих результатів і висновки.

Гіпотеза дослідження полягала у припущенні, що контроль геометричної точності еталонного портрета можна виконати за отриманим портретом досліджуваної деталі, що була надрукована за адитивними технологіями. При цьому для деталей великих розмірів така апробація є можливою на зменшених розмірах еталонного портрета за умови визначення допуску на номінальний розмір надрукованого зразка. Тобто за відсутності указання на допуск відхилення форми і розташування поверхонь ці відхилення обмежуються полем допуску на розмір із загальноприйнятих у машинобудуванні довідкових даних [172, 173, 174, 175, 176, 177, 178].

Для дослідів була вибрана лопать турбіни насосної атомної гідроелектростанції. За конструктивно-технологічним аналізом було вибрано 3D-сканер ARTEC Leo (Luxembourg) (рис. 3.6) з характеристиками, що наведені в табл. 3.3 [186].



Рис. 3.6 – 3D-сканер ARTEC Leo (Luxembourg) [186]

Такий сканер має точність сканування 0,1 мм і розподільну здатність до 0,2 мм, що задовольняє вимоги щодо поля допусків на розміри досліджуваної деталі АК [187].

Табл. 3.3 – Технічні характеристики 3D-сканера ARTEC Leo (Luxembourg) [186]

Назва параметра, одиниця виміру	Величина параметра
3D-точність до, мм	0,1
3D-розділення до, мм	0,2
Точність залежно від відстані, до:	0,1 мм + 0,3 мм/м
Режим HD	Так
Подвійний трекінг: за текстурою і геометрією	Так
Алгоритми обробки даних	На основі текстури та геометрії
Робоча відстань, м	0,35 -1,2
Зона захоплення об'єму, $см^3$	160000
Лінійне поле зору на ближній відстані, В х Ш, мм	244 х 142
Лінійне поле зору на далекій відстані, В х Ш, мм	838 х 488
Кутове поле зору, В х Ш	38,5 х 23
Зчитування текстури	Так
Розділення текстури, Мп	2,3
Передача кольору, bpp	24
Швидкість 3D-реконструкції для склеювання в реальному часі до, кадр./с	22
Швидкість 3D-реконструкції для 3D-відео до, кадр./с	44
Час 2D-експонування з:	0,0002
Час 3D-експонування з:	0,0002

Назва параметра, одиниця виміру	Величина параметра
3D-підсвічування	VCSEL
Датчики положення	Вбудована 9-осьова інерційна система
Сенсорний екран	Вбудований сенсорний екран 5,5 half HD, CTP. Можливість передачі зображення на зовнішній комп'ютер через Wi-Fi або Ethernet
Мультиядерний процесор	Вбудовані процесори: NVIDIA Jetson TX2 Quad-core ARM Cortex-A57 MPCORE Processor NVIDIA Maxwell 1 TFLOPS GPU with 256 NVIDIA CUDA Cores
Інтерфейс:	Wi-Fi, Ethernet, карта SD
Вбудований жорсткий диск	512 Gb SSD
Габарити, В х Г х Ш, мм	231 x 162 x 230
Маса, кг	2,6
Формати 3D-сітки	OBJ, PLY, WRL, STL, AOP, ASC, Disney PTX, E57, XYZRGB
Формати САПР	STEP, IGES, X_T

На рис. 3.7 показано досліджувану деталь – лопать турбіни насосної атомної гідроелектростанції.

Для швидкої та легкої побудови, а також для отримання точних і математично визначених моделей використано моделювання за допомогою простих геометричних фігур – примітивів [188]. 3D-моделі розуміються як 3D-об'єкти, що використовують набір точок у 3D-просторі, поєднаних між собою різноманітними геометричними об'єктами наприклад трикутниками, лініями тощо [189].

Термін «цифрова модель» означає модель, яку розроблено засобами та інструментами CAD-систем з використанням сплайнової геометрії [190].

Портрет – це набір даних про точки у вигляді файлу даних – хмар точок, що отримані в результаті 3D-сканування поверхні [191]. Хмара точок являє собою набір вершин у тривимірній системі координат, які визначаються координатами X, Y

та Z. Хмара точок дає геометрію поверхні та подання зовнішньої поверхні об’єкта, тобто його форми. 3D-друк натурного зразка у зменшеному розмірі досліджуваної деталі виконувався на 3D-принтері CREATBOT F430 (CHINA) [192].



а б в

а – з одного боку; б – з іншого боку; в – зверху

Рис. 3.7 – Лопать дослідної деталі

Під параметрами контролю і порівняння отриманих портретів розуміють «відхилення форми заданого профілю» за визначеннями [193]. Геометричні розміри таких відхилень визначаються як максимальні відхилення точок фактичного профілю від відповідних точок номінального профілю, що оцінюються по нормалі в межах встановленої нормованої ділянки. Дані вимірів портрета не мали топологічної інформації і тому перетворювалися на файли сітчастих структур із трикутною формою елементів (stereolithography – файл формату «*.STL») [194, 195].

Створення еталонного портрета складалося з доопрацювання отриманого портрета відсканованої лопаті в ПЗ Geomagic Design X (США) [196].

Контроль відхилень портрета, отриманого з надрукованого натурного зразка, виконувався шляхом порівняння з еталонним.

3.3.2 Створення портрета лопаті досліджуваної деталі

Конструктивно-технологічний аналіз показав, що лопать має вигляд, наведений на рис. 3.7:

– опукло-вгнуту форму з перемінним профілем, тобто подвійну кривизну;

– змінну товщину стінки (найбільша товщина в перерізі становила від 17,964 до 32,546 мм) вздовж висоти (640,46 мм);

– наскрізні отвори зі змінними діаметрами (від 21 до 34 мм) і циліндричними формами;

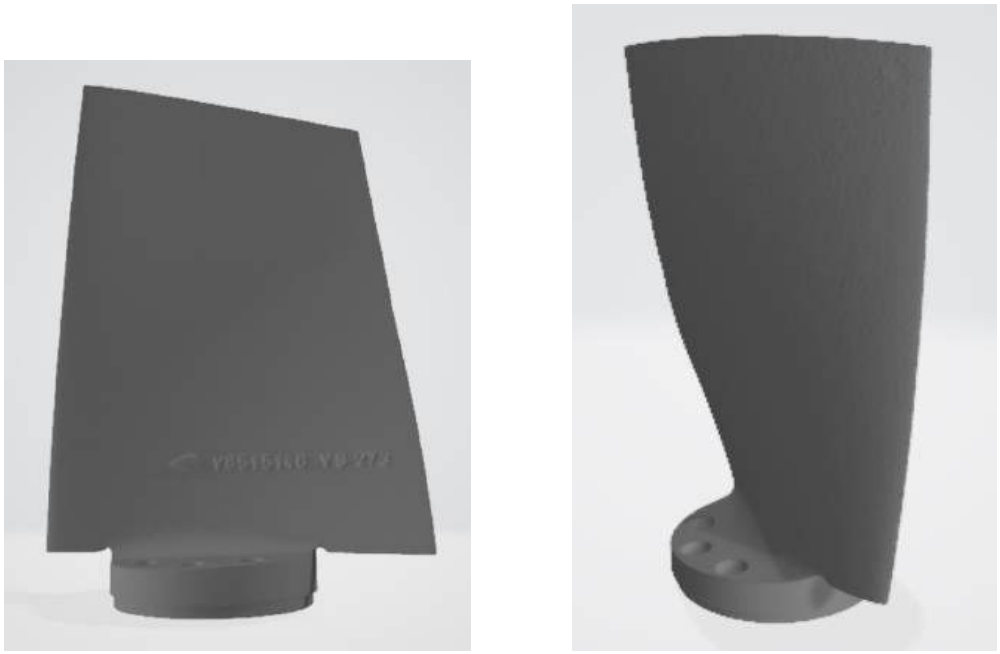
– кути 90° і радіуси заокруглень кромок отворів (до 4 мм);

– висоту хвостовика лопаті 52,11 мм;

– міжцентрову дистанцію отворів 188 мм.

Для отримання замкнутої відсканованої поверхні лопаті сканування зроблено з обох боків, а потім – хвостовик з'єднання за підходом, описаним у підрозділі 3.1.

На рис. 3.8 показано портрет лопаті досліджуваної деталі.



а б

а – вигляд з одного боку; б – вигляд з іншого боку

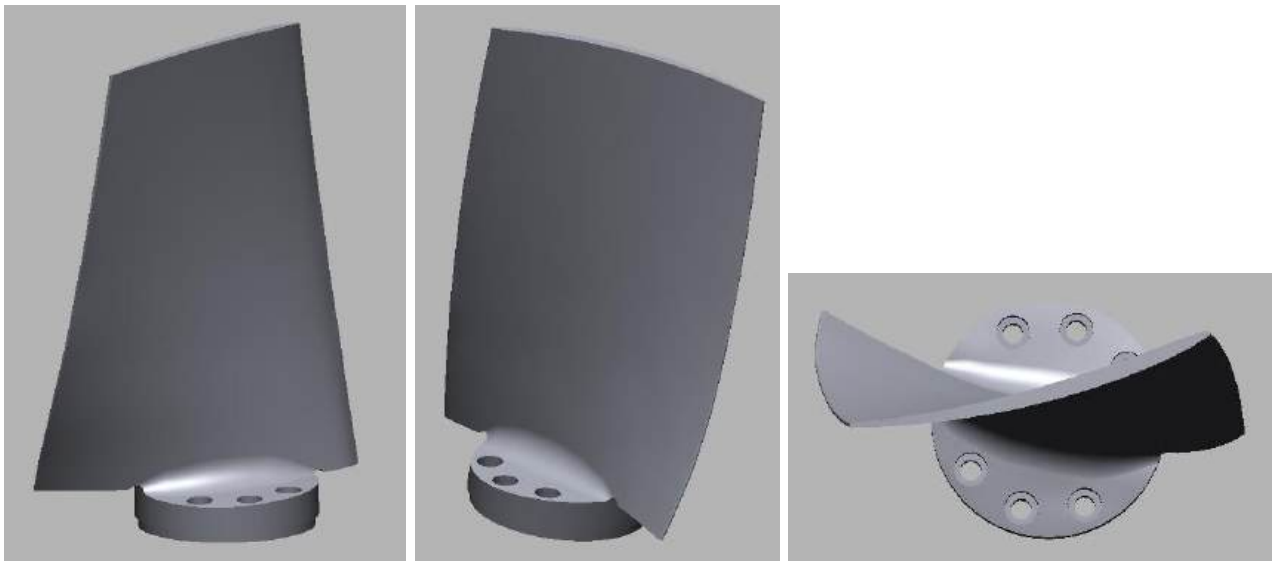
Рис. 3.8 – Портрет лопаті формату *.STL»

Для спрощення складання отриманих сканів було використано маркери з пластиліну, що полегшило створення єдиної полігональної сітки у програмі ARTEC Studio, яка є ПЗ сканера ARTEC Leo. За допомогою цих маркерів було виконано вирівнювання відсканованих поверхонь за отриманою геометрією та створено реальний портрет лопаті файлу формату «*.STL».

Складнощі зі скануванням виявлено лише для отворів та кромок, поверхні яких доопрацьовувалися на наступному етапі – при створенні ідеального портрета.

3.3.3 Створення еталонного портрета лопаті досліджуваної деталі

На рис. 3.9 показано еталонний портрет лопаті після оброблення отриманого портрета (див. рис. 3.8) в ПЗ Geomagic Design X. Слід зазначити, що маркери лопаті, що засканувалися і відобразилися на портреті було видалено відповідними програмними інструментами.



а б в

а – вигляд з одного боку, б – вигляд з іншого боку; в – вигляд зверху

Рис. 3.9 – Еталонний портрет лопаті досліджуваної деталі

Було використано інструменти, що добре зарекомендували себе за результатами роботи [182]:

1. «Healind Wizard», який виявив та виправив самоперетинання, шипи, дрібні компоненти, тунелі та отвори полігональної моделі.

2. «Desimate», що скоротив до потрібної кількості або відсотка полігонів у полігональній сітці без погіршення її деталізації.

3. «Optimize Mash», що дозволив отримати більш рівномірні трикутники шляхом оптимізації сітки.

4. «Defeature», що видалив та відновив виділену область за допомогою інтелектуальних алгоритмів. Цей інструмент було використано для видалення з поверхонь маркерів, що були нанесені для трекінгу під час сканування, непотрібних отворів та деяких дефектів.

5. «Fill Holes», дала змогу заповнити непотрібні сколи і отвори, а також вирівняти їх грані. Ця функція є корисною, коли є необхідність заповнювати «складні» поверхні або непотрібні вириви і отвори тощо.

3.3.4 Контроль геометрії створеного портрета виготовленого 3D-друком зразком у зменшеному розмірі за еталонним портретом лопаті

Перевірка та контроль геометрії еталонного портрета файлу формату «*.STL» для прийняття рішення щодо можливості його використання для виготовлення лопаті за адитивними або екстрактивними технологіями виконували таким чином. Було прийнято рішення реалізувати 3D-друк зразка лопаті у зменшеному розмірі за файлом еталонного портрета. Зменшення розміру є необхідним для мінімізації використання матеріалу на пробні зразки при підборі режимів друку, шарів укладання пластику при забезпеченні кутів та радіусів заокруглень тощо. Відсоток зменшення розміру зразка лопаті для друку брати виходячи:

– з робочої зони 3D-принтеру;

– діаметра сопла або діаметра вихідного розплавленого пластику (0,2 мм);

– мінімізації використання матеріалу та часу друку (до 8 годин робочого дня);

– точності друку (40 мкм);

– підтримки формату «*.STL» файлу портрета;

– точності геометрії на виготовлений зразок.

Було взято такі параметри для друку зразка лопаті (рис. 3.10):

– температура друку – 210 ºС;

– температура стола – 60 ºС;

– товщина шару друку – 0,2 мм;

– оболонка стінок: 2 шари (0,8 мм);

– товщина дна і верху: 4 шари (0,8 мм);

– заповнення внутрішньої порожнини – 15 %;

– автогенерація підтримок з відступом 0,2 мм від поверхні для полегшення її видалення без пошкодження основного зразка;

– швидкість друку – 60 мм/с;

– загальний час друку – 6 годин 15 хвилин.

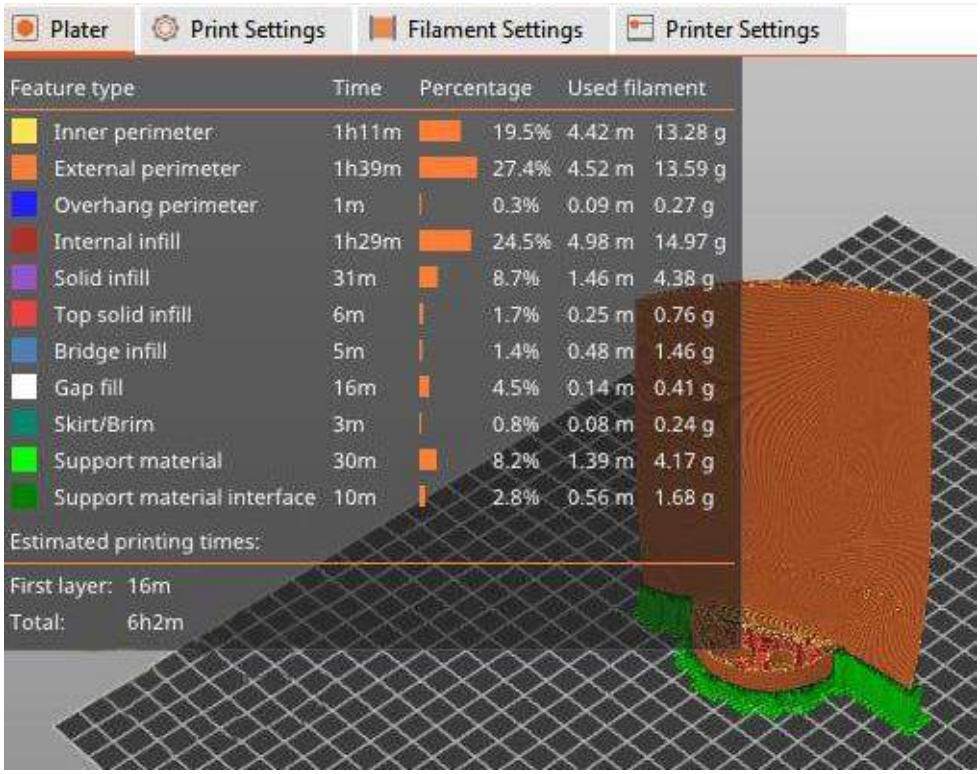


Рис. 3.10 – Вибір параметрів для друку зразка лопаті

Таким чином, розміри зразка лопаті були пропорційно зменшені в чотири рази (на 75 %) від оригіналу і становили 150x100,571x57,763 мм порівняно з натурними розмірами лопаті 640,632x429,527x246,698 мм.

На рис. 3.11 подано надрукований зразок лопаті у зменшеному розмірі.

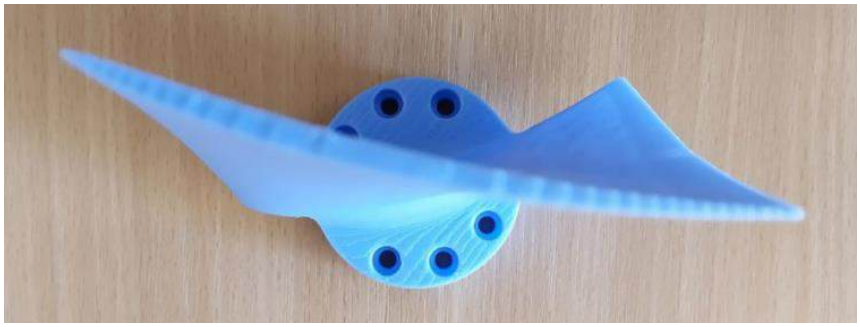
Наступними дослідженнями стали порівняння отриманої геометрії надрукованого зразка з його еталонним портретом.

Для контролю портрета зразка лопаті в зменшеному форматі було виконано таке ж пропорційне зменшення розмірів еталонного портрета за допомогою інструменту «Transformation Tool» ПЗ Geomagic Design X.

Процес порівняння портретів показано на рис. 3.12.



а б



в

а – з підтримкою; б – без підтримки; в – вигляд зверху

Рис. 3.11 – Зразок лопаті досліджуваної деталі у зменшеному розмірі, виготовленого 3D-друком

Отримано такі діапазони величин відхилень при порівнянні геометрії портрета зменшеного зразка, виготовленого 3D-друком, з еталонним:

– опукла поверхня: –0,002…–0,086 мм і +0,004…+0,091 мм;

– вгнута поверхня: –0,021…–0,46 мм і +0,013…+0,059 мм;

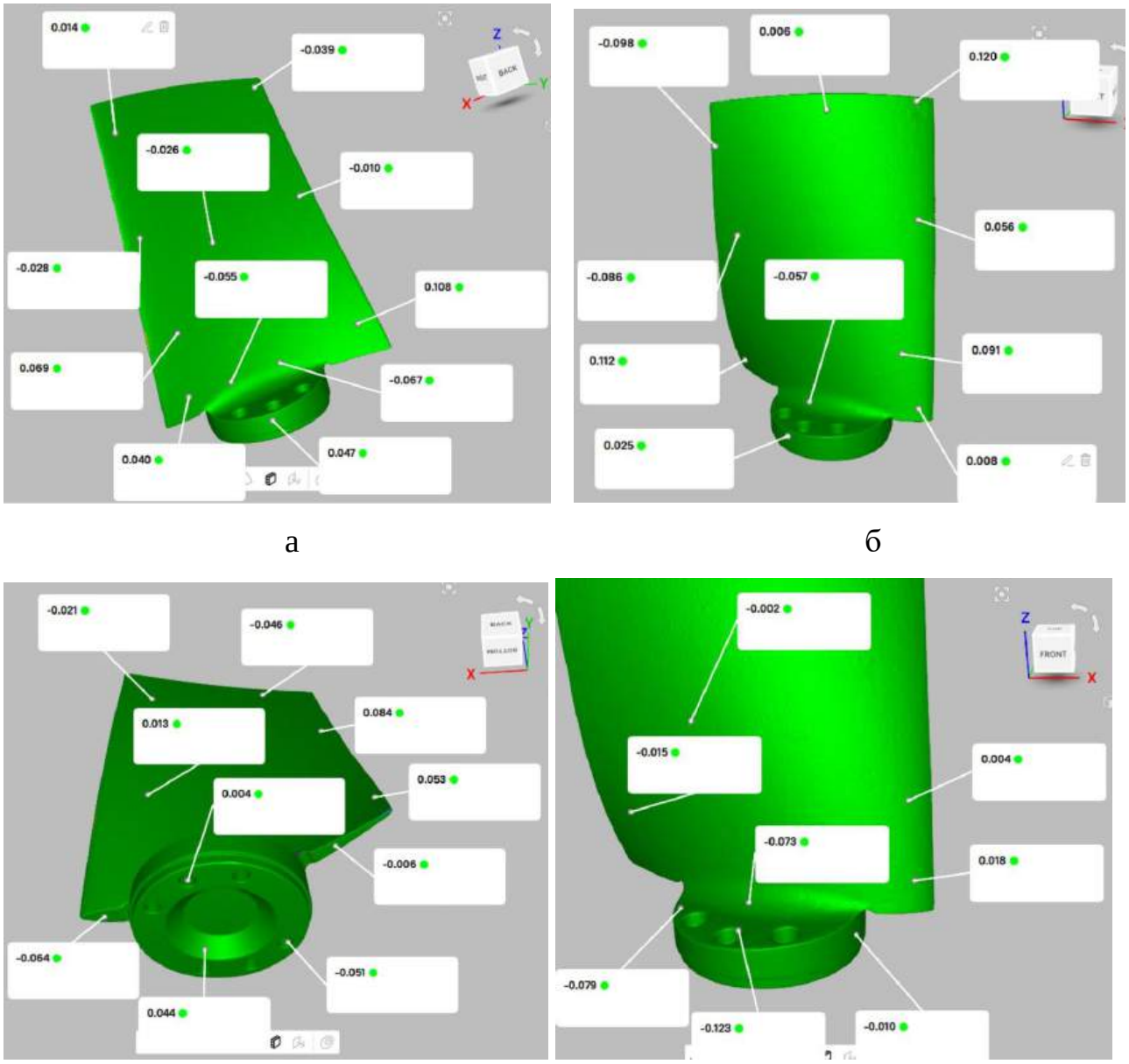
– перетин опуклої поверхні з циліндричним хвостовиком: –0,57…–0,79 мм;

– перетин вгнутої поверхні з циліндричним хвостовиком: –0,055…–0,067 мм;

– задня кромка з боку опуклої поверхні: –0,015…–0,098 і +0,009…+0,120 мм;

– задня кромка з боку вгнутої поверхні: –0,010…–0,039 мм і

+0,053…+0,084 мм;



а б

в г

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

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

Рис. 3.12 – Контроль та порівняння портрета зразка лопаті у зменшеному форматі з еталонним

– передня кромка з боку опуклої поверхі: +0,004…+0,056 мм;

– передня кромка з боку вгнутої поверхні: +0,014…+0,040 мм;

– отвори: –0,051…–0,123 мм;

– інші поверхні та радіуси перетину площин: –0,006…–0,079 і

+0,044…+0,112 мм.

Слід зазначити, що авторам досліджень невідомими є значення геометричної точності на виготовлену деталь, тому було прийнято рішення щодо використання загальноприйнятих у машинобудуванні довідкових даних. Так, за даними [20] за відсутності указання про допустимі відхилення форми та розташування поверхонь такі відхилення обмежуються полем допуску на номінальний розмір деталі і зразка. Вважалося, що лопать турбіни насосної атомної гідроелектростанції виготовлена за 12-квалітетом точності. Тоді для зразка лопаті у зменшеному розмірі (у 4 рази від оригіналу) поле допуску на виготовлену деталь становила 0,25 мм, а для оригінальних розмірів деталі – 0,6 мм (див. табл. 3.1 і 3.2). У свою чергу це підтверджується даними [173].

3.3.5 Обговорення результатів апробації методу прототипування опукло-вгнутих деталей за методом сталого PI

У них дослідженнях створений портрет з реально фізично існуючої лопаті насосної гідроелектростанції (див. рис. 3.7) в форматі «*.STL» з урахуванням точності, яку забезпечує сканер ARTEC Leo (табл. 3.3), дав змогу отримати геометрію та форму з точністю ±0,1 мм. Слід зазначити, що порівняно з контактними методами контролю робіт [169, 170] безконтактний метод на базі сканування не потребує особливих виробничих умов та дав змогу виконати роботи безпосередньо на місці розташування деталі.

Шляхом використання ряду інструментів ПЗ Geomagic Design X було доопрацьовано отриманого портрета лопаті і прийнято як еталонний, тобто як першоджерело інформації для виготовлення дослідної заготовки або зразка. Отриманий еталонний портрет формату «*.STL» було зменшено до 25 % від оригінальних розмірів, що дало змогу зменшити час 3D-друку і масу використаного матеріалу.

Контроль виготовленого 3D-друком зразка лопаті у зменшеному розмірі виконувався за порівнянням геометрії портрета, отриманого з нього, з відповідно зменшеним еталонним портретом. Пропорційне зменшення еталонного портрета лопаті формату «*.STL» в ПЗ Geomagic Design X дало змогу зберегти геометрію та форму.

Отримані експериментальні дослідження зі сканування зразка лопаті у зменшеному розмірі та порівняння з еталонним портретом показали, що відхилення становлять від –0,123 до +0,120 мм, що не перевершує визначеного поля допуску 0,25 мм за даними [187]. Слід зазначити, що допуск на розмір залежить від параметра відносної геометричної точності, номінального розміру деталі та квалітету точності виготовлення деталі.

Експеримент показав позитивні результати щодо запропонованого методу прототипування опукло-вгнутих авіаційних деталей, а результати контролю вважалися як достовірні та адекватні порівняно з даними роботи [122].

На відміну від повного технологічного ланцюжка прототипування за звичайним PI, як наведено в роботі [183], доведено, що доопрацьований – еталонний портрет «*.STL» (див. рис. 3.9) можна використовувати для виготовлення деталі за адитивними технологіями. Більш того, виконані дослідження дають змогу виконувати попередні випробування і контроль еталонного портрета «*.STL» на предмет його використання в адитивному або екстрактивному виробництві за умови отримання задовільної точності виготовлення деталі.

Особливістю запропонованого методу прототипування опукло-вгнутих деталей АК є використання портрета з оригінальної деталі без додаткових етапів створення АЕ. Вирішення такої задачі передбачає відновлення геометрії і форм будь-яких розмірів за умови використання відповідного за характеристиками 3D-сканера та/або КВМ, де може бути використана і технологія за рекомендаціями роботи [129]. Але якщо порівнювати обсяг інформації АЕ та портрета досліджуваної деталі, то останній містить інформацію виключно з геометрії та форм. Можливість виготовлення деталі за отриманим з неї еталонним портретом за адитивними технологіями доповнює роботу [182]. Зазначимо, що у цьому випадку вирішальним критерієм є або геометрична точність або поле допуску на розмір виготовленої деталі.

Виходячи з запропонованого методу прототипування, можна виконати випробування віртуальної техніки зворотного проєктування з метою виявлення його до-

цільності та адекватності, що подано в роботі [123]. Доцільність скорочення технологічного ланцюжка з прототипування продиктовано ще й складністю та обмеженістю при побудові АЕ, що достатньою мірою доведено в роботі [184].

Метод прототипування опукло-вгнутих деталей АК із забезпеченням заданої точності на виготовлення деталі дасть змогу досить швидко впроваджувати інженерні рішення РІ з відбудови не тільки портрета, а й АЕ деталі АК.

Запровадження методу прототипування за еталонним портретом дасть змогу об'єднати низку рішень на її основі, а саме:

– вирішити задачу прототипування деталей, як наведено в дослідженнях [185];

– використати еталонний портрет як першоджерело інформації, що запропоновано в роботі [187].

Використання еталонного портрета у виробництві можна рекомендувати у таких випадках:

– при реалізації сталого РІ для великогабаритних деталей;

– для контролю геометричної точності виготовленої деталі за адитивними або екстрактивними технологіями за умови відсутності АЕ;

– за необхідності швидкого прототипування деталі задля ремонту АК.

Простота запропонованого методу полягає у тому, що можна виконувати попередні випробування і контроль еталонних портретів для деталей будь-яких розмірів шляхом використання їх пропорційного зменшення розмірів. Однак при контролі еталонного та портрета з надрукованого зразка слід враховувати отриманий номінальний розмір та квалітет точності виготовлення зразка, що достатньою мірою показано в роботі [182]. Останнє буде впливати на позитивність отриманих замірів та прийняття рішення щодо пропуску у виробництво деталі за еталонним портретом без додаткових етапів створення АЕ.

Недоліком використання методу прототипування стане неможливість створення конструкторсько-технологічної документації, для якої необхідно створення АЕ як першоджерела інформації. Однак, в свою чергу, еталонний портрет дасть можливість підвищити точність для створення АЕ, що впливатиме на точність виробництва оригінальної деталі. А за необхідності швидкого прототипування деталі

за адитивними або екстрактивними технологіями в межах допуску на розмір виготовленої деталі від ±0,6 мм і більше цей підхід стає незамінним. Тому подані результати можуть бути корисними при удосконаленні існуючих дійсних технологій виготовлення та прототипування опукло-вгнутих деталей АК у тому числі великогабаритних.

3.4 Ув'язування при прототипуванні складних деталей АК високої точності з роз'ємами та стиками на основі РІ

3.4.1 Аналіз існуючих результатів досліджень та формулювання проблеми

У багатьох наукових роботах результати вимірювань оброблених поверхонь використовуються для оцінювання їх якості та визначення параметрів допусків розмірів. Зокрема, у роботі [69] запропоновано підхід, що передбачає відновлення технології формування поверхонь за слідами механічної обробки з подальшим призначенням допусків на виготовлення заготовки методами РІ. Крім того, передбачається інтеграція цього підходу в систему зворотного проєктування з метою подальшої автоматизації процесу та отримання інформації про допуски розмірів. Водночас слід зазначити, що у такому випадку визначення допусків є доцільним лише для завершальних етапів оброблення, що не дозволяє відтворити повну історію формування деталі.

У роботі [70] для визначення допусків форми при РІ запропоновано використовувати чинні стандарти, зокрема ISO 14253-1:2017 [197]. Автори наводять апробовану практичну процедуру, що дозволяє здійснювати повне визначення розмірів і допусків для заготовок у процесі зворотного проєктування в промислових умовах відповідно до зазначеного стандарту. Водночас у роботі не розкрито процедуру визначення розмірів і допусків для деталей стиків, що потребує додаткових досліджень. Аналогічна проблема характерна і для деталей, виготовлених адитивними методами.

Разом із тим адитивні технології характеризуються суттєвими технічними та економічними перевагами порівняно з традиційними методами оброблення, та-

кими як фрезерування на верстатах з ЧПК, штампування та лиття. Водночас обмеження, зумовлені специфікою адитивних процесів, потребують поглибленого дослідження з метою забезпечення їх надійного практичного застосування. Особливу увагу слід приділити обмеженням щодо геометричних відхилень виробів, виготовлених адитивним способом. У зв'язку з цим актуальним є методичне обґрунтування та встановлення реалістичних допусків розмірів для адитивного виробництва.

Виробничий досвід і результати експериментальних досліджень свідчать, що відхилення розмірів зумовлені впливом комплексу факторів [71], зокрема геометричних (похибки налагодження обладнання, неточності друку за обраними режимами, температурні деформації тощо), а також просторового орієнтування і номінальних розмірів заготовки. Крім того, положення компонента у робочому просторі має значення для забезпечення геометричної точності процесів, зокрема лазерного спікання, однак суттєвої кореляції між цими чинниками не виявлено.

Отримані значення допусків дозволяють віднести адитивне виробництво, порівняно з традиційними технологічними процесами, до 11–16-го квалітетів точності за DIN EN ISO 286-1. Таким чином, досяжні допуски при адитивному виготовленні можна порівняти з процесами лиття, штампування, свердління та різання. Водночас для встановлення реалістичних допусків необхідним є проведення подальших експериментальних досліджень із варіюванням геометричних факторів, що враховують різні групи розмірів (габаритні, розміри поверхонь конструктивних елементів і геометричних тіл, які формують деталь), а також складність конструкції та властивості матеріалів.

Зокрема, усадка матеріалу як фактор процесу суттєво впливає на геометричну точність виробів. У зв'язку з цим доцільним є дослідження впливу технологічних параметрів і виробничих факторів з метою уточнення показників геометричної точності та розроблення заходів щодо мінімізації розмірних відхилень. Це, у свою чергу, дозволить зменшити значення квалітетів точності для адитивного виробництва. Разом із тим для ефективного застосування PI коректне призначення допусків ускладнюється відсутністю вихідної інформації про конструкцію та технологію виготовлення досліджуваних компонентів [90].

Метод [198] є розвитком підходів, викладених у роботах [69–71], і зосереджений на визначенні типів допусків, що широко застосовуються у загальному машинобудуванні та практично завжди використовуються у зворотному інжинірингу. Водночас даний метод характеризується високою складністю, оскільки орієнтований на реалізацію в середовищі 3D-CAD із застосуванням обчислювальних процедур, передбачає призначення орієнтовних допусків із повного спектра Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T), а також інтеграцію функціонально-орієнтованих моделей для оцінювання геометрії, отриманої за результатами PI досліджуваного виробу.

Забезпечення дотримання допусків на розміри готового виробу вимагає підвищення точності виготовлення при застосуванні адитивних технологій. Так, у роботі [199] для методу наплавлення (Fused Deposition Modeling (FDM)) було модифіковано поширений матеріал полілактид (Polylactic Acid (PLA)) шляхом армування вуглецевим волокном (PLA-CF). Результати аналізу механічних властивостей тонкостінних зразків показали, що зразки товщиною 1,0…1,8 мм мають значно вищу міцність на розтяг порівняно зі зразками товщиною 4 мм.

Слід враховувати, що PLA характеризується анізотропією, унаслідок чого його механічні властивості суттєво залежать від орієнтації друку та наявності армування, що надає матеріалу ортотропних властивостей. Використання армувальних волокон і компонентів дозволяє зменшити кількість і розміри порожнин та зазорів, що, з одного боку, призводить до збільшення маси, а з іншого – може сприяти підвищенню точності формоутворення деталей. Водночас відсутність результатів порівняльних досліджень обмежує можливість обґрунтованої оцінки ефективності такого підходу, що потребує подальшого вивчення.

Окрім властивостей матеріалу, на геометричну точність заготовок істотно впливають параметри друку. Зокрема встановлено, що параметр щільності заповнення визначає не лише витрату матеріалу, а й формування внутрішніх порожнин і зазорів, які можуть спричиняти деградацію матеріалу під час розтягування. Крім того, у зонах міжшарового з’єднання, орієнтованих уздовж напрямку максимальних тангенціальних напружень, виявлено мікротріщини, що також негативно

впливають на механічні характеристики матеріалу при навантаженні.

Найбільш ґрунтовно питання точності друку заготовок при PI досліджено у роботі [200], де основну увагу приділено матеріалам, обладнанню та параметрам процесу FDM. У роботі також визначено ключові фактори, що впливають на геометричну точність виготовлених заготовок, зокрема їх розміри, форму та взаємне розташування елементів. Метою дослідження було експериментальне встановлення допусків розмірів за використання стандартних параметрів процесу.

Для цього розроблено методичний підхід, що передбачає класифікацію геометричних елементів на три типи: некриволінійні (кубоїди), прості криволінійні (циліндри) та подвійні криволінійні (сфери), що дозволило системно дослідити розмірні відхилення. Встановлено, що номінальні розміри та орієнтація зразка суттєво впливають на величину відхилень. Класифікація отриманих значень допусків у системі IT відповідно до DIN EN ISO 286-1 показала, що процес FDM забезпечує точність у межах IT09–IT14, що є співставним із показниками процесів спікання, фрезерування, різання та свердління.

Отримані результати також свідчать про необхідність врахування положення зони допуску. Поєднання класів IT із положенням зони допуску дозволяє здійснити більш обґрунтовану класифікацію очікуваних відхилень. Водночас у роботі [200] не враховано вплив граничних виробничих умов, що може суттєво змінювати характер розмірних відхилень при варіюванні параметрів процесу та виробничих факторів. Це підкреслює необхідність застосування комплексного підходу до визначення геометричних відхилень в умовах адитивного виробництва.

Наступним етапом є варіювання специфікацій визначальних геометричних факторів з метою розширення методичної процедури та встановлення відхилень для різних типів геометричних форм. Послідовна зміна геометричних параметрів у поєднанні з експериментальними дослідженнями дозволяє системно визначати допуски розмірів, що потребує проведення натурної апробації для кожного окремого випадку та накопичення відповідної статистичної бази даних.

У роботі [201] також розглянуто проблему точності виготовлення виробів, зокрема оцінювання та кількісного визначення метрологічних характеристик процесу

лазерного порошкового плавлення металевих матеріалів. Дослідження виконано на спеціально розроблених артефактах, виготовлених із порошку AlSi10Mg із використанням системи EOS M280 (LPBF). Проведений аналіз дозволив кількісно оцінити внутрішньо- та міжмасштабні ефекти концентрації матеріалу, зняття залишкових напружень, поведінку відхилень у процесі друку та вилучення деталі, а також вплив мікродробеструминної обробки на 3D-профіль виробів. Отримані результати підтвердили наявність внутрішньомасштабних ефектів, які формують різні характеристики в межах однієї деталі, що, у свою чергу, впливає на величину відхилень для різних номінальних розмірів. Зокрема встановлено, що зі зменшенням концентрації матеріалу зменшується і рівень геометричних відхилень.

У роботі [202] досліджено точність формоутворення поверхонь із застосуванням моделей гібридних поверхонь, B-сплайнів та радіальних базисних функцій (RBF), а також інших адаптивних підходів, які дозволяють уточнювати геометричне представлення та підвищувати точність відтворення форми. Однак при використанні таких методів у задачах інженерної оптимізації (наприклад, оптимізації потоків) виникає проблема потрапляння алгоритмів у локальні мінімуми. Крім того, сітка контрольних точок B-сплайну адаптується до поточної геометрії шляхом значного згущення точок у зонах складних геометричних елементів, що ускладнює процес оптимізації. У межах інженерної оптимізації форми доцільним є застосування алгоритмів, здатних адаптивно додавати або видаляти контрольні точки залежно від необхідності введення чи виключення геометричних елементів. Таким чином, запропоновані параметричні моделі з фіксованим набором змінних форми потребують подальшого вдосконалення. Водночас перевагою підходів на основі RBF є можливість локального розміщення базисних функцій саме в тих зонах, де необхідна модифікація геометрії.

У більшості розглянутих публікацій основна увага приділяється забезпеченню точності форми деталей. Водночас для об’єктів високої точності, зокрема в авіабудуванні, визначальне значення має точність стиків, роз’ємів та інших з’єднувальних елементів. У роботах, присвячених PI, це питання або залишається поза увагою, або розглядається як другорядне. Як правило, дослідження зосереджені на

деталях простої геометрії або їх комбінаціях. Разом із тим значна кількість деталей має спеціальне функціональне призначення і забезпечує працездатність лише за умови високої точності окремих поверхонь або їх сукупності, що формують з'єднання. До таких елементів належать вузли кріплення, площини стиків і роз'ємів, системи отворів тощо. Зазначені елементи є складними для сканування, у зв'язку з чим у більшості досліджень основна увага приділяється відтворенню загальної форми.

Однак для ефективного застосування РІ саме ці елементи є критично важливими, оскільки вимоги до їх точності, як правило, на один – два квалітети перевищують точність суміжних поверхонь. Крім того, такі деталі взаємодіють з іншими елементами конструкції, що в умовах повного РІ передбачає створення прототипу з властивостями повної взаємозамінності. За відсутності доступу до суміжних деталей забезпечення такої взаємозамінності є складним завданням, яке у більшості публікацій або не формулюється, або розглядається поверхово. Прикладами подібних деталей є лопаті гелікоптерів, лопаті компресорів і двигунів, поверхні органів керування літальних апаратів, елементи оптичних приладів, озброєння тощо.

У ряді випадків для створення АЕ геометричні параметри визначаються за допомогою КВМ [203], які забезпечують вищу точність вимірювань порівняно зі сканерами [204]. Водночас у дослідженнях переважно аналізується точність отриманого прототипу залежно від обраного варіанта РІ, тоді як сам процес вибору такого варіанта висвітлюється недостатньо. У зв'язку з цим у даному розділі виконано дослідження, спрямоване на розроблення технології на основі звичайного РІ для високоточних деталей із роз'ємами та стиками з урахуванням обґрунтованого вибору варіанта прототипування.

3.4.2 Розрахунки похибки ув'язування при прототипуванні

Для аналізу процесів перенесення та відтворення розмірів деталі під час прототипування застосовано структурні схеми процесу, представлені у вигляді ланцюгів, що складаються з об'єктів, носіїв розмірів та зв'язків між ними, які відображають етапи перенесення розмірів від одного об'єкта до іншого [73, 205].

Технологічним розмірним ланцюгом у даному контексті визначається сукупність розмірів, що утворюють замкнений контур і безпосередньо беруть участь у формуванні остаточного розміру деталі або складальної одиниці [73]. Під час розрахунку очікуваної точності як елементи ланки технологічного розмірного ланцюга враховуються похибки передачі первинного розміру, який дорівнює номінальному за АЕ. Таким чином, технологічний розмірний ланцюг відображає зміну розміру на всіх етапах його перенесення як у процесі ТПВ, так і під час виготовлення деталі. Сукупність цих розмірів безпосередньо визначає точність геометричних параметрів готового виробу.

Повна похибка ув'язування при прототипуванні визначається як сукупність похибок усіх ланок у процесі перенесення розмірів, де під терміном «ув'язування» розуміється процес узгодження геометричних параметрів деталей, складальних одиниць та елементів технологічного оснащення, що забезпечує виготовлення окремих деталей або їх складання [74].

Запропонований підхід дозволяє застосовувати стандартну методику теорії розмірних ланцюгів для вирішення двох взаємопов'язаних завдань. Пряме завдання полягає у визначенні номінального розміру та похибки (допуску) всіх складових ланок за номінальним розміром і допуском замикальної ланки. Зворотне завдання передбачає, що за відомими номінальним розміром і допуском складових ланок визначаються номінальні розміри та похибка (допуск) замикальної ланки.

Для розрахунку розмірних ланцюгів використано імовірнісно-вірогідний метод, що дозволяє встановлювати допуск для кожного номінального розміру окремо. Відповідно, значення підсумкового поля розсіювання випадкової величини повної похибки процесу визначається формулою [74]:

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i-1}^{m-1} \xi_i^2 \, K_i^2 \, \delta_i^2}, \tag{3.1}$$

де K_{Σ}, K_i – коефіцієнти відносного розсіювання похибок замикальної та i-ї складових ланок полів розсіювання;

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

m–1 – кількість складових ланок;

ξ_i – передатне відношення i-ї ланки.

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

Підсумкове значення відхилення середини поля допуску похибки [74]:

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\Delta_{0i} + \alpha_i \frac{\delta_i}{2} \right) - \alpha_\Sigma \frac{\delta_\Sigma}{2}, \tag{3.2}$$

де α_Σ, α_i – коефіцієнти відносної асиметрії кривих розсіювання похибок замикальної та i-ї ланок розмірного ланцюга відповідно;

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

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

Коефіцієнти K_i знаходять за формулою [74]:

$$K_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{н.з.р.i}} = \frac{6\sigma_i}{\delta_i}, \quad 1 \le K_i \le \sqrt{3}, \tag{3.3}$$

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

Коефіцієнт усунення центру групування похибок від середини поля розсіювання похибок визначається за формулою [74]:

$$\alpha_i = \frac{M_{\Delta_i} - \Delta_i}{0{,}5\delta_i}, \quad -1 < \alpha_i < +1, \tag{3.4}$$

де $M_{\Delta i}$ – математичне сподівання (середнє арифметичне, центр групування) похибок i-ї ланки.

3.4.3 Вибір способів прототипування деталей та розрахунок похибок (допусків)

У дисертаційних дослідженнях питання вибору методів виготовлення при прототипуванні металевих деталей розглядалося з урахуванням забезпечення високої точності їх роз'ємів і стиків. Для цього проаналізовано традиційні технології: штампування, лиття, оброблення на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), а також передовий адитивний метод 3D-друку [134]. На рис. 3.13 представлено схему послідовності передачі інформації та формування розмірів і форми деталей для зазначених варіантів прототипування.

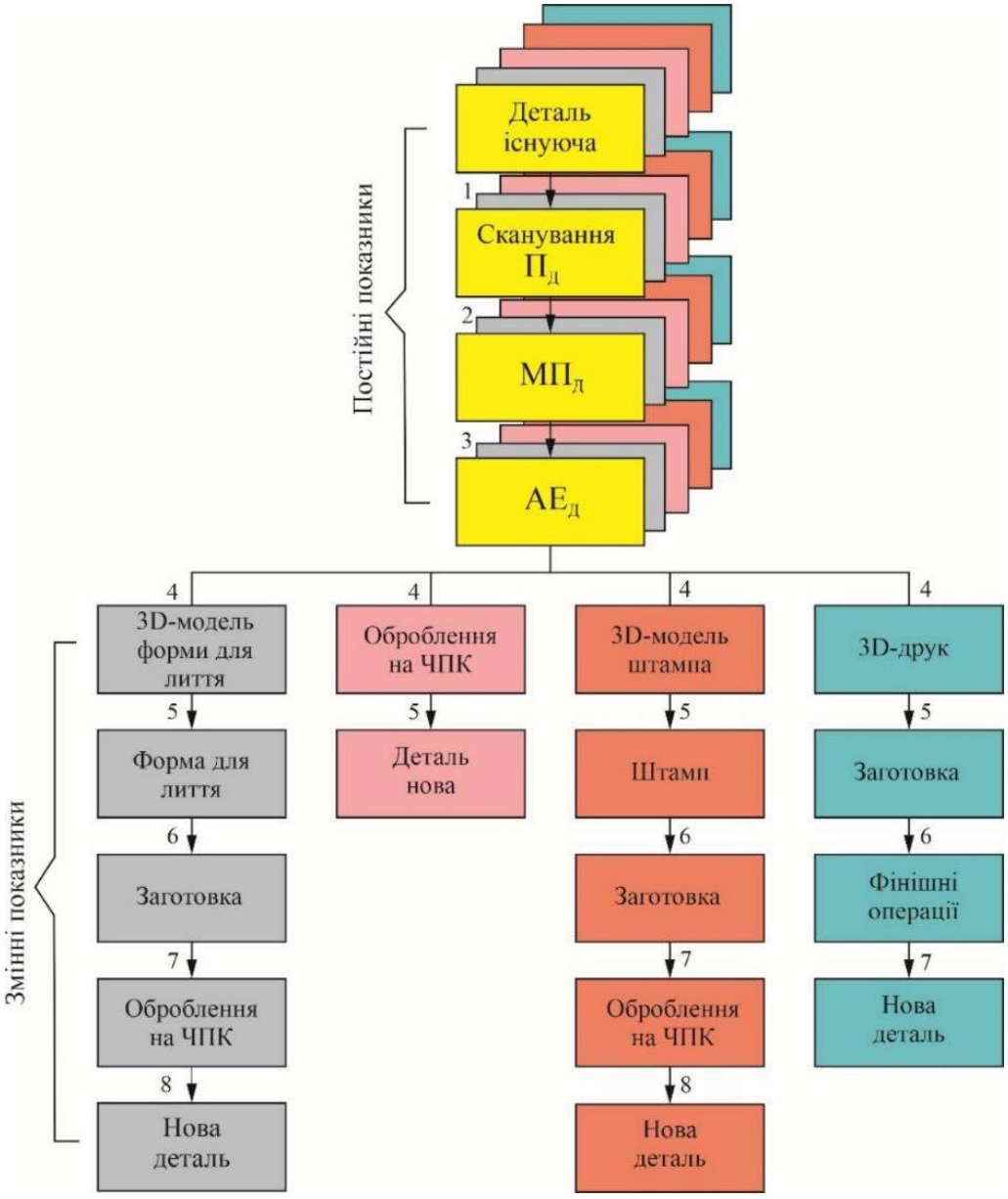


Рис. 3.13 – Схема варіантів прототипування металевих виробів при РІ

Дані про відхилення на етапах перенесення розмірів отримано з відкритих джерел, що наведені в огляді літератури, а також зі стандартів [85, 86]. Крім того, враховано експериментальні результати досліджень точності, отримані за допомогою технології селективного лазерного плавлення [206], а також сучасних методів 3D-сканування та адитивного виробництва [19].

Інспектування виготовлених деталей [170] має безпосередній вплив на якість виробів, тоді як розробка методів оцінювання точності та відхилень [87] дозволяє підвищити функціональні характеристики деталей, що є критично важливим для авіаційного та машинобудівного виробництва. Аналіз цих даних показує, що традиційні технології, такі як штампування та лиття, забезпечують високу відтворюваність розмірів на масовому виробництві, проте мають обмеження щодо складних геометрій та точності роз'ємів і стиків, особливо для деталей з високими вимогами до взаємозамінності. Оброблення на верстатах з ЧПК дає можливість досягти високої геометричної точності, проте трудомісткість та витрати часу на виготовлення прототипів суттєво зростають при збільшенні складності деталі. Адитивні технології, зокрема 3D-друк за методом селективного лазерного плавлення, дозволяють реалізувати складні опукло-вгнуті форми з високою точністю, скоротити час виготовлення прототипів та оптимізувати використання матеріалів. Проте дослідження показують, що геометрична точність виготовлених деталей залежить від параметрів друку, положення деталі у робочій камері та властивостей матеріалу, що потребує систематичного контролю та визначення допустимих відхилень [170, 87].

Інспектування отриманих деталей впливає на якість виробів, а розробка методів оцінювання точності та відхилень дозволяє підвищити функціональні характеристики прототипів. Аналіз порівняльних даних свідчить, що комбінація адитивного виготовлення з контролем геометрії за допомогою 3D-сканування та корекцією розмірних допусків дозволяє досягти результатів, порівнянних або навіть кращих за традиційні методи оброблення, особливо для складних опукло-вгнутих деталей, що є критично важливим у авіаційній та машинобудівній промисловості.

Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу від деталі-оригіналу для процесів точного лиття металів наведено у табл. 3.4.

Табл. 3.4 – Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу при литті в формі [134]

Складова ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_Σ	Δ_i	Δ_Σ	Відхилення $Д–Д_{прот}$
$Д–П_д$	+0,3 – 0,3	0,6	0,36		0,0		
$П_д – МП_д$	+0,1 – 0,1	0,2	0,04		0,0		
$МП_д – АЕ_д$	+0,1 – 0,1	0,2	0,04		0,0		
$АЕ_д – МЛ$	+0,2 – 0,2	0,4	0,16		0,0		
МЛ – форма	+0,2 – 0,0	0,2	0,04		+0,1		
Форма – Заго-товка	+ 0,0 – 0,2	0,2	0,04		–0,1		
Заготовка – ЧПК	+0,05 – 0,05	0,1	0,01		0,0		
$ЧПК – Д_{прот}$	+0,05 – 0,05	0,1	0,01		0,0		
∑			0,69	0,84	0,0	0,0	+0,42 –0,42

Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу від деталі-оригіналу для процесів металевого 3D-друку наведено у табл. 3.5.

Розрахунки показують, що для лиття прототип буде мати точність виготовлення, яка обумовлюється зміною розмірів порівняно з деталлю-оригіналом від –0,42 до +0,42 мм.

Табл. 3.4 – Результати розрахунків відхилення контурів деталі-прототипу для процесів металевого 3D-друку [134]

Складова ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_Σ	Δ_i	Δ_Σ	Відхилення $Д–Д_{прот}$
$Д – П_д$	+0,3 – 0,3	0,6	0,36		0,0		
$П_д – МП_д$	+0,1 – 0,1	0,2	0,04		0,0		
$МП_д – АЕ_д$	+0,1 – 0,1	0,2	0,04		0,0		
$АЕ_д – 3D_{принт}$	+0,02 – 0,02	0,04	0,16		0,0		
$3D_{принт}$ – Заготовка	+0,3 – 0,3	0,6	0,36		0,0		
Заготовка – ЧПК	+0,05 – 0,05	0,1	0,01		0,0		
$ЧПК – Д_{прот}$	+0,05 – 0,05	0,1	0,01		0,0		
∑			0,836	0,914	0,0	0,0	+0,457 –0,457

При цьому точність виготовлення, яка обумовлюється зміною розмірів при порівнянні досліджуваної деталі з деталлю-прототипом для РІ становить від –0,457 до +0,457 мм, що є більшим, ніж для деталей, виготовлених литтям.

Отримані результати ще раз підтверджують, що на нинішньому етапі розвитку металевих АК вони наближаються за суттю процесу до процесів точного лиття металів. В усякому разі для порівняння отримані розрахунки (див. табл. 3.3, 3.4)

підтверджують приблизний характер відхилень, пов’язаних з короблення м, стисненням поверхонь, усадками та присутністю залишкових напружень. Таке уявлення про процес РІ має велике значення при розрахунках допусків і припусків на фінішне оброблення.

3.4.4 Розробка пропозицій щодо збільшення точності прототипування деталей високої точності з роз’ємами та стиками

Аналіз точності отримання прототипів для стиків (див. табл. 3.3, 3.4) показує, що поточні результати є неприйнятними для виробів високоточної механіки, зокрема для органів керування літальних апаратів, де точність прототипування має бути суттєво вищою – у кілька разів. Для підвищення точності пропонується використання систем калібрів та контркалібрів, що вимагає адаптації існуючої виробничої системи авіаційного підприємства до умов адитивного виготовлення [207]. Це рішення доцільно представити у вигляді схеми ув’язування стиків об’єктів авіаційної техніки, що виготовляються за допомогою адитивних технологій (рис. 3.14), що дозволяє формалізувати контроль геометричної точності критичних елементів та інтегрувати його у виробничий процес.

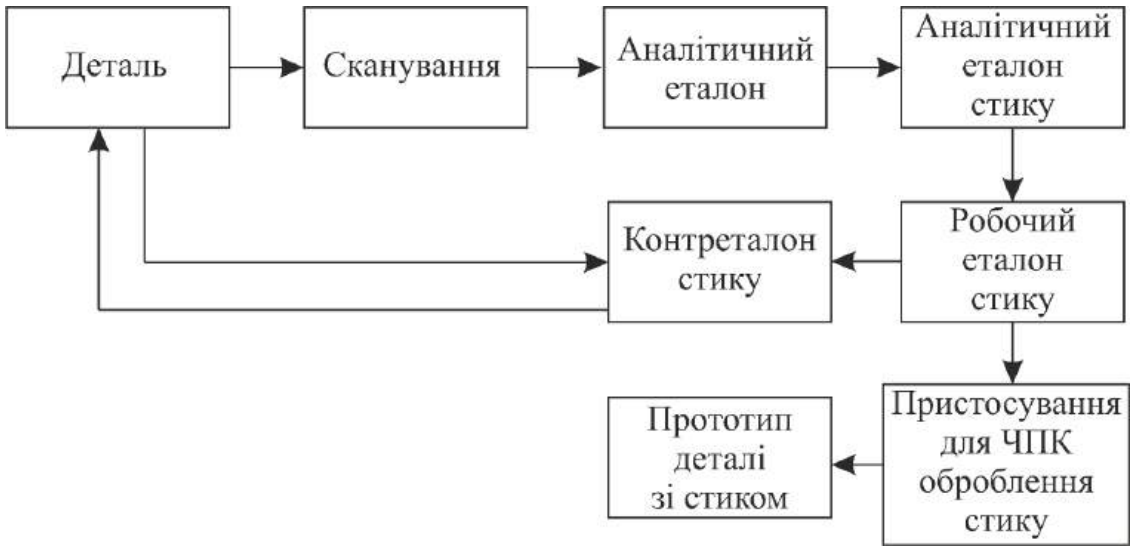


Рис. 3.14 – Схема ув’язування стиків деталей при прототипуванні, що виробляються методами адитивної технології [207]

Відповідно до представленої схеми (див. рис. 3.14), після проведення сканування та створення АЕ у її структурі або як окремий елемент формується АЕ стику, в якому передбачено можливість створення контреталона – частини, здатної забезпечувати точне стикування з досліджуваною деталлю.

Наступним етапом виготовляються фізичні елементи: робочий еталон стику та контреталон, точність стикування яких перевіряється відносно досліджуваної деталі.

У разі відповідності встановленим технічним умовам на стикування розробляються пристрої для оброблення стиків на верстатах з ЧПК або кондукторні пристрої для оброблення отворів при використанні плоских стиків з отворами. Кількість та конструкція таких пристроїв визначаються складністю геометрії стика та кількістю його просторових елементів, що забезпечує точність формоутворення та узгодження стиків у складі виробу.

Тоді за схемою ув’язування стиків об’єктів при прототипуванні (див. рис. 3.14) похибка ув’язування деталі та прототипу дорівнюватиме сумі похибок на етапах перенесення розмірів та узгоджень:

- деталь (*Д*) – контреталон (*КЕ*);
- контреталон – робочий еталон (*РЕ*);
- робочий еталон – пристрій (*ПР*) для оброблення стиків;
- пристрій для оброблення стиків – деталь-прототип ($Д_{прот}$).

Результати розрахунків похибок наведено у табл. 3.5.

Таким чином, похибки ув’язування стиків між досліджуваною деталлю та її прототипом при застосуванні запропонованої технології з використанням калібрів та контркалібрів складають від –0,121 до +0,121 мм, що у 3,78 раза менше порівняно з результатами, отриманими лише за допомогою сканування.

Отримані результати відхилень ув’язування відповідають технічним умовам більшості високоточних пристроїв, що застосовуються в органах керування авіаційної техніки.

Наступним етапом є випробування запропонованої теоретичної моделі та її експериментальна перевірка.

Табл. 3.5 – Результати розрахунків похибок при ув'язуванні стиків деталей при прототипуванні

Складова ланки технологічного розмірного ланцюга	Похибка, мм	δ_i	δ_i^2	δ_Σ	Δ_i	Δ_Σ	Відхилення $Д–Д_{прот}$
Д–КЕ	+0,02 – 0,02	0,04	0,0016		0,0		
КЕ – РЕ	+0,02 – 0,02	0,04	0,0016		0,0		
ПР – РЕ	+0,02 – 0,02	0,04	0,0016		0,0		
ПР – $Д_{прот}$	+0,05 – 0,05	0,1	0,01		0,0		
∑				0,0148	0,0	0,0	+0,121 –0,121

Останнє передбачає верифікацію методів РІ для створення прототипів деталей стиків АК, оцінювання отриманої точності перенесення геометрії, а також аналіз відхилень, що виникають на різних стадіях прототипування та виготовлення.

3.4.5 Розробка верстатного пристосування для забезпечення високої точності оброблення плоского стику з отворами

На рис. 3.15 показано способи з'єднання лопатей [207].

Для оброблення стиків наведених деталей (див. рис. 3.15) застосовувалися пристрої, виготовлені за методикою перенесення розмірів з робочого еталона стику та відповідного контреталону. Досягнення необхідної точності забезпечувалося шляхом використання методу компенсації похибок через видалення встановленого припуску, що дозволяє мінімізувати сумарні відхилення та гарантувати відповідність технічним вимогам на стикування.



а б

а – за допомогою плоского стику з отворами;

б – просторового стику типу «замок»

Рис. 3.15 – Способи з’єднання лопатей [207]

На рис. 3.16 наведено схему верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами деталі-прототипу.

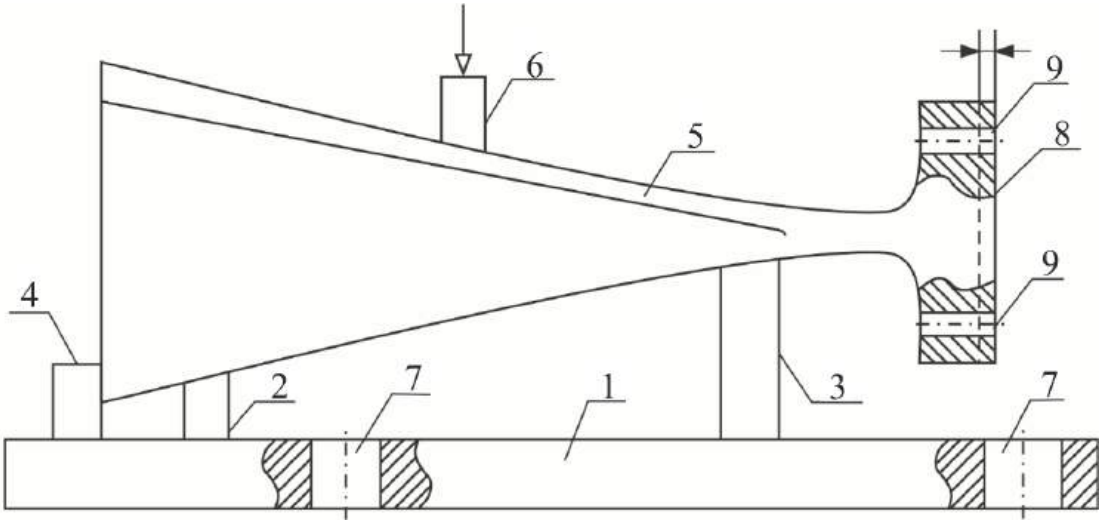


Рис. 3.16 – Схема верстатного пристосування для оброблення плоского стику з отворами лопаті-прототипу: 1 – основна плита; 2, 3 – ложементи; 4 – базовий упор; 5 – деталь; 6 – притискач; 7 – отвори на столі фрезерного верстата з ЧПК; 8 – припуск для видалення (схематично); 9 – отвори стику [207]

Верстатне пристосування (рис. 3.16) складається з наступних основних елементів. На основній плиті 1 розташовані базові ложементи 2 і 3 та базовий упор 4

для фіксації положення оброблюваної деталі 5. Фіксація деталі забезпечується притиском 6, що гарантує незмінність її положення під час операції. Пристосування закріплюється на столі фрезерного верстата з ЧПК за допомогою отворів 7.

Основною задачею фрезерної операції є оброблення стику у системі координат верстата шляхом видалення припуску 8.

В залежності від необхідного рівня точності, отвори стику 9 можуть виконуватися безпосередньо на верстаті з ЧПК або з використанням кондукторної плити (рис. 3.17).

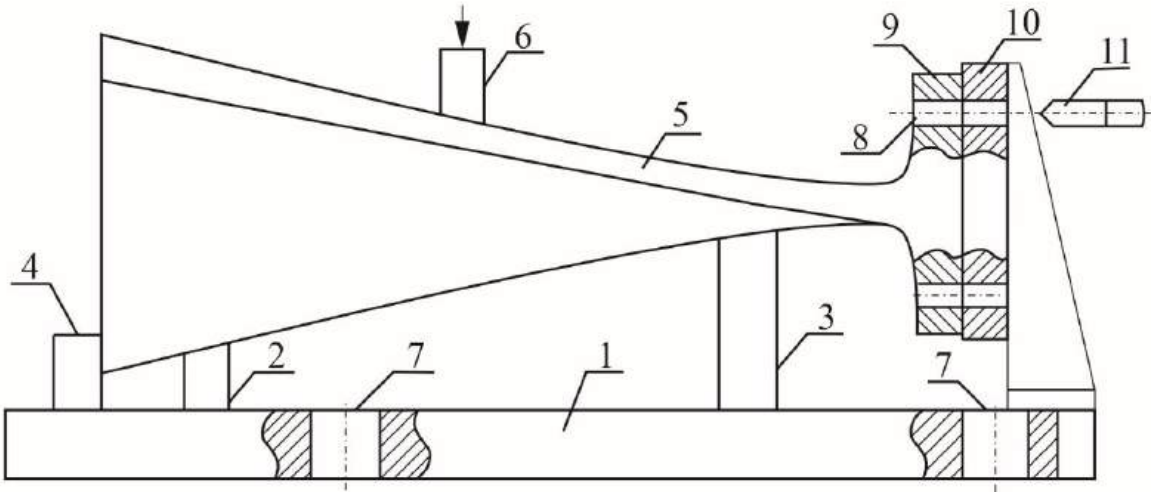


Рис. 3.17 – Схема верстатного пристосування для ув’язування отворів плоского стику з отворами лопаті-прототипу: 1 – основна плита; 2, 3 – ложементи; 4 – базовий упор; 5 – деталь; 6 – притискач; 7 – отвори на столі фрезерного верстату з ЧПК; 8 – припуск для видалення (схематично); 9 – отвори стику 10 – кондукторна плита; 11 – свердло [207]

Для точного перенесення розмірів використовувались процеси компенсації: перенесення за допомогою твердіючих сумішей та компенсаційних припусків.

Запропонова система (див. рис. 3.16 і 3.17) перевірена практично на виробах лопатей турбін з різними стиковими вузлами і показала позитивні результати за точністю, що задовільняли поле допуску на номінальний розмір.

3.4.6 Перспективи використання підходу до ув'язування при прототипуванні складних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі PI

Розглянемо практичну реалізацію запропонованого підходу прототипування на прикладі складної авіаційної деталі – гіпотетичного кронштейна, який характеризується високою точністю роз'ємів та стиків. Деталі подібного типу широко застосовуються у авіаційній техніці та відзначаються складною геометрією, що включає отвори, роз'єми, площини стиків та інші функціональні елементи. Процес створення прототипу реалізовуватиметься через послідовне виконання таких етапів:

1. Сканування та створення АЕ. Для високоточого відтворення геометрії досліджуваної деталі використовуватиметься КВМ, що забезпечить точне вимірювання поверхонь та стиків. На основі отриманих даних буде побудовано АЕ і 3D-модель.

2. Порівняння методів виготовлення: традиційного лиття та адитивного виробництва (3D-друк). Для лиття використовуватимемо традиційний підхід до виготовлення форм, тоді як 3D-друк можна виконати з металевого порошку AlSi10Mg на установці EOS M280 LPBF. Використання AlSi10Mg у цьому випадку дає змогу продемонструвати переваги адитивного виробництва при виготовленні авіаційних деталей з високими вимогами до точності, міцності та довговічності. Зазначимо, що установка EOS M280 оптимізована для роботи з матеріалом AlSi10Mg, що і забезпечить стабільність процесу.

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

4. Оптимізація точності стиків. Для зменшення похибок у з'єднувальних елементах слід розробити комплект калібрів та контркалібрів, що дозволить забезпечити точність стиків у межах від –0,121 до +0,121 мм.

5. Контроль та перевірка прототипів. Отримані прототипи підлягають кон-

тролю за допомогою КВМ. Використання системи калібрів дозволяє значно зменшити розмірні відхилення стиків порівняно з початковим станом та підвищити точність виготовлення прототипів для авіаційної техніки.

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

Впровадження запропонованої системи калібрів та контркалібрів потребує значних ресурсів, зокрема часу на виготовлення калібрів та підготовку виробничих потужностей. У цьому контексті виникає питання економічної доцільності використання такого підходу для серійного виробництва. Для обмежених партій або унікальних компонентів застосування системи калібрів є обґрунтованим, тоді як для масового виробництва доцільніше розглядати альтернативні методи забезпечення точності.

Крім того, запропонований метод має обмеження, пов’язані з відхиленнями, що виникають через залишкові напруження під час адитивного виготовлення. Цей фактор потребує подальшого дослідження, зокрема шляхом варіювання параметрів процесу друку: температурного режиму, швидкості побудови та щільності заповнення.

Отримані результати підкреслюють потенціал адитивного виробництва як технології, що наближається до точності лиття, проте потребує додаткового удосконалення. Інтеграція запропонованих рішень із сучасними 3D-CAD-системами здатна забезпечити автоматизацію призначення допусків, що стане важливим кроком для широкого впровадження даної методики в авіаційному машинобудуванні.

3.5 Висновки за розділом

1. Доведено, що використання методів сталого і звичайного РІ дає змогу в першому випадку швидко виготовити деталь за 3D-друком або фрезеруванням на станках з ЧПК, а в другому – створити її АЕ. Існування АЕ дасть змогу використати дані для виробництва деталі за будь-якою вибраною технологією. Зазначено, що саме на базі сталого РІ реалізовується швидке виробництво (за умови обмеженого часу) деталі за адитивними (або екстрактивними) технологіями за умови відсутності жорстких вимог щодо точності на виготовлену деталь. У свою чергу це зекономить і час і вартість робіт виробництва в цілому.

2. Зазначено, що за необхідності прототипувати або відремонтувати деталь АК за відсутності будь-якої документації на неї, тобто за відсутності даних із квалітету допуску розміру, має бути визначено значення допуску на номінальний розмір на основі конструктивно-технологічного аналізу досліджуваної деталі. У свою чергу останнє дасть змогу виготовляти пробні зразки досліджуваних деталей АК при необхідності за зменшеними розмірами, наприклад у масштабі 1:4, що напряму зменшить трудомісткість робіт, час і вартість на апробацію отриманих даних портрета.

3. Запропоновано новий метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої точності їх виготовлення. Наведено прийоми доопрацювання отриманого портрета протитипу до еталонного і прийнятого як першоджерело інформації. Останнє дало змогу збільшити точність геометрії портрета (файлу формату «*.STL»), що у свою чергу впливає на точність АЕ за потреби його створення. Метод реалізовано на прикладі великогабаритної опукло-вгнутої деталі – лопаті.

4. Отримані результати з дослідження методу на зменшених пропорційно розмірах еталонного портрета досліджуваної лопаті надали підтвердження адекватності її теоретичних засад. Це рішення дає можливість виробникам використовувати саме еталонний портрет за необхідності швидкого (в умовах обмеженого часу) прототипування деталі при модернізації та/або ремонті АК. У цьому випадку технологічний ланцюжок виробництва суттєво скорочується на етапи створення АЕ,

що здешевлює вартість виробу.

5. Запропоновано та експериментально підтверджено ефективність використання РІ для підвищення точності ув'язування стиків компонентів, виготовлених методами адитивного виробництва, шляхом застосування системи калібрів і контркалібрів та комплекту пристосувань для оброблення стиків, створених методом перенесення розмірів із калібрів та контркалібрів. Використання цієї системи забезпечує точність ув'язування в межах від –0,121 до +0,121 мм, що в 3,78 раза перевищує точність при застосуванні лише сканування, і відповідає вимогам технічних умов більшості високоточних пристроїв, що використовуються в органах керування авіаційної техніки.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [5, 15, 18, 32, 33, 34, 36].

РОЗДІЛ 4
ОСОБЛИВОСТІ ПРОТОТИПУВАННЯ ВІДСІКІВ ТА АГРЕГАТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ СКЛАДАЛЬНО-МОНТАЖНИХ РОБОТАХ

4.1 Застосування методу безплазового ув’язування форм та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів для зниження трудомісткості та циклу монтажних робіт

Конструкторська документація є основним документом, в якому ставляться вимоги до геометрії виробів. А відповідність геометрії справжнього виробу до вимог документації є найважливішим критерієм якості авіаційної продукції. Геометрію складних за формою конструкцій, на відміну від простих деталей або збірок, виміряти традиційними контактними механічними інструментами та вимірювальними приладами не завжди є можливим. Оскільки у виробах авіаційної техніки великий відсоток становлять складні збірки, проблема контролю їх геометрії породжує певні труднощі.

У загальному машинобудуванні форма більшості деталей машин описується комбінаціями геометричних тіл, обмежених простими поверхнями – плоскими, циліндричними, конічними, сферичними тощо. У літакобудуванні обводи більшості деталей мають складні аеродинамічні форми, що є однією із основних відмінностей цього виду машинобудування.

Відомі на сьогодні, широко застосовувані контактні та оптичні засоби контролю у зв'язку зі стрімким науково-технічним прогресом не відповідають сучасним вимогам і тому з їх допомогою неможливо досягти необхідних вимог якості сучасних АК.

При використанні контактних засобів контролю зовнішні контури агрегатів задаються у вигляді теоретичних таблиць абсцис і ординат, відкоригованих при накресленні зовнішніх обводів на плазі.

У табл. 4.1 наведено параметрів, засоби і похибки контролю виробів АК, що при цьому досягаються [208, 209].

Табл. 4.1 – Параметри агрегатів, що підлягають контролю, та засоби їх контролю

Параметри, що контролюються	Засоби контролю	Похибка методу контролю, мм
Відхилення ординат контуру дійсного перерізу агрегату	Вимірювальний стенд, виготовлений за монтажним еталоном агрегату, щуп індикаторний	± 0,5
	Вимірювальний стенд, виготовлений в інструментальному стенді, індикаторний щуп	± 1,5…2
	Накидні еквідистантні шаблони. Щуп клиновий. Мірні пластинки	± 2,5
	Нівелір НА-3 або НА-1 та пересувна рейка	± 0,4
	Прилад ПСК-2 для контролю криволінійних поверхонь	± 0,4
Місцеві дефекти: а) сходинки та зазори на стиках обшивки; б) виступання та западання потайних головок кріплення	Індикаторний прилад	± 0,3
	Пластинчастий щуп	± 0,5

У літакобудуванні, на відміну від загального машинобудування, складання та монтаж агрегатів виконують у спеціалізованому оснащенні (стапелях) [210, 211, 212].

Точність та взаємозамінність складального оснащення відіграє важливу роль у виробництві авіаційної техніки. Найбільш відповідальними деталями оснащення є елементи базування (рубильники, ложементи, стикувальні плити, фіксатори). Від

точності їх виготовлення та встановлення в каркасі оснащення залежить, в кінцевому підсумку, точність складання та монтажу виробу, який збирається. Монтаж елементів базування залежить від вибраного методу складання оснащення і тому він вносить найбільшу складову в сумарну похибку. У реальних умовах літакобудівного виробництва вважається, що найбільшою складністю є етап установлення елементів базування у задане положення за умови, що допустима похибка базових точок лежить в межах 0,1...0,3 мм [211, 212].

Методи традиційного монтажу пристосувань базуються на передачі геометричних розмірів базовим елементам за допомогою жорстких носіїв форм та розмірів (шаблони, еталони, макети, координатні інструментальні стенди тощо).

Монтаж складального пристосування є найбільш відповідальним етапом виготовлення оснащення, під час якого складають окремі деталі і вузли пристосування відповідно до заданих кресленником розмірів. Процес монтажу супроводжується ув'язуванням технологічного оснащення та забезпеченням необхідної точності складання.

Складальні пристосування піддаються контролю як під час виготовлення, так і експлуатації. Метод контролю, у свою чергу, залежить від прийнятого методу монтажу складального пристосування. Дотепер у процесі ТПВ, залежно від типу, габаритів виробу та серійності випуску, вибирався один із залежних методів складання та ув'язування розмірів.

Найбільш відомими є: програмно-інструментальний; програмно-шаблонний; програмно-макетний. Перелічені методи відрізняються один від одного різноманітністю і кількістю необхідного технологічного та контрольного жорсткого оснащення, що передає відповідно до технологічного процесу задану точність форм і розмірів агрегату, що складається. У зв'язку з цим перелічені методи називаються пов'язаними (залежними) методами виготовлення агрегатів.

У реальних умовах зазвичай, при виробництві виробів одночасно використовуються кілька методів ув'язування розмірів [79, 212, 213].

Перелічені методи характеризуються тривалістю циклу складання, великою матеріаломісткістю, значними витратами і, як наслідок, невисокою точністю.

Аналіз параметрів і характеристик контактних засобів та методів контролю, наведених у табл. 4.1 і 4.2, указують на те, що традиційними методами неможливо досягти необхідної точності та якості деталей для сучасної авіаційної техніки [79, 214, 215].

Табл. 4.2 – Показники точності (допустимі відхилення) при монтажі складального оснащення за різними методами

Використовуваний метод	Значення, мм	
Монтаж пристосувань за шаблонами пристосувань	Допуск на встановлення шаблона	± 2,0
Монтаж пристосувань за допомогою монтажних еталонів	Точність приварювання стакана до балок	± 2,0
Монтаж пристосувань за допомогою плаз-кондуктора	Допуск на крок втулок для ув'язування осей кріпильних отворів фіксувальних елементів	± 0,2
Монтаж пристосувань за допомогою інструментального стенду	Допуск на крок втулок для монтажу фіксаторів	± 0,2

З розвитком апарату математичного моделювання об'єктів та процесів виробництва, а також використання засобів електронно-обчислювальної техніки та обладнання з ЧПК з'явилася можливість незалежного виготовлення деталей із заданою точністю достатньою для забезпечення взаємозамінності.

Метод, в якому реалізується цей процес складання, називають координатно-цифровим (координатно-аналітичним) КЦМ.

Подальший розвиток КЦМ з використанням лазерного оптичного обладнання став основою для розроблення незалежного методу утворення форм і розмірів елементів конструкцій, що сполучаються, і отримав назву «метод безплазового ув'язування (МБУ)» [213, 214].

На рис. 4.1 подано блок-схему залежних методів складання та ув'язування розмірів агрегату [215]. Отже, основою стає існування повної інформації агрегату,

якою у цьому випадку є креслення, а потім – електронна модель (рис. 4.1). Наступним стає передача цієї інформації на інші носії: теоретичний і конструктивний плази, шаблон, еталони поверхні і агрегату, контреталон і монтажний еталон агретату та ін.

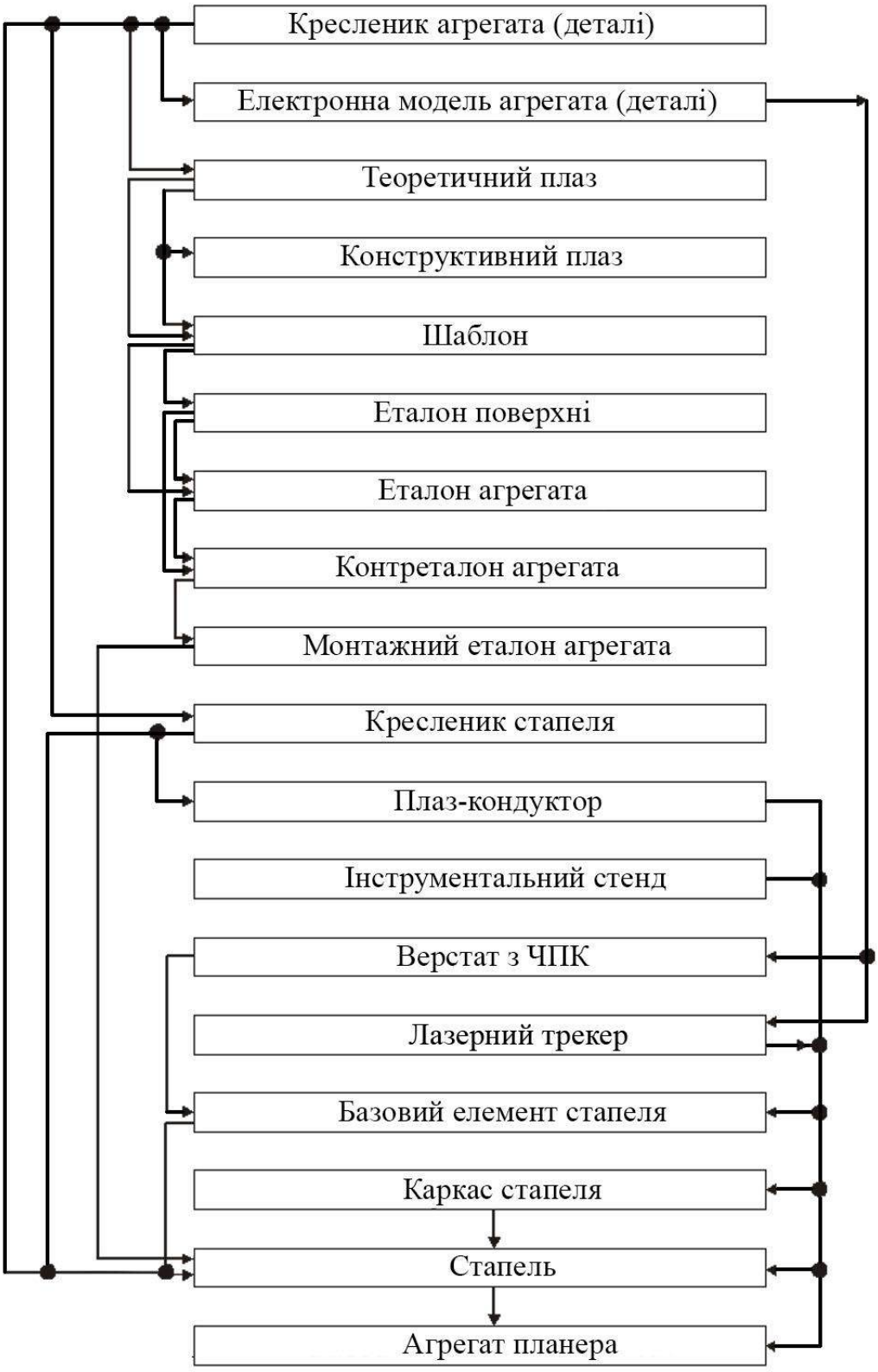


Рис. 4.1 – Блок-схема методу залежного складання та ув'язування розмірів

У блок-схемі методу залежного складання та ув’язування розмірів для агрегату планера особливу роль відіграє лазерний трекер, який з високою точністю дасть змогу запозионувати у просторі за обраною системою координат як складальні елементи агрегату, так і стапеля.

4.1.1 Метод безплазового ув’язування

Розглянемо застосування методу безплазового ув'язування форм та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів для зниження трудомісткості та циклу монтажних робіт. Використання у виробництві сучасних CAD/CAM/CAE-систем, спільно з лазерними вимірювальними системами, дало змогу розробити новий метод монтажу та забезпечення розмірів. Цей метод базується на використанні як першоджерела геометричної інформації – тривимірну модель із застосуванням програмного аналітичного моделювання. Деякі виробники математичну модель – АЕ називають конструкторською електронною моделлю (КЕМ) або майстер-моделлю (ММ). В основі принципу ММ (АЕ) лежить використання тривимірного електронного макета деталі, що пройшов ув'язування в оточенні збірки, як єдиного носія геометрії та технології конструкції для всіх подальших розробок спеціального технологічного оснащення одночасно (шаблонів, пристосувань, штампів, робочих болванок, прес-форм, складальних пристосувань тощо).

У подальшому електронна модель дала можливість паралельно виконувати роботи всім учасникам підготовки виробництва виробу.

Середньостатистичний цикл постановки на виробництво літака на основі традиційних методів, з урахуванням складання та льотних випробувань, до процесу серійного виробництва становить 5–6 років. Сучасні методи виробництва, що дають змогу паралельно виконувати роботи усіма службами літакобудівної галузі, скорочують цикл підготовки в 2...3 рази порівняно з традиційними [215].

При незалежному методі виготовлення деталей із заданою точністю, достатньою для забезпечення взаємозамінності, потреба в жорстких засобах ув'язування заготовельного та складального оснащення відпадає. Замість них

використовуються координатографи, обладнання з ЧПК, лазерні, оптичні засоби монтажу та контролю (наприклад лазерний трекер) та за необхідності плаз-кондуктор та інструментальний стенд [216, 217, 218]. На рис. 4.2 подано блок-схему незалежного методу складання та ув'язування розмірів з використанням лазерної оптичної системи [215].

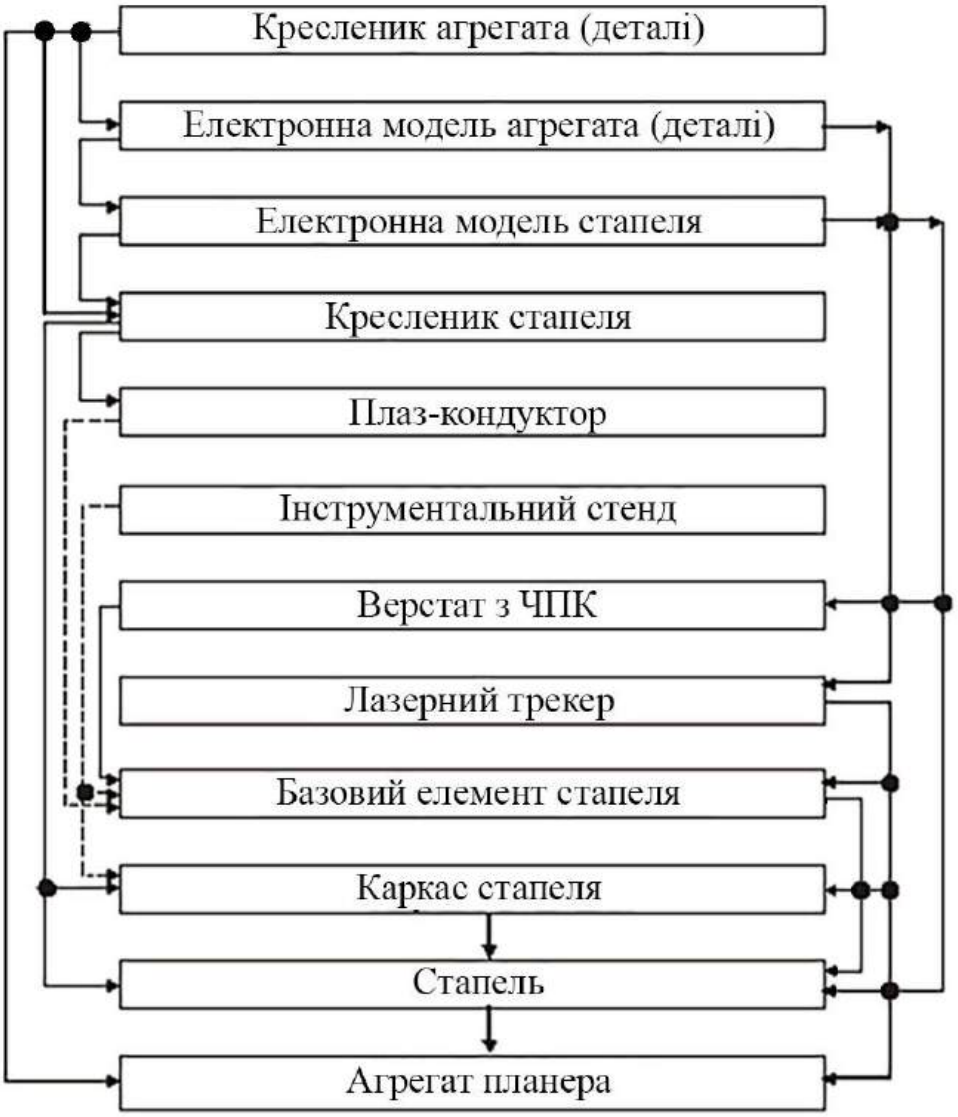


Рис. 4.2 – Блок-схема методу безплазового (незалежного) складання та ув'язування

Розроблений метод ув'язування розмірів та форми виробів успішно використовується на акціонерному товаристві «Антонов» при створенні та серійному виробництві літаків Ан-158, Ан-178, Ан-132. Цей метод охоплює всі етапи: проєктування, технологічну підготовку та виробництво виробів.

Лазерні засоби вимірювання геометричних параметрів (ЛВГП) можуть

функціонувати на різних принципах, що реалізують ті чи інші властивості лазерного випромінювання, зумовлені його когерентністю [218]. Ці системи мають високу точність і продуктивність у поєднанні з безконтактним способом вимірювання і цифровою формою подання результатів. Перевагою ЛВГП є компактність, їх легко можна наблизити до об'єкта, що вимірюється, розмістити в цеху, на відміну від, наприклад, КВМ, дія яких передбачає розміщення вимірюваного об'єкта на їх столі. На етапі проєктування технологічного оснащення при використанні методу безплазового ув’язування необхідно щоб аеродинамічні поверхні агрегатів задавалися типовими аналітичними методами. У підготовці виробництва метод безплазового ув'язування з використанням лазерного трекера дає змогу досягти:

– відхилення розмірів та розташування поверхонь при монтажі стапельного оснащення – від 0,1 до 0,2 мм;

– відхилення розмірів при утворенні базових отворів у деталях каркасу – до 0,1 мм;

– відхилення форми обводоутворювальних поверхонь – від 0,1 до 0,5 мм;

– скорочення потреби у виготовленні шаблонів та інших жорстких носіїв розмірів – до 30 %;

– зниження вартості виготовлення стапельного обладнання.

Принцип роботи лазерного трекера полягає у вимірі двох кутів α, β та відстані d (рис. 4.3).

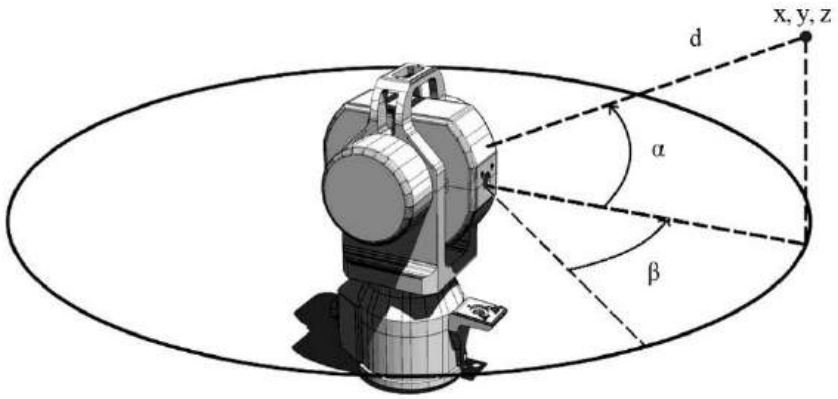


Рис. 4.3 – Принцип визначення координат за допомогою лазерного трекера

Нині в аерокосмічній галузі успішно використовуються лазерні

комп'ютеризовані системи типу FARO LaserTracker, що мають робочу зону вимірювань в лінійній мірі до 100 м, а в кутовій – до 270 градусів за азимутом і не менше ± 50 градусів за кутом місця. Похибки вимірювання відстаней на дистанціях близько 1 м становлять до 10 мкм, а похибка кутових вимірів не перевищує 10 хвилин.

Однією з особливостей трекера є автоматичне керування кутовими координатами променя, що випускається. Для цього трекер посилає лазерний промінь до світлоповертаючого відбивача (репер), який торкається поверхні об'єкта, що вимірюється. Частина відбитого репером світла надходить у вимірювач відстаней, який обчислює відстань від трекера до рефлектора. Вимірювач відстаней може бути двох типів: інтерферометр (laser interferometers, IFM) або вимірювач абсолютних відстаней (absolute distance meter, ADM).

Лазерний трекер містить два датчики кута повороту головки (енкодера). Ці пристрої вимірюють кутову орієнтацію двох механічних осей трекера: осі азимуту та осі висоти. Кутів, отриманих від енкодерів, та відстані від вимірювача відстаней достатньо для точного визначення положення центру ретрорефлектора. Трекери дають змогу з високою точністю вимірювати геометричні примітиви (точки, кола, площини, конуси, циліндри тощо), відстань та кути між ними, відхилення форми та взаємного розташування. Також можна контролювати складні криволінійні поверхні методом порівняння з CAD-моделлю. Правильне позиціонування можна проводити за відомими координатами або лінійно-кутовими розмірами. Істотно скоротити час можна, використовуючи метод порівняння з CAD-моделлю конструкції. Це скорочує час на переналагодження та запуск у виробництво нового виробу. Сучасні тенденції у застосуванні класичних інтерферометричних схем полягають у фіксації інтерферограм матричними фотоприймачами з наступним уведенням просторових розподілів інтенсивності в комп’ютері та автоматизованою обробкою зафіксованих цифрових зображень. Використання універсальних лазерних оптичних вимірювальних систем типу Laser Tracker дає змогу вирішувати різноманітні завдання контролю об'єктів виробництва як при створенні, так і подальшому обслуговуванні серійного виробництва.

До таких об'єктів належать на етапі технологічної підготовки виробництва контроль виготовлення шаблонів, еталонів, макетів, обтяжних пуансонів, болванок, форм-блоків, рубильників (рис. 4.4), болванок для викладки (рис. 4.5), штампів, стапелів (рис. 4.6 і 4.7) та пристосувань [215].

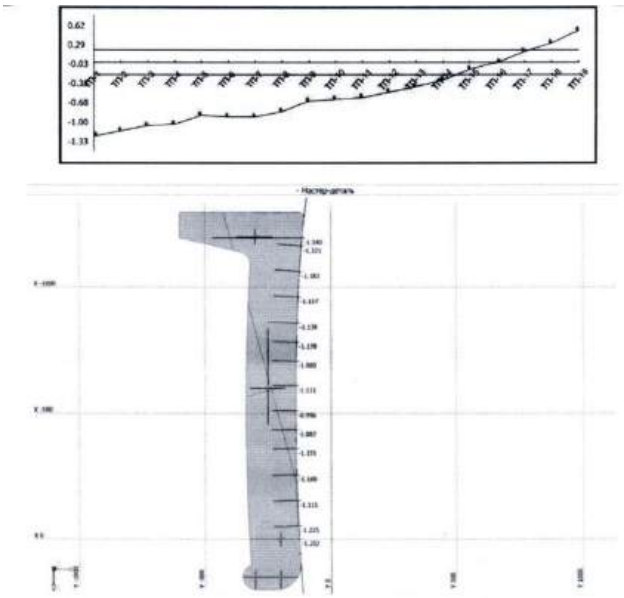


Рис. 4.4 – Результат контролю обводоутворювального елемента (рубильника) стапеля складання крила лазерним трекером

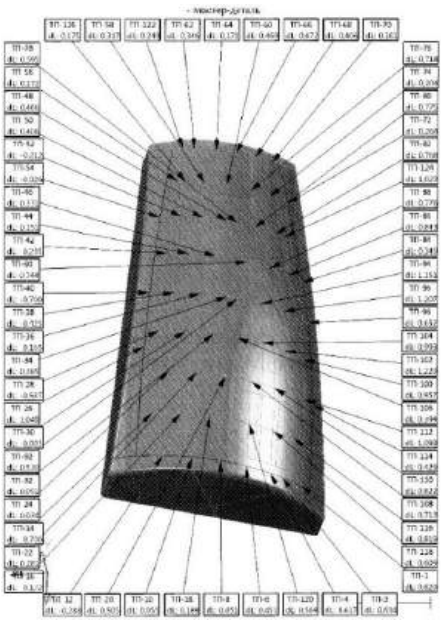


Рис. 4.5 – Модель болванки для викладки з індикацією відхилень від теоретичного профілю в характерних точках, виміряних лазерною оптичною системою

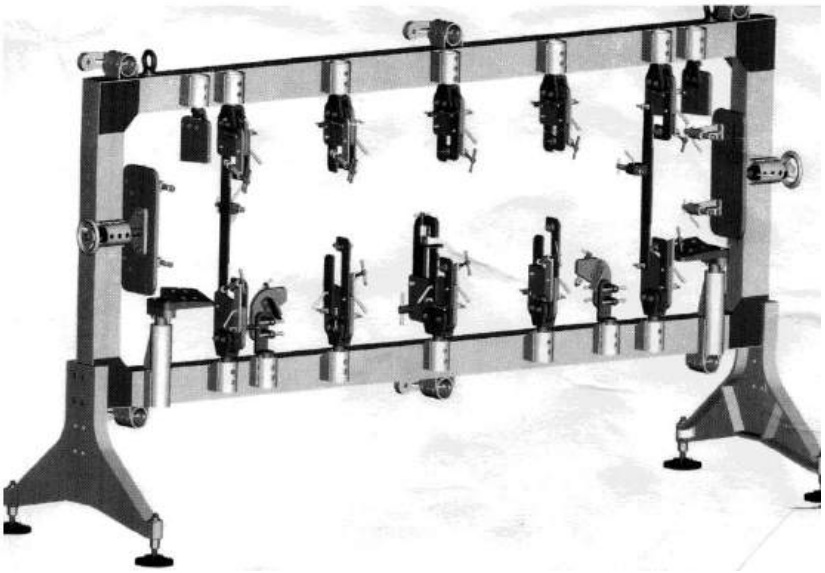


Рис. 4.6 – Загальний вигляд стапеля складання першого лонжерона (Конструкторська електронна модель)

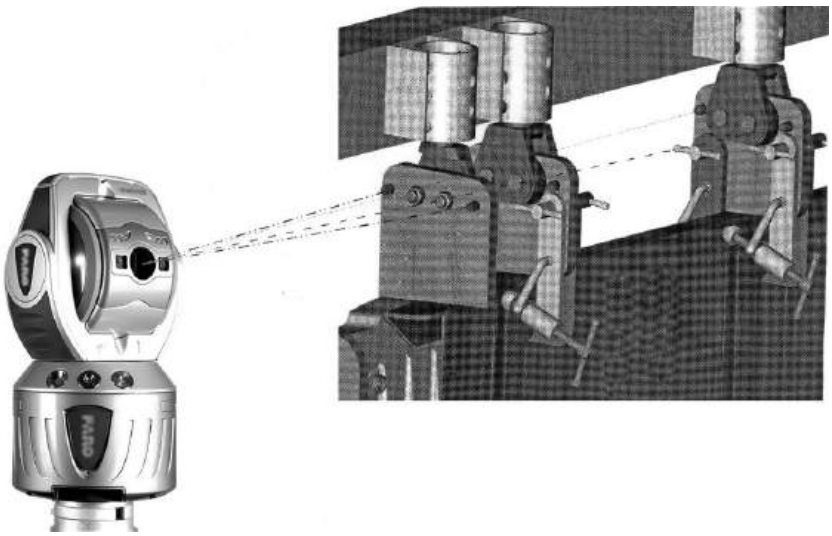


Рис. 4.7 – Установлення та контроль стапельних елементів за допомогою лазерної оптичної вимірювальної системи

На етапі виробництва виконується контроль виготовлення деталей, вузлів, агрегатів, монтаж та нівелювання літака.

4.1.2 Дослідження точності геометричних параметрів консольної частини крила та технологічного оснащення на різних етапах виробництва

Нижче наведено приклад ефективного використання КВМ Laser Traker при виготовленні консольної частини крила (КЧК) виробу АН на всіх етапах його складання та контролю точності геометричних параметрів порівняно з теоретичною майстер-геометрією, тобто з АЕ. Мета досліджень при нівелюванні: перевірка обводоутворювальних характеристик стапеля та очікуваних фактичних параметрів після складання в ньому агрегату.

При використанні традиційного методу нівелювання літака застосовувалися: нівелір класу точності 3, нівелювальна лінійка, рулетка та будівельний висок [217, 218, 219]. Середня похибка при знятті розмірів з нівелювального інструменту становила 0,5 мм. Похибка встановлення нівелювальної лінійки становила від 0,5 до 1 мм. Загалом похибка вимірювання незалежного параметра однієї нівелювальної точки досягала 1,5 мм. Перевищення двох вимірюваних одна відносно одної точок могло досягати до 3 мм, тоді як відповідно до паспорта і кресленика нівелювання допуск на перевищення реперних точок зазвичай

становить 1 мм. Реперні точки на кілі, розташовані на поверхнях, близьких до вертикальної, практично виміряти неможливо, оскільки нівелір вимірює лише перевищення відносно горизонтальної площини.

Досвід нівелювань та експлуатації літаків Ан-148, Ан-158 показав, що зміна геометричних параметрів сучасних літаків у діапазоні похибок, визначених за допомогою традиційного методу нівелювання, впливає на льотні характеристики виробу. Обсяг інформації, отриманої при контролі геометричних параметрів літака за допомогою нівеліра, недостатній для проведення аналізу фактичних тривимірних вимірювань.

На сучасному етапі виробництва виробів АН подібна система контролю реалізується за допомогою оптичного обладнання типу КВМ FARO Laser Tracker Vantage. Цей метод контролю реальної форми поверхні великогабаритних виробів складної форми є координатно-визначальною технологією контролю, що дає змогу обчислити необхідні геометричні параметри літака, що обмірюється (рис. 4.8).



а б

а – контроль геометрії; б – нівелювання літака

Рис. 4.8 – Система контролю оптичним обладнанням типу КВМ FARO Laser Tracker Vantage

Процес виробничих досліджень геометричних параметрів КЧК проводився за таким принципом:

– фактичний масив виміряних точок зіставлявся з теоретичною поверхнею крила (майстер-геометрією);

– контроль встановлення перерізів КЧК у площині нервюр та кутів встановлення вихідних профілів (ВП) крила, проводився по центрах стикувальних отворів (у системі координат X та Y).

Для визначення кутів установлення перерізів використовували точки, що лежать на поверхні КЧК в зоні перетину лонжеронів з нервюрами.

За результатами виробничих досліджень розраховували різницю кутів встановлення теоретичного перерізу (майстер-геометрії) від фактично виміряного (виготовленого). При цьому як основа бралася єдина умовна теоретична хорда перерізу кесона КЧК. Як умовна теоретична хорда брався відрізок, що з'єднує середні точки висот перерізів у площині першого і другого лонжеронів.

Абсолютна величина різниці кута відхилення (Δ, хв) фактичної хорди перерізу кесона КЧК від теоретичної хорди і є відхиленням кута встановлення (рис. 4.9).



Рис. 4.9 – Схема визначення різниці кутів встановлення теоретичного та фактичного перерізів кесона КЧК

За аналогічною схемою визначалися кути встановлення рубильників стапеля та розташування вихідних перерізів КЧК.

4.1.3 Результати дослідження точності геометричних параметрів консольної частини крила

У зв'язку з довготривалістю процесу виготовлення консольної частини крила контрольні дослідження геометричних параметрів здійснювалися протягом трьох етапів. На першому етапі проводився контроль (сканування за допомогою

лазерного трекера) стапеля складання КЧК, розрахованих фактичних кутів установлення рубильників та кути встановлення вихідних профілів (ВП) крила, які цей стапель здатний забезпечити. Результати розрахунків подано на рис. 4.10, 4.11 [215].

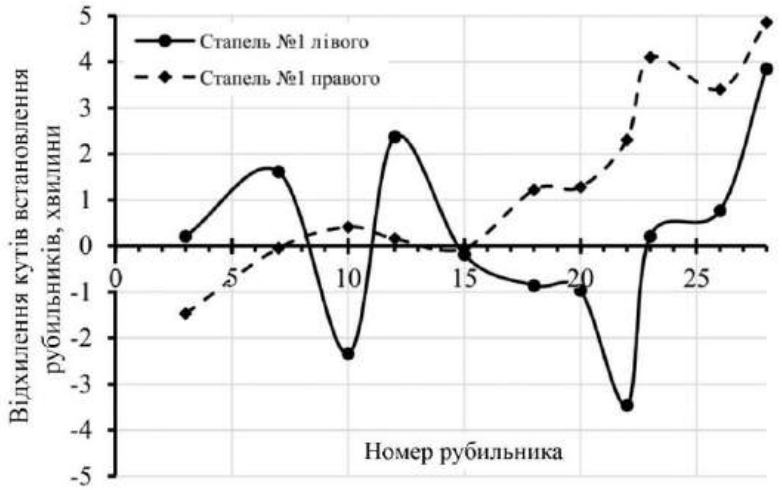


Рис. 4.10 – Відхилення кутів встановлення рубильників комплекту стапелів КЧК

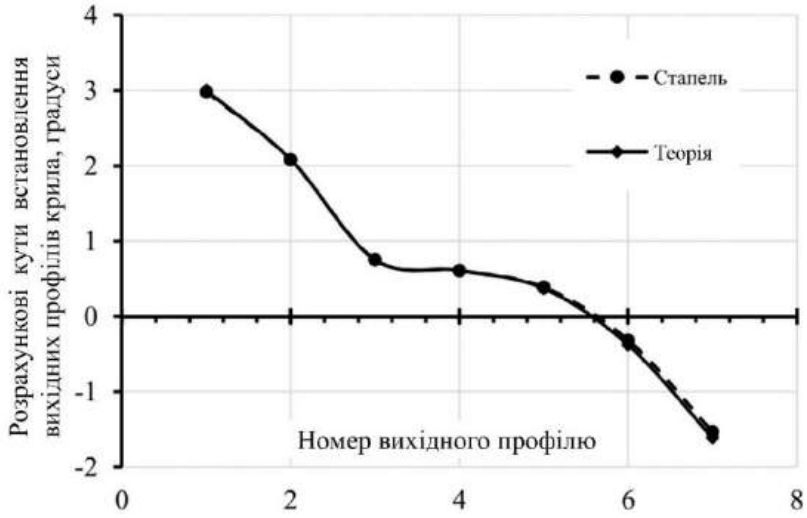


Рис. 4.11 – Розрахункові кути установлення вихідних профілів крила, які здатні забезпечити стапель КЧК

На другому етапі виробничих досліджень проводився контроль фактичних параметрів геометрії КЧК після виймання зі стапеля КЧК та аналіз їх на відповідність вихідним теоретичним даним (майстер-геометрії АЕ). Контроль здійснювався на стенді позастапельних робіт (ПР) у розвантаженому стані. За результатами реальних даних розраховувалися кути встановлення перерізів КЧК

по нервюрах та параметри відхилення контуру КЧК у зоні лонжеронів. Перелічені геометричні параметри сканування та обчислень наведені на графіках (рис. 4.12–4.18) [215].

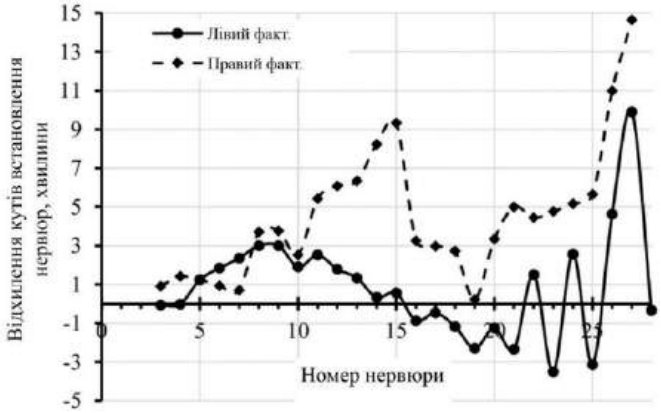


Рис. 4.12 – Відхилення кутів встановлення перерізів лівої та правої КЧК по нервюрах

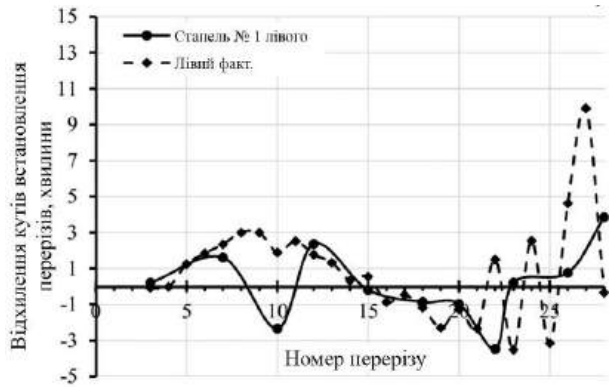


Рис. 4.13 – Відхилення кутів встановлення перерізів лівої КЧК та лівого стапеля

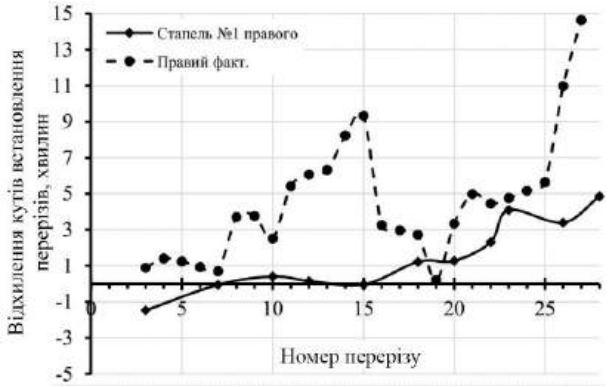


Рис. 4.14 – Відхилення кутів встановлення перерізів правої КЧК та правого стапеля

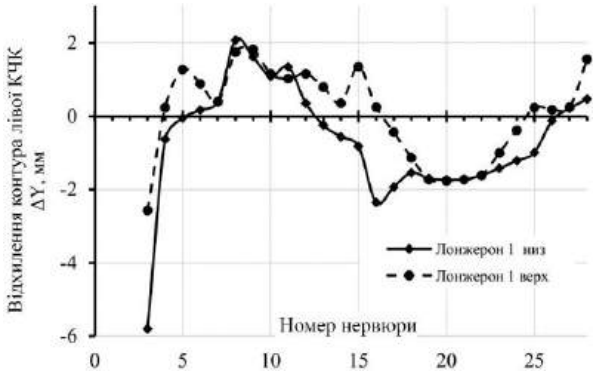


Рис. 4.15 – Відхилення контуру лівої КЧК у зоні лонжерона 1

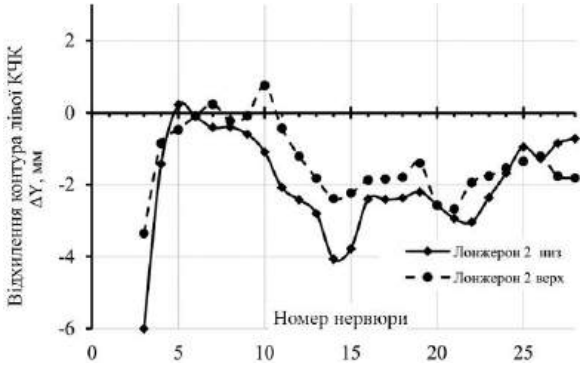


Рис. 4.16 – Відхилення контуру лівої КЧК у зоні лонжерона 2

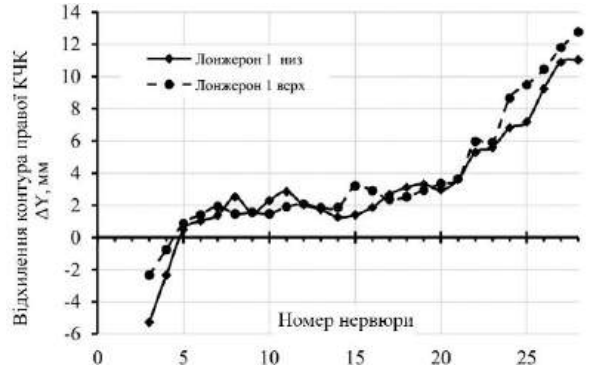


Рис. 4.17 – Відхилення контуру правої КЧК у зоні лонжерона 1

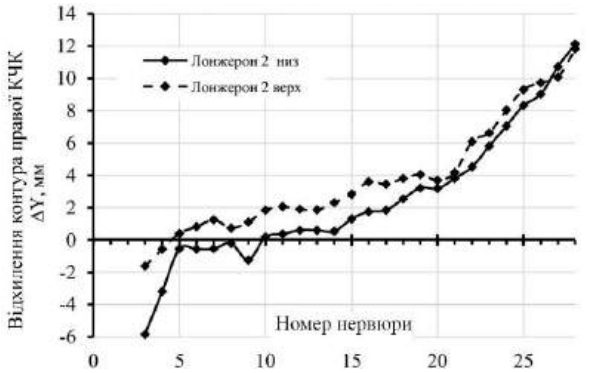


Рис. 4.18 – Відхилення контуру правої КЧК у зоні лонжерона 2

За результатами даних, отриманих на другому етапі, можна зробити такі висновки:

– на лівій КЧК спостерігається різкий стрибок відхилень кутів встановлення перерізів (у зоні нервюри 22), фактичні кути не відповідають прогнозованим значенням, отриманим після аналізу стапеля, ці значення істотніші, ніж відхилення стапеля;

– на правому КЧК не спостерігається стрибка відхилень та кутів встановлення перерізів, вони ближчі до прогнозованих на підставі геометрії стапеля (див. рис. 4.14), на відміну від лівого КЧК, де є стрибок кутів, в районі нервюр від 22 до 28 (див. рис. 4.13);

– товщина профілю в зоні стику КЧК з центропланом (по лівій та правій консолях) на 3 мм перевищує теоретичне значення МГ (рис. 4.15 – 4.18).

Наступним етапом контролю геометричних параметрів КЧК було встановлення на літак (без двигунів, механізації та іншого обладнання). При скануванні трекером КЧК перебували у вільному положенні (без підпорок). Результати аналізу отриманих даних подано на графіках (рис. 4.19 – 4.21).

За результатами сканування КЧК, встановлених на літак, можна зробити такі висновки:

– відхилення кутів встановлення перерізів КЧК практично відповідають відхиленням, які були виявлені на стенді позастапельних робіт (див. рис. 4.19 – 4.21);

– на лівій КЧК відбувається рівномірне збільшення кутів установлення перерізів, в один бік у середньому на 2...5 хвилин, тобто спостерігається невелике закручення консолей вгору.

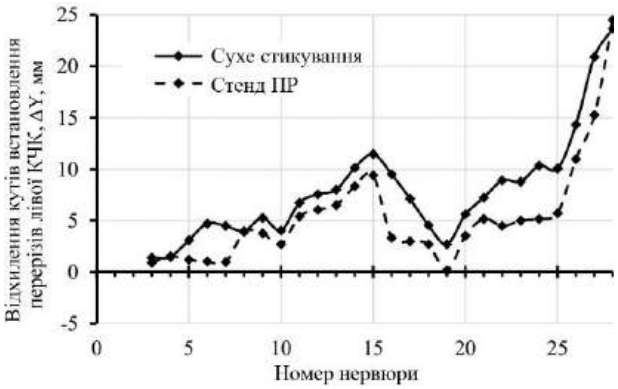


Рис. 19 – Відхилення кутів установлення перерізів лівої КЧК при обмірюваннях на стенді позастапельних робіт та при сухому стикуванні

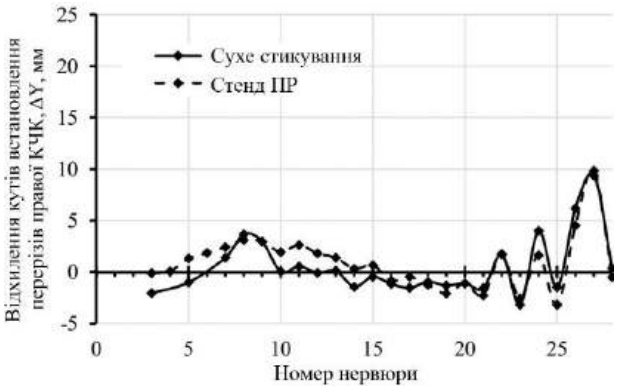


Рис. 20 – Відхилення кутів установлення перерізів правої КЧК при обмірах на стенді позастапельних робіт і при сухому стикуванні

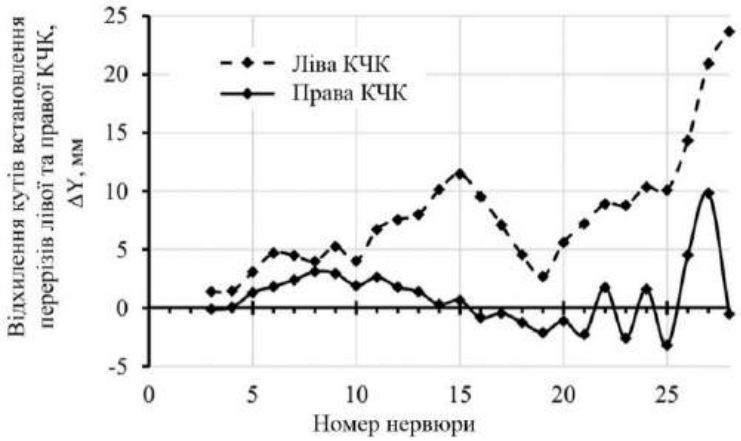


Рис. 4.21 – Відхилення кутів установлення перерізів лівої та правої КЧК при сухому стикуванні

Висновки щодо досліджень геометричних параметрів КЧК:

– після виймання зі стапелю КЧК має відхилення, що перевищують аналогічні відхилення стапеля;

– ліва КЧК має більші відхилення кутів встановлення перерізів, ніж права (у зоні нервюр 22...28);

– навішування КЧК на літак трохи збільшує кут закручування в середньому на 2...5 хвилин;

– отримані дані вказують на те, що деформація КЧК відбувається в зоні 2-го лонжерона за нервюрою 22 після вилучення зі стапеля.

4.1.4 Обговорення результатів експериментів та перспективи

Отримані результати показують, що метод безплазового ув’язування може застосовуватися в сучасному виробництві АК, оскільки сумарна похибка розмірів при складанні-ув’язуванні мінімізується на етапі монтажу через відсутність жорстких носіїв форм. Використання цієї технології не приводить до ускладнень в процедурі складання готового АК, а, навпаки, спрощує її та скорочує загальний час. Портативність сучасних лазерних вимірювальних систем дає змогу розгортати та налаштовувати роботу пристроїв безпосередньо біля об’єкта.

Для успішного практичного застосування на виробництві пропонується використовувати описану методику на літаках серії АН: Ан-158, Ан-178, Ан-132, оскільки визначення допустимого діапазону відхилень геометричних параметрів було виконано на одній з типових моделей.

Запропонований для застосування метод безплазового ув'язування форм та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів при монтажі агрегатів АК дасть змогу пришвидшити і виробництво техніки Збройних сил України. А це скоротить час очікування при замовленні АК заводу-виготовлювачу.

В перспективі можуть стати дослідження геометричних параметрів при встановленні кожної з підзбірок на літак та визначити діапазон можливого відхилення форми та геометрії від заданих в документації з метою виявлення і усунення недоліків технології виготовлення та складання.

4.2 Створення математичних моделей розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів і призначення похибок при його побудові

Під час проєктування та виготовлення агрегатів АК використовуються різні підходи [79, 220, 221, 223]. У цьому випадку становить інтерес плазово-шаблонний метод (ПШМ), за яким було виготовлено більшість виробів АК, що знаходяться в експлуатації і досі та потребують ремонту або заміні. Рішенням останнього є використання методів РІ для оцифровування та виробництва необхідних СО АК.

ПШМ використовує єдину систему форм і розмірів для створення та геометричної ув'язки елементів конструкції. Він оснований на теоретичному плані агрегату АК, який визначає розміри та форми всіх відповідних частин. Основною метою є забезпечення сумісності та точності з'єднання елементів [224, 225].

РІ є процесом зворотного проєктування, який містить аналіз структури і роботи готового виробу для створення АЕ або моделі. Застосовується такий метод для вивчення та відтворення конструкції та функціональності об'єкта на основі готового зразка. Це дає змогу усунути недоліки або покращити наявний продукт через створення точної моделі виробу [225, 226, 227].

При з'єднанні елементів та забезпеченні працездатності конструкції важливою є точність контуру, тому зменшення похибок стає критичним аспектом при проєктуванні та виготовленні АК. Похибки контуру при ПШМ можуть бути спричинені різними факторами, наприклад:

– точністю виготовлення шаблонів та форм. Навіть невеликі відхилення під час виготовлення шаблонів можуть призвести до накопичення похибок у готовій конструкції;

– деформаціями матеріалів. При процесах складання та експлуатації матеріали можуть піддаватися деформаціям, що також може вносити зміни до контуру та точності елементів;

– нестабільністю процесу виготовлення. Зміни за умов виробництва, технічні проблеми чи непередбачені чинники можуть впливати на точність конструкції.

РІ агрегату може значно вплинути на процес та якість дрібносерійного

виробництва авіаційної техніки, допомогти зменшити або уникнути похибок контуру. Основні шляхи досягнення цього такі:

– аналіз та оптимізація виробничих процесів. При реінжинірингу агрегату можна переглянути методи виробництва, вибрати більш точні або сучасні технології виготовлення деталей. Наприклад, можна використовувати комп'ютерний контроль числового програмного забезпечення, адитивне виробництво та інші точні техніки;

– поліпшення матеріалів та технологій. Розгляд нових матеріалів або покращених технологій може допомогти усунути недоліки, пов'язані з похибками контуру. Використання більш стабільних та довговічних матеріалів також може знизити ймовірність деформацій або відхилень у виробі;

– точні моделі та документація. Створення точних АЕ та документації на основі реінжинірингу дає змогу більш точно контролювати процес виробництва та виготовлення деталей з меншими похибками;

– контроль якості на всіх етапах. Упровадження строгих методів контролю якості у процесі виробництва допоможе виявляти та усувати похибки на ранніх етапах, перш ніж вони виявляться критичними для якості кінцевого виробу.

Отже, можна застосувати сучасну технологію РІ для реконструкції наявного об’єкта, фокусуючись при цьому на покращенні його теоретичного контуру.

Метою дослідження є не тільки створення математичної моделі розрахунку точності розмірів на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів, а й створення математичної моделі призначення похибок при створенні АЕ стабілізатора на базі РІ.

4.2.1 Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є процес формування математичної моделі (ММ) розрахунку точності на етапах побудови АЕ за методом ланцюгів.

ММ враховує всі похибки, що можуть виникати при виготовленні та ув’язуванні контурів вузлів або агрегатів при ПШМ. Застосування такої моделі показано на прикладі авіаційного об’єкта – стабілізатора ЛА (рис. 4.22).



Рис. 4.22 – Дослідна авіаційна деталь зовнішнього контуру (стабілізатор)

Раніше об'єкт проєктувався та виготовлявся з використанням саме плазово-шаблонного методу (ПШМ), звідси випливають неминучі недоліки, наприклад точність реалізованого теоретичного контуру стабілізатора. Першочерговим стає створення АЕ на базі РІ. У роботі буде застосовано два сканери Eva Lite та Leo фірми Artec (рис. 4.23).



а б

а – Eva; б – Leo

Рис. 4.23 – Сканери фірми Artec Group (США):

Після створення АЕ стабілізатора, потрібно виконати необхідні розрахунки можливих відхилень від закладених аеродинамічних контурів.

4.2.2 Розрахунок точності геометричних параметрів обводу носка стабілізатора при складанні

Попереднє обстеження стабілізатора ЛА дало змогу дійти висновку, що його складання було виконано в стапелі з базуванням по поверхні каркаса і плазово-шаблонному методі ув'язування. Складання з базуванням від поверхні каркаса – процес, при якому базою для обводоутворювальних елементів установлюваної СО є обводи деталей раніше зібраного каркаса. При такому способі базування обшивка встановлюється внутрішньою поверхнею на опорні поверхні зібраного каркаса і притискається рубильниками, стрічками або шнурами. У цьому випадку похибки обводоутворювальних елементів каркаса повністю переносяться на обводи остаточно зібраного виробу. Тому потрібно прагнути максимальної точності обводів при складанні каркаса, оскільки при установленні обшивки неможливо виправити похибки, що утворилися. Базування від поверхні каркаса застосовується при складанні агрегатів ЛА легкого та середнього класів, відсіків непанельованої конструкції, що складаються з монолітних та збірних нервюр і шпангоутів.

Побудуємо розмірний ланцюг і розглянемо можливі значення похибок на етапах виготовлення та складання стабілізатора. Схему утворення відхилення дійсного положення контуру від теоретичного для каркаса стабілізатора (ескіз суміщених перерізів обводоутворювальних деталей каркаса стабілізатора та фіксаторів контуру в стапелі) показано на рис. 4.24.

Складовими ланками основного розмірного ланцюга будуть: відстань між віссю будівельної площини стабілізатора (*БПС*) літака і 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:

$$\delta_\Sigma = \delta_{руб.}^{конт.} + \delta_{нерв.}^{конт.} + k_{ф.} \cdot C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)} + \delta_{S_{обш.}} + \delta_{з'єдн.}, \qquad (4.1)$$

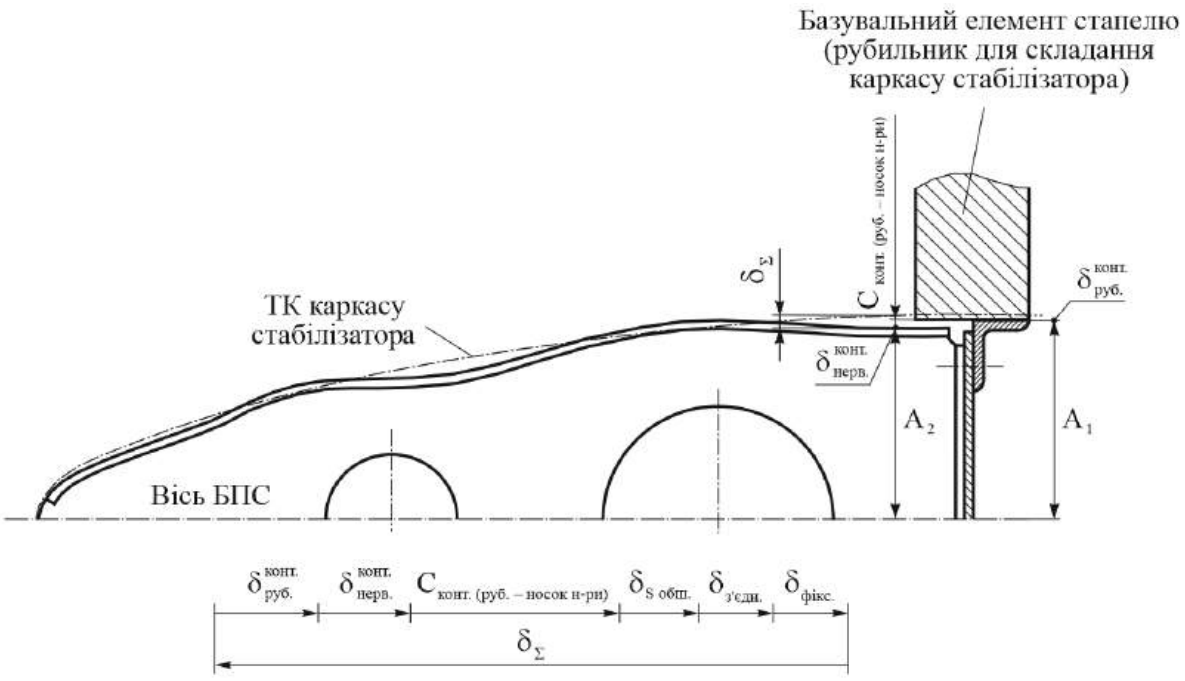


Рис. 4.24 – Ескіз суміщених перерізів обводоутворювальних деталей каркаса стабілізатора та фіксаторів контуру в стапелі

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 носком нервюри, яка може бути зменшена шляхом використання притисків (враховується коефіцієнтом фіксації $k_{ф.}$);

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

$\delta_{з'єдн.}$ – похибка контуру стабілізатора, спричинена деформацією після виконання з'єднання, яка при складанні СО класифікаційної групи IX становить $\delta_{з'єдн.} = (0{,}1К\ 0{,}2)\delta_{\Sigma}$ [79, 226, 227].

Коефіцієнт фіксації при складанні у стапелі визначається за формулою:

$$k_{ф.} = 1,5 \cdot \left(\frac{L}{L_{ф.}} \right)^{-1,05}, \tag{4.2}$$

де L – максимальний габаритний розмір СО; $L_{ф.}$ – відстань між фіксаторами, тобто

$$k_{ф.} = 1,5 \cdot \left(\frac{750}{210} \right)^{-1,05} = 0,394.$$

Що стосується похибок $\delta_{руб.}^{конт.}$, $\delta_{нерв.}^{конт.}$ та $C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}$, то для їх розрахунку знадобляться допоміжні розмірні ланцюги, що враховують метод ув'язування, використаний при ТПВ. При прийнятому ПШМ ув'язування ці розмірні ланцюги мають вигляд, зображений на рис. 4.25, де показано похибки виготовлення стапеля $\delta_{руб.}^{конт.}$, носка нервюри $\delta_{нерв.}^{конт.}$ та похибку ув'язування контурів нервюри та фіксатора стапеля $C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}$.



Рисунок 4.25 – Розмірний ланцюг для розрахунку похибок виготовлення та ув'язування: ТП – теоретичний плаз; КП – конструкторський плаз; ВК – відбиток контрольний; ШП – шаблон поверхні; ШК – шаблон контура; ШВК – шаблон внутрішнього контуру

Розрахунок точності складання стабілізатора та монтажу стапеля виконують з використанням ймовірнісного методу [79]:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{\Sigma}}{2} &= t_{\Sigma} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{\delta_i}{2} \right)^2}; \\ \Delta_{o_{\Sigma}} &= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \cdot \left(\Delta_{o_i} + \alpha_i \cdot \frac{\delta_i}{2} \right), \end{aligned} \tag{4.3}$$

де δ_{Σ} та $\Delta_{0\Sigma}$ – параметри похибок замикаючої ланки розмірного ланцюга (допуск та координата середини поля допуску відповідно);

t_Σ – коефіцієнт ризику, що вибирається з таблиць значень функції Лапласа $\Phi(t)$ залежно від взятої величини ризику P (при ризику P=32 % коефіцієнт ризику $t_\Sigma = 1,0$);

ξ_i – передатне відношення, що характеризує вплив даного етапу перенесення розміру на кінцеве значення розміру (розрізняють ланки, що збільшуються $\xi_i > 0$ та ті, що зменшуються $\xi_i < 0$; для лінійних ланцюгів $\xi_{збільш.} = 1$ та $\xi_{зменш.} = -1$);

δ_i та Δ_{0i} – параметри похибок вхідних ланок (складових частин) розмірного ланцюга;

k_i – коефіцієнт відносного розсіювання похибок;

α_i – коефіцієнт відносної асиметрії кривої розсіювання;

m–1 – кількість складових ланок (m – кількість носіїв розміру).

Граничні відхилення розміру обчислюють за формулами

$$\Delta_в = \Delta_{0\Sigma} + \frac{\delta_\Sigma}{2};\ \Delta_н = \Delta_{0\Sigma} - \frac{\delta_\Sigma}{2}, \tag{4.4}$$

де $\Delta_в$ і $\Delta_н$ – верхнє та нижнє відхилення розміру відповідно.

При нормальному законі розподілу похибок $k_i = 0$, $\alpha_i = 0$.

Результати розрахунку похибок виготовлення носка нервюри $\delta^{конт.}_{нерв.}$, монтажу рубильника стапеля $\delta^{конт.}_{руб.}$ і похибки ув'язування контурів носка нервюри та рубильника стапеля $C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}$ зведено в таблиці 4.3 – 4.5.

Граничні відхилення зовнішнього контуру носка нервюри дорівнюватимуть:

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

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

Граничні відхилення монтажу рубильника стапеля дорівнюватимуть:

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

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

Таблиця 4.3 – Дані для розрахунку граничних відхилень зовнішнього контуру носка нервюри $\delta_{нерв.}^{конт.}$

Ланка розмірного ланцюга	$\Delta_{в_i}$	$\Delta_{н_i}$	Δ_{0_i}	$\frac{\delta_i}{2}$	$\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$	ξ_i	α_i	λ_i	λ_i^2	$\lambda_i \cdot \frac{\delta_i}{2}$	$\xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$
ТП – КП	+0,1	–0,1	0	0,1	0,01	+1	0,0	1,0	1,0	0,1	0,01
КП – ВК	+0,1	–0,1	0	0,1	0,01	+1	0,0	1,0	1,0	0,1	0,01
ВК – ШК	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШК – ШВК	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШВК – формблок	+0,2	–0,2	0	0,2	0,04	+1	0,5	1,4	1,96	0,28	0,0784
Формблок – носок нервюри	+0,3	0	0,15	0,15	0,022	+1	0,2	1,2	1,44	0,18	0,0317
$\delta_{нерв.}^{конт.}$	–	–	0,15	–	–	–	–	–	–	–	0,2183

Таблиця 4.4 – Дані для розрахунку граничних відхилень монтажу рубильника стапеля $\delta_{руб.}^{конт.}$

Ланка розмірного ланцюга	$\Delta_{в_i}$	$\Delta_{н_i}$	Δ_{0_i}	$\frac{\delta_i}{2}$	$\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$	ξ_i	α_i	λ_i	λ_i^2	$\lambda_i \cdot \frac{\delta_i}{2}$	$\xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$
ТП – КП	+0,1	–0,1	0	0,1	0,01	+1	0,0	1,0	1,0	0,1	0,01
КП – ВК	+0,1	–0,1	0	0,1	0,01	+1	0,0	1,0	1,0	0,1	0,01
ВК – ШП	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШП – рубильник	+0,2	–0,2	0	0,2	0,04	+1	0,5	1,4	2,74	0,28	0,1096
Рубильник – стапель	+0,5	–0,5	0	0,5	0,25	+1	0,0	1,0	1,0	0,5	0,25
$\delta_{руб.}^{конт.}$	–	–	0	–	–	–	–	–	–	–	0,4237

Таблиця 4.5 – Дані для розрахунку похибки ув'язування контурів носка нервюри та фіксатора стапеля $C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}$

Ланка розмірного ланцюга	$\Delta_{в_i}$	$\Delta_{н_i}$	Δ_{0_i}	$\frac{\delta_i}{2}$	$\left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$	ξ_i	α_i	λ_i	λ_i^2	$\lambda_i \cdot \frac{\delta_i}{2}$	$\xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2$
ВК – ШК	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШК – ШВК	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШВК – ф/б	+0,2	–0,2	0	0,2	0,04	+1	0,5	1,4	1,96	0,28	0,0784
Формблок – носок нервюри	+0,3	0	0,15	0,15	0,022	+1	0,2	1,2	1,44	0,18	0,0317
ВК – ШП	+0,15	–0,15	0	0,15	0,022	+1	0,5	1,4	1,96	0,21	0,0441
ШП – рубильник	+0,2	–0,2	0	0,2	0,04	+1	0,5	1,4	2,74	0,28	0,1096
Рубильник – стапель	+0,5	–0,5	0	0,5	0,25	+1	0,0	1,0	1,0	0,5	0,25
$C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}$	–	–	0,15	–	–	–	–	–	–	–	0,9303

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

$$\Delta_{в\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}} = \Delta_{o_\Sigma\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}} + \frac{\delta_{\Sigma\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}}}{2} = 1,08 \text{ мм};$$

$$\Delta_{н\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}} = \Delta_{o_\Sigma\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}} - \frac{\delta_{\Sigma\,C_{конт.(руб.-носок\ н-ри)}}}{2} = -0,78 \text{ мм}.$$

Тоді згідно з (4.1) величина відхилення дійсного положення контуру носка стабілізатора від теоретичного становитиме

$\delta_{в\Sigma} = 0,424 + 0,368 + 0,394 \cdot 1,08 + 0 + 0,15\delta_{в\Sigma}$, звідси $\delta_{в\Sigma} = 1,4$ мм;

$\delta_{н\Sigma} = -0,424 - 0,068 - 0,394 \times 0,78 - 0,15 + 0,15\delta_{в\Sigma}$, звідси $\delta_{н\Sigma} = -1,1$ мм.

Очікувана (розрахункова) похибка не перевищує значення допуску на зовнішній контур стабілізатора ($[\delta_{стаб.}] = \pm 2$ мм [79, 229]), тобто складання в стапелі

з базуванням від поверхні каркаса за методом ув'язування ПШМ забезпечує задану геометричну точність. Наведені результати дають змогу оцінити при технічній підготовці виробництва відхилення замкнутих контурів перерізів стабілізатора від еталонних перерізів, отриманих при складанні в стапелі з базуванням від поверхні каркаса за методом ув'язування ПШМ.

4.2.3 Формування портрета стабілізатора

Результати сканування стабілізатора гелікоптера 3D-сканером є вихідними даними для створення еталонного портрета геометрії стабілізатора ($П_{ст}$), який підлягає подальшому порівнянню з АЕ з урахуванням точності розрахунків геометрії об'єкта.

При збігу геометрії $П_{ст}$ і АЕ робиться висновок про правильність вибору методів виготовлення та методів ув'язування складових частин виробу (СЧ), засобів технологічного оснащення (ЗТО).

В іншому випадку виявляються причини виникнення похибок, які перевищують допуск і усуваються зміною методів виготовлення СЧ, заміною ЗТО і т. д., тобто коригуванням ТП (технологічним процесом) виробництва.

Для оцінювання відповідності отриманих АП стабілізатора вимогам до об'єкта виробництва виконано оцифрування контурів його перерізів (рис. 4.26) [230].

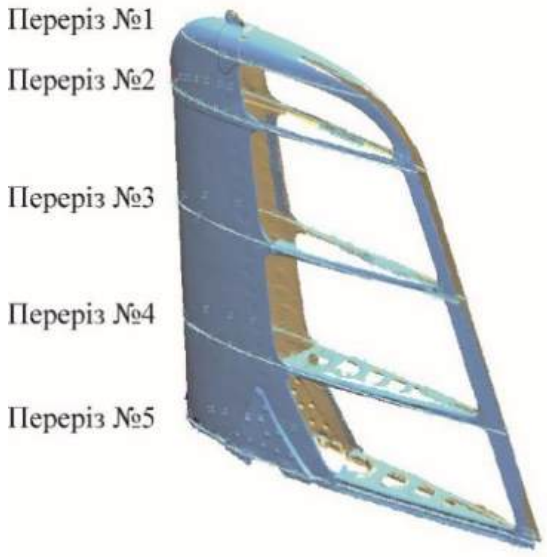


Рисунок 4.26 – Перерізи портрета стабілізатора $П_{ст}$

Загальний алгоритм отримання геометрії профілю стабілізатора подано на рис. 4.27. Отримані координати точок перерізів профілю стабілізатора використовуються для оцінювання точності даних (рис. 4.28).

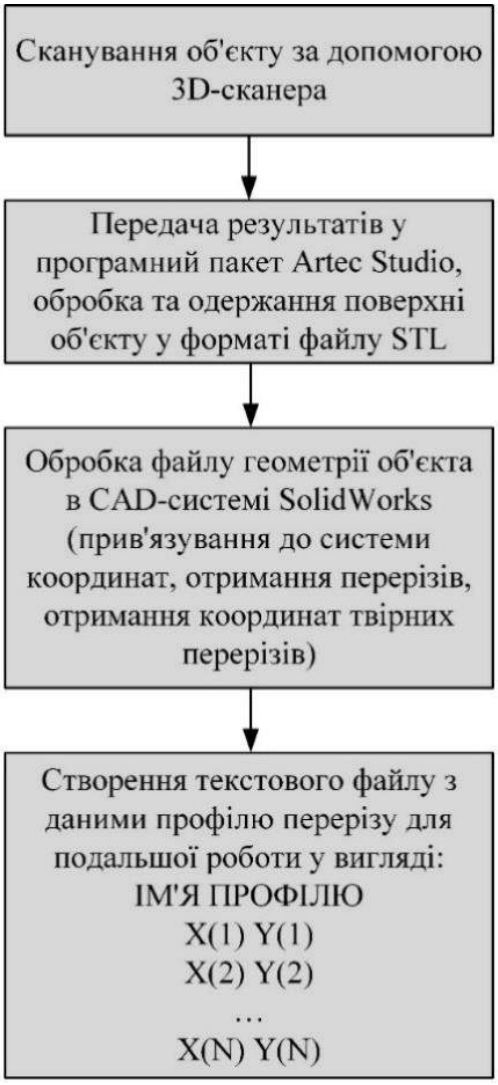


Рисунок 4.27 – Загальний алгоритм отримання геометрії профілю виробу [230]

Дослідження з оцифрування контурів перерізів стабілізатора спочатку проводилися за допомогою 3D-сканера Artec Eva, оскільки він знаходився у безпосередній доступності автора. Для оцінювання придатності вибраного методу побудови АП стабілізатора процедуру сканування було виконано чотири рази. Розкид геометрії отриманих перерізів дорівнював 6,8 мм (див. рис. 4.28). Ці значення змінювалися як при повторному скануванні цього ж стабілізатора, так і при зміні оператора, порядку сканування об'єкта, способу оброблення даних,

застосування різних способів прив'язки кадрів. Основні проблеми виникли під час сканування задньої кромки стабілізатора. Отримання переходу від верхньої поверхні стабілізатора до нижньої порівняно гострої кромки мало найбільші ускладнення при усуненні розривів поверхонь.

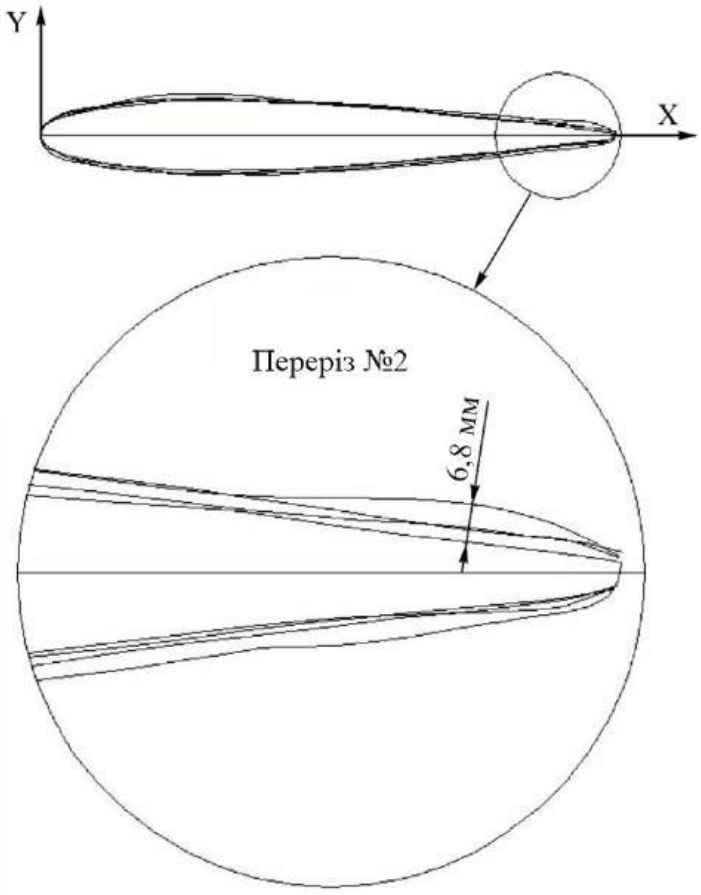


Рисунок 4.28 – Результати сканування Artec Eva та оброблення контуру перерізу № 2

Для підвищення точності сканування та зменшення кількості дефектів додатково поміщалися до зони сканування різні предмети з характерними особливостями форми (дерев'яні бруски, грудочки будівельного скотчу тощо). При скануванні крайових частин та нервюр стабілізатора застосовувалася контрастна підкладка. Для усунення контрастних тіней змінювалося додаткове освітлення. Отримані у такий спосіб результати наочно демонструють наявність розв'язаного завдання, але це рішення не є єдиним. Виходячи з цього можна стверджувати, що завдання некоректно поставлено за другою умовою. Для розв'язання задачі необхідно від некоректної постановки задачі перейти до коректної.

Тому для отримання задовільного результату при вирішенні поставленого завдання необхідно враховувати такі умови:

– на точність побудови АП безпосередньо впливає кваліфікація виконавця (оператора) процедури сканування;

– на якість побудови АП значно впливають технічні характеристики сканера.

Всі подальші побудови АП стабілізатора виконувалися оператором вищої кваліфікації та сканером Artec Leo з вищими технічними характеристиками, ніж в Artec Eva. На рис. 4.29 показано результати сканування стабілізатора сканером Artec Leo та оброблення перерізу № 2.

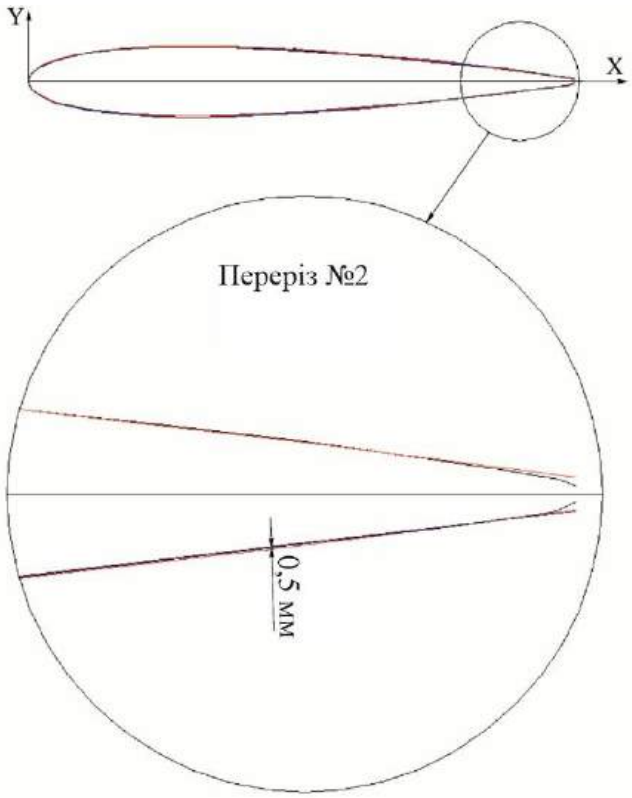


Рисунок 4.29 – Результати сканування Artec Leo та оброблення контуру перерізу № 2

Процедура сканування також виконувалася чотири рази. Розкид геометрії отриманих перерізів виявився істотно меншим за розкид результатів при скануванні Artec Eva: відхилення склали менше ніж 0,5 мм. Ці значення практично не змінювалися під час повторного сканування об'єкта іншим оператором. Відхилення укладаються у допуск на контур стабілізатора, що дорівнює ±2 мм [79].

Порівняльні результати сканування різними сканерами та різними операторами можна побачити на виносках (переріз № 2) на рис. 4.28 і 4.29.

За результатами побудови та аналізу було ухвалено рішення про використання надалі 3D-сканера Artec Leo.

4.2.4 Вимоги до точності еталонного портрету стабілізатора

Далі розглянуто якісну картину впливу точності виготовлення стабілізатора гелікоптера на стійкість, керованість та діапазон експлуатаційних обмежень, що дає змогу визначити додаткові вимоги до точності АЕ стабілізатора.

Стабілізатор гелікоптера призначено для забезпечення та покращення поздовжньої стійкості, демпфірування та керованості. Проблема стійкості гелікоптера є одним із найскладніших завдань поліпшення льотних властивостей гелікоптерів і ще далеко не вичерпані всі можливості щодо підвищення стійкості та керованості цього виду АК.

Аналіз стійкості та керованості базується на розв’язанні рівнянь руху гелікоптера в цілому.

Спрощена ефективність стабілізатора пропорційна площі стабілізатора $S_{ст.}$, плечу установлення стабілізатора L, похідній коефіцієнта піднімальної сили по куту атаки $C_{y_{ст}}^{\alpha}$ кутом атаки α.

За характеристиками поляри необхідно оцінити придатність геометрії контуру стабілізатора, отриманої в результаті сканування для побудови $П_{ст}$ майбутнього об'єкта виробництва. У нашому випадку це вплив геометрії контуру профілю перерізу на поведінку $C_{y_{ст}}^{\alpha}$, її значення та лінійність за кутом атаки α.

Також на якість льотних характеристик гелікоптера, розширення польотного діапазону впливають кут зриву потоку, що залежить у свою чергу від геометрії профілю та його особливостей (гострий, плавний і т. д.), а також від гістерезису при поверненні з великих кутів атаки на малі. Зрештою, ці характеристики описують характер відновлення піднімальної сили на стабілізаторі після зриву потоку і значною мірою визначають стійкість і керованість АК при його експлуатації.

Вимоги до точності геометрії агрегатів коригують шляхом розрахунку аеродинамічних характеристик несучих, стабілізувальних та керувальних поверхонь АК. Розрахунок аеродинамічних характеристик аеродинамічних профілів, що складають геометрію зовнішніх обводів стабілізатора, виконувався у програмі XFOIL [231].

При обчисленні задаємо число Маха M = 0, число Рейнольдса Re = 1000000, критерій турбулентності потоку n = 4 (висока турбулентність). Також задаємо розрахунковий діапазон кутів атаки -5...15° та крок 1°.

Етапи проведення розрахунку показано на рис. 4.30.



Рисунок 4.30 – Етапи розрахунку аеродинамічних характеристик профілю

Для аналізу аеродинамічних характеристик стабілізатора було отримано сімейство його перерізів по хорді нервюр шляхом побудови відповідних контурів. Отримані координати точок перерізів профілю стабілізатора використовувалися для визначення аеродинамічних характеристик отриманих профілів.

4.2.5 Проєктування АЕ стабілізатора з урахуванням даних еталонного портрету

На характеристики стійкості при нерухомому стабілізаторі та зміні кута атаки та керованості при відхиленні стабілізатора найбільший вплив мають величина похідного коефіцієнта піднімальної сили профілю оперення за кутом атаки $C_{y_{cm}}^{\alpha}$, кут атаки при нульовій піднімальній силі $\alpha_{C_y=0}$, максимальний коефіцієнт піднімальної сили $C_{y\max}$. При цьому аеродинамічний опір профілю та його моментні характеристики не розглядаються.

Максимальний коефіцієнт піднімальної сили профілю оперення $C_{y\max}$ впливає на діапазон центрівок гелікоптера.

Кут атаки при нульовій піднімальній силі $\alpha_{C_y=0}$ визначає початковий кут установлення стабілізатора. При його зміні через неточності виготовлення або деформації в процесі експлуатації буде потрібне і регулювання кута установлення стабілізатора.

З результатів сканування та розрахунку, порівняння з теоретичними результатами можна зробити висновок про те, що $C_{y_{cm}}^{\alpha}$ сканованого перерізу та профілю NACA 0012 відрізняються незначною мірою і цим можна знехтувати.

Параметр $\alpha_{C_y=0}$ сканованого перерізу стабілізатора та профілю NACA 0012 відрізняються приблизно на 1° і, мабуть, у реальній експлуатації це практично не позначиться на характеристиках стійкості та керованості гелікоптера [232].

Параметр $C_{y\max}$ профілю NACA 0012 значно вище, ніж у сканованого

перерізу стабілізатора. Залежність коефіцієнта піднімальної сили від кута атаки є плавною після критичного кута атаки. У сканованого перерізу зрив потоку різкіший і при пілотуванні гелікоптера це явище може виявитися у різкій зміні кута тангажу і розвитку катастрофічної ситуації в польоті.

З усього сказаного можна зробити висновок про те, що збільшення точності виконання обводів аеродинамічних поверхонь призводитиме до поліпшення льотних та пілотажних характеристик гелікоптера.

За наведеними вище етапами були отримані аеродинамічні характеристики перерізів еталонного портрету (рис. 4.31, суцільна червона крива).

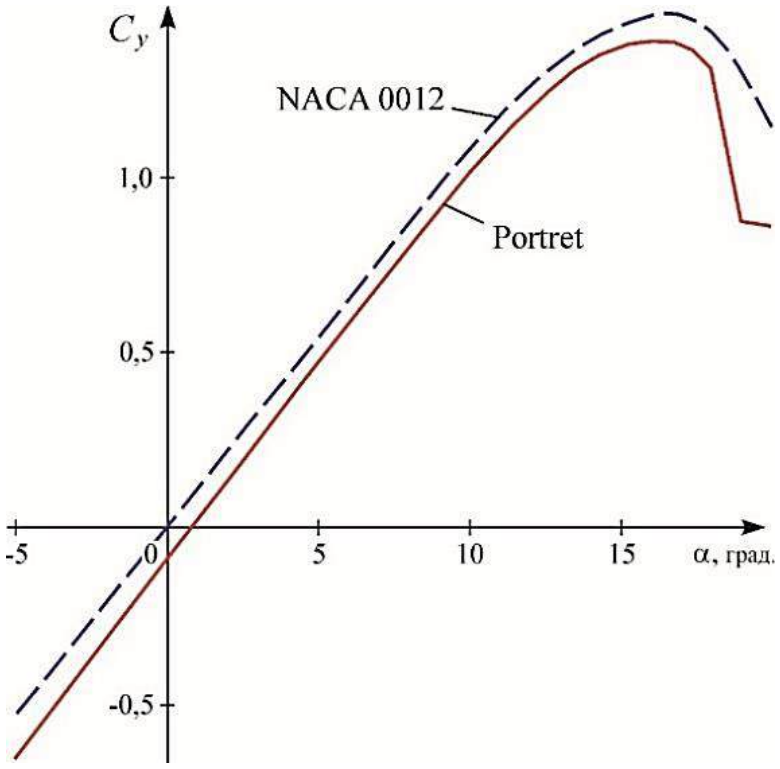


Рисунок 4.31 – Залежність коефіцієнта піднімальної сили C_y від кута атаки теоретичного профілю NACA 0012 і перерізу еталонного портрета

Детальний аналіз результатів сканування вказав на деяке відхилення від симетричності геометрії перерізів тоді, як на практиці КБ міля профіль стабілізатора є симетричним. З цієї причини було досліджено можливості відновлення симетричного профілю перерізів у межах наявних обмежень. Як наслідок було збудовано кілька симетричних профілів перерізів стабілізатора. Для

кожного з них було виконано аеродинамічний розрахунок залежності $C_y = f(\alpha)$.

Аналіз одержаних результатів показав, що характеристики профілю NACA 0012 вищі (рис. 10, пунктирна синя крива). На рис. 4.32 показано процедуру суміщення профілю NACA 0012 з перерізом стабілізатора $П_{ст}$. На основі профілю NACA 0012 було побудовано АЕ стабілізатора (рис. 4.33).

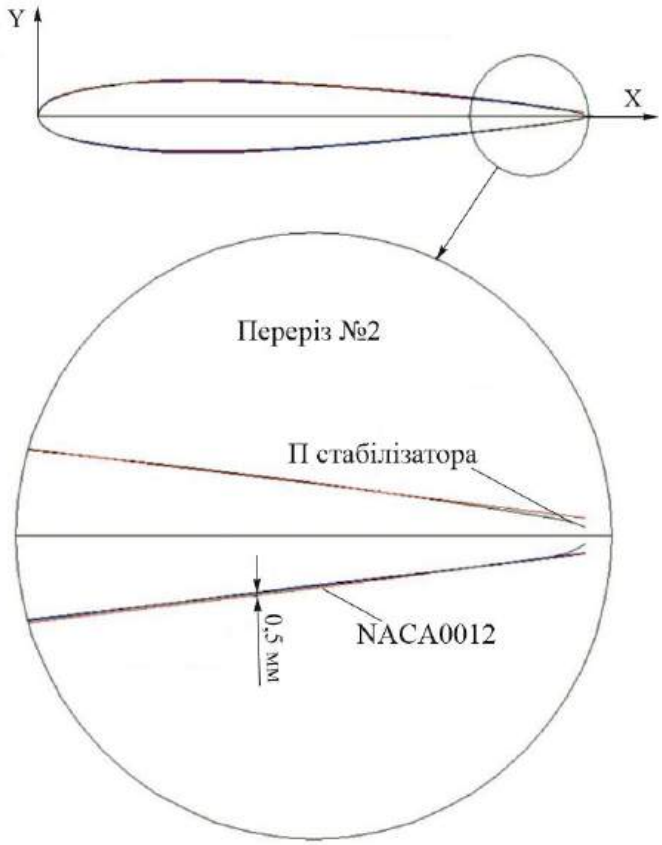


Рисунок 4.32 – Поєднання перерізів портрета стабілізатора та профілю NACA 0012



Рисунок 4.33 – АЕ стабілізатора

Отриманий АЕ стабілізатора і є інформаційною основою для виконання ТПВ.

4.2.6 Оцінювання коректності результатів побудованого АЕ стабілізатора

У пп. 4.2.2 було показано технологічний ланцюг складальних операцій при виготовленні стабілізатора за допомогою ПШМ ув'язування, який домінував на всіх українських авіаційних виробництвах у 60–80-х роках минулого століття. Там були визначені межі можливих відхилень контуру стабілізатора від свого еталона

$\begin{pmatrix} +1,4 \\ -1,1 \end{pmatrix}$ мм. Для оцінки правильності прийнятих при побудові АЕ стабілізатора гіпотез та припущень необхідно порівняти АЕ з $П_{ст}$, отриманим за результатами оцифрування агрегату.

Оскільки похибки при ПШМ ув'язування визначалися в площині перерізів стабілізатора, таку ж процедуру необхідно виконати порівнюючи його АЕ та $П_{ст}$ (рис. 4.34).

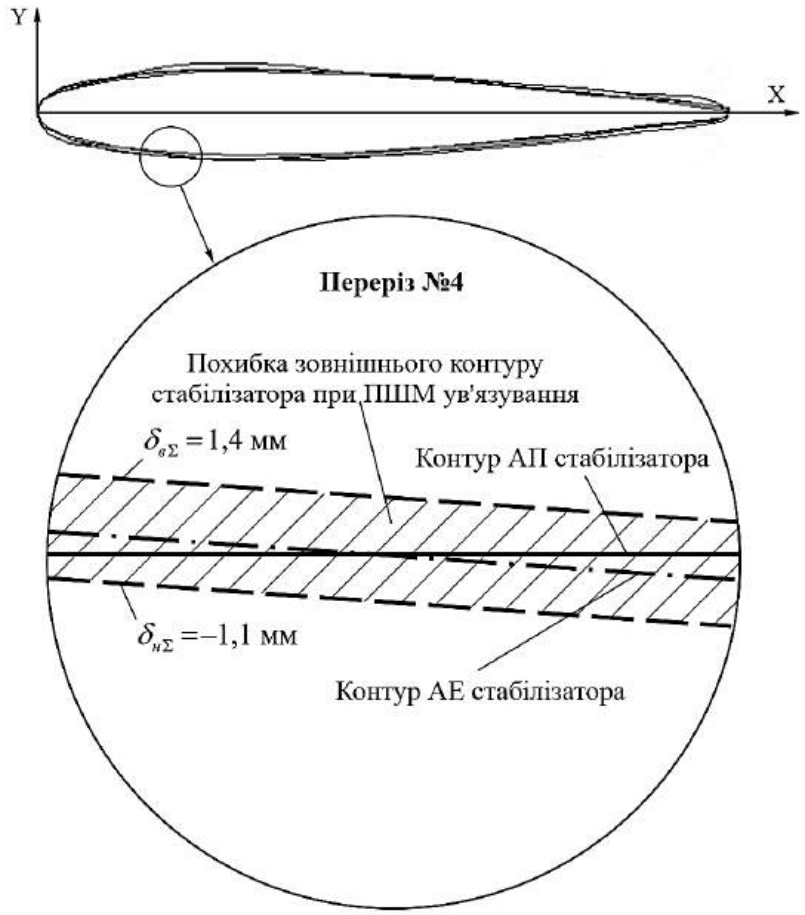


Рисунок 4.34 – Зіставлення контурів аналітичного еталона стабілізатора (з обмеженнями) та його портрета у перерізі № 4

З рис. 4.34 видно, що контури АЕ та $П_{ст}$ лежать у полі похибок зовнішнього контуру стабілізатора при складанні в стапелі з базуванням від поверхні каркаса та ПШМ ув'язування.

4.2.7 Аналіз отриманих результатів дослідження та практичне значення

Отримані таким чином результати, показують, що дану математичну модель розрахунку можна застосовувати для різних АК подібного типу і особливо з опукло-вгнутими поверхнями. Технологія не вимагає придбання громіздкого коштовного обладнання, тому може бути досить швидко впроваджена на виробництві. 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 наявність програми XFOIL або будь-якої аналогічної іншої, тому процедура може виконуватися без ускладнень.

Слід зазначити, що для успішного практичного застосування на виробництві рекомендується спочатку провести роботу с тестовим об’єктом для корегування показників.

Звертаємо увагу, що воєнний стан в Україні став, свого роду, поштовхом для пришвидшення розвитку досліджень в області РІ, оскільки деталі АК виходять з ладу та потребують ремонту або заміни в стислий термін. Також трофейна техніка може бути відремонтована та взята на озброєння української армії. Тому даний напрямок дослідження є особливо актуальним.

4.3 Ув’язування СО, отриманих раніше за ПШМ, при модернізації АК за допомогою РІ технологій

Складним моментом є підготовка виробництва і формування АЕ при модернізації та ремонті виробів, отриманих з використанням ПШМ. Як було сказано раніше, більшість АК випускали раніше з використанням ПШМ ув'язування, який забезпечує відхилення зовнішніх поверхонь, що дорівнює ±2,0 мм. Під час ремонту конструкції доводиться замінювати окремі деталі, які наразі виготовляють на підприємствах із використанням верстатів із ЧПК, а контроль форми і точності виготовлення здійснюють за допомогою КВМ і 3D-сканерів, а також дигітайзерів, лазерних систем та ін. Ці вимірювальні засоби є суто цифровими приладами. У цьому разі розрив між ПШМ і цифровими методами

виготовлення деталей конструкції покликані вирішувати під час ремонту засоби методу РІ.

Таким чином виникає завдання отримання АЕ, а також програм для верстатів із ЧПК, які забезпечують взаємозамінність і необхідну точність під час отримання деталей виробів АК, що модернізуються або ремонтуються. Для розв'язання цієї задачі запропоновано алгоритм отримання АЕ для ув'язування однорідних виробів АК, отриманих раніше за ПШМ. Модель ув'язування однорідних виробів АК, отриманих з використанням ПШМ, і носіїв АЕ із застосуванням РІ представлено на рис. 4.35.

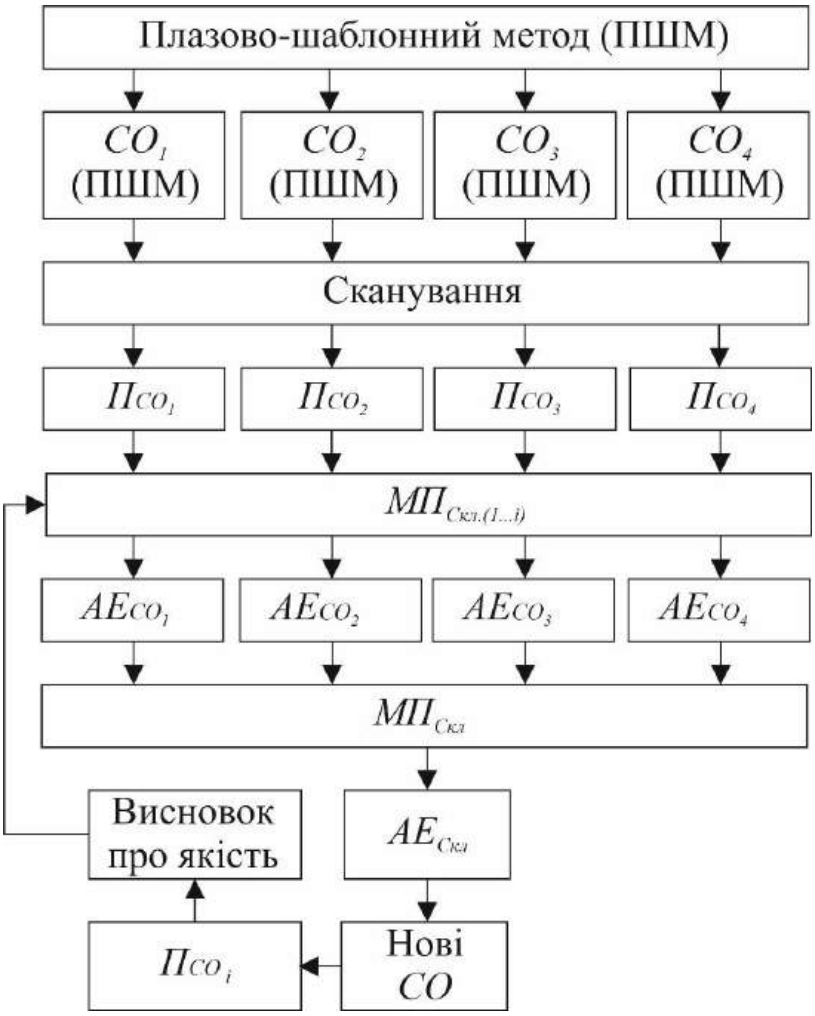


Рисунок 4.35 – Модель ув’язування однорідних АК, отриманих за ПШМ, при використанні АЕ на базі РІ технології

СО в моделі (рис. 4.35) показані як представники однорідних виробів складальних одиниць $СО_1$ – $СО_4$, отриманих з використанням ПШМ. Після сканування цих СО створюються їхні відповідні портрети *ПСО* і далі на підставі моделі процесу $МП_{Скл.(1...i)}$ СО одержання відповідних АЕ. Процес отримання цих еталонів охоплює побудову тріангуляційної моделі та базових поверхонь, формування, редагування та контроль моделі і, нарешті, побудову еталона. Далі за отриманими АЕ однорідних виробів будується узагальнений АЕ СО АК – $АЕ_{Скл}$. Модель отримання цього узагальненого АЕ виробу містить умови забезпечення взаємозамінності й точності нових виробів. Для виконання цих умов можлива часткова зміна конструкції СО або використання методів компенсації розмірів під час складання. Такий $АЕ_{Скл}$ 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.

4.4 Організаційні та технологічні методи скорочення термінів ТПВ

Виконані розрахунки порівняння часу розв'язання прямої і зворотної задач (пп. 1.5.2, рис. 1.29) показують, що використання методу РІ для скорочення часу ТПВ нового виробу не дає істотного виграшу в часі. У процесі ТПВ виконується великий обсяг конструкторських, технологічних та організаційних робіт, які пов'язані між собою та взаємозалежні одна від одної, а тому потребують значного часу на черговість їхнього виконання та тривалого узгодження рішень та інформацій між виконавцями.

У той же час, використання методу РІ досить ефективне під час запуску у виробництво нового виробу для виконання операцій контролю якості виконання окремих операцій, контролю якості СО і виробу АК в цілому. Використання методів РІ для розв'язання завдань у промисловості можна рекомендувати в разі ремонту АК, яка потребує модернізації або конвертації для використання її з новою

якістю сервісу або за новим призначенням. Наприклад, нині у світі скоротився обсяг пасажиропотоків і значно збільшився обсяг вантажоперевезень, що змусило експлуатантів авіатехніки конвертувати пасажирські АК у вантажні. Оскільки для цих цілей з міркувань економічності найбільше підходять літальні апарати, що були виготовлені 10 і більше років тому, а більшість виробів на той час було вироблено без широкого використання цифрових технологій, виробники зіштовхнулися з проблемою переведення документації та носіїв інформації до сучасних вимог. РІ в цьому випадку може широко використовувати технології сканування деталей і вузлів, програмні продукти з перетворення та побудови еталонів і моделей виробів.

Великі можливості має РІ при ремонті АК. Йдеться про ремонт конструкції гелікоптера/літака або про встановлення нового обладнання на борт гелікоптера. Водночас розрахунки показують, що для скорочення термінів ТПВ одного РІ недостатньо. За даними багатьох авторів, істотне скорочення ТПВ досягається за одночасного широкого використання сучасних засобів одержання, передавання та оброблення інформації. При цьому вельми важливо, щоб усі учасники процесу працювали в одному й тому самому інформаційному середовищі та мали сумісні програмні продукти.

Основні напрямки скорочення тривалості ТПВ представимо в наступній послідовності:

1. Широке використання методу зворотного проєктування під час розв'язання зворотних задач технологічної підготовки.

2. Використання методу зворотного проєктування під час контролю якості деталей і виробів гелікоптерного виробництва.

3. Застосування сканерів під час ремонту та конвертації гелікоптерів, вироблених методами ПШМ.

4. Удосконалення організаційних форм технологічної підготовки виробництва.

5. Уніфікація, стандартизація та типізація технічних і організаційних рішень.

6. Відпрацювання конструкцій на технологічність у процесі конструкторської та технологічної підготовки виробництва.

7. Автоматизація і механізація інформаційного обслуговування всіх виконавців.

8. Автоматизація конструкторського і технологічного проєктування.

9. Вибір найкращої схеми складання та ув'язки заготівельного і складального оснащення з використанням техніко-економічного аналізу.

Використання 3D-сканерів для розв'язання зворотних задач у промисловості можна рекомендувати в таких випадках:

- при здійсненні РІ виробів АК;
- для контролю якості виготовлення АК;
- під час ремонту та конвертації АК, вироблених методами ПШМ;
- для оцифрування створеного вручну дизайн-макету 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.

На даному етапі технічного розвитку найважливішим фактором скорочення термінів ТПВ є стан інформаційної автоматизованої підтримки техніко-логічної підготовки виробництва літаків і гелікоптерів [225, 226 та ін.].

Основним резервом підвищення ефективності ТПВ і скорочення термінів її виконання є реалізація системи автоматизованого конструювання та виготовлення пристосувань під час ТПВ у режимі віртуальної реальності [214, 227, 228 та ін.].

4.5 Висновки за розділом

1. Зазначено, що застосування методу безплазового ув'язування форми та розмірів з використанням лазерних вимірювальних засобів у виробництві та складанні АК дає змогу значно знизити трудомісткість та цикл монтажних робіт до 10 разів завдякивиключення необхідності проєктування, виготовлення та експлуатаційного супроводу носіїв жорстких форм та розмірів. До всього ж використання лазерних вимірювальних засобів у літакобудуванні дає змогу значно скоротити металоємність технологічного оснащення, порівняно з традиційними методами монтажу, що використовують жорсткі носії форм і розмірів.

2. Використання лазерних вимірювальних систем при монтажі оснащення дає змогу знизити до мінімуму вплив на точність малої жорсткості каркасів, деформування оснащення від маси деталей агрегатів, що складаються, і температурних деформацій і, таким чином, забезпечити досяжну похибку монтажу ± 0,1 мм, що задовольняє вимоги сучасної авіаційної техніки.

3. Застосування лазерних вимірювальних систем дає змогу увійти в систему координат літака, не проводячи його попереднє нівелювання, і, таким чином, провести монтаж та контроль встановлення на фюзеляж крила, кіля, стабілізатора, двигунів та шасі. Систему розгортають безпосередньо біля літака. Контроль за монтажем агрегатів здійснюється за контрольними точками з прив'язкою до системи координат виробу. Монтажнику за допомогою юстирувальних пристроїв достатньо поєднати контрольні точки з їхньою візуалізацією у просторі, провести контрольний вимір та вивести через монітор на друк.

4. Показано, що завдання РІ дослідного стабілізатора з метою організації його дрібносерійного виробництва нерозривно пов'язане з оцінкою похибок контуру агрегату при ПШМ ув'язуванні. Ця інформація дозволила вибрати сканер та ПЗ для побудови АЕ стабілізатора.

5. На прикладі проведення багаторазових вимірювань АК – дослідного стабілізатора гелікоптера сканером Artec Leo визначено аеродинамічні розрахунки характеристик стабілізатора, які виконані з використанням контурів перерізів портрета стабілізатора $П_{ст}$ і які дозволили зробити висновок про низькі значення

$C_{y_{\max}}$. Було збудовано АЕ стабілізатора на базі профілю NACA 0012, який є інформаційною основою при проведенні технологічної підготовки його виробництва.

6. Розглянуто технологічну послідовність – модель ув'язування СО, отриманих раніше за ПШМ, при модернізації АК за допомогою РІ технологій, а також надано організаційні та технологічні методи скорочення термінів ТПВ. Зазначено, що найважливішим фактором скорочення термінів ТПВ є стан інформаційної автоматизованої підтримки техніко-логічної підготовки виробництва АК. Перспективними лишаються системи автоматизованого конструювання та виготовлення пристосувань під час ТПВ у режимі віртуальної реальності.

Основні наукові результати, наведені в четвертому розділі, опубліковано в працях автора [10, 11, 14, 16, 20, 24].

РОЗДІЛ 5
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ З РІ НА АК СКЛАДНИХ ФОРМ

5.1 Створення технології РІ, що забезпечує підвищення продуктивності та точності складання АК

5.1.1 Аналіз відкритих джерел та постановка проблеми

РІ в сучасному виробництві розглядається як комплексна процедура, що передбачає внесення системних змін у технологічні процеси з метою мінімізації використання виробничих ресурсів, скорочення тривалості та вартості виробничого циклу, а також підвищення якості продукції [7]. У роботі [8] поняття «реверс-інжиніринг» визначено як комплекс рекомендацій щодо коригування параметрів технологічного процесу для створення нового або вдосконаленого виробництва об’єкта, проте цей підхід не повністю відображає сутність реверс-інжинірингу, визначену в [7]. У дослідженні [9] запропоновано пояснення процесу реінжинірингу на основі нейронних мереж та представлено модель застосування цієї техніки в промисловості, однак її практична реалізація та впровадження не підтверджені. У роботі [10] наведено результати застосування РІ для 3D-моделювання лопаті гвинта турбогвинтового двигуна, показано, що імпорт та експорт даних у CAD-системах іноді призводить до втрати геометричної інформації. У дослідженні [12] представлено модель експертної системи для реінжинірингу технологічного обладнання переробної промисловості з використанням штучного інтелекту та системи підтримки прийняття рішень, проте її впровадження на початковому етапі є економічно затратним.

РІ АК здебільшого застосовується на етапах контролю та вимірювань у складі автоматизованих або роботизованих систем складання АК [13]. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, питання використання реінжинірингу як інженерного методу дослідження АК залишається недостатньо вивченим. Надання точної інформації щодо геометрії, конструктивної структури та функціональних характеристик АК дозволяє формувати просторову інформацію для подальшого

дублювання або вдосконалення об’єкта, що забезпечує високий рівень науково-технічного прогресу. Подібний підхід представлено в роботах [14, 15], де просторову інформацію описано у вигляді цифрового макета в єдиному середовищі проектування, що включає сукупність електронних документів на виріб. Разом із тим, у зазначених роботах не продемонстровано практичну апробацію цього підходу та його взаємозв’язок із засобами технологічного оснащення. Можливим шляхом подолання цієї проблеми є застосування технології прототипування відповідно до рекомендацій [127].

В свою чергу цифрова модель формується на основі АЕ виробу, побудованого за аксіомами метричної геометрії Евкліда, Гільберта або Біркгофа [17, 34]. Наявність АЕ спрощує контроль за допомогою технологій РІ шляхом сканування реально існуючого АК та порівняння отриманого портрета з АЕ. Водночас така технологія дозволяє отримати лише геометричні та формові характеристики дослідного об’єкта, при цьому залишається невизначеним питання достатності цих даних для оцінки адекватності контролю. Це обґрунтовує необхідність проведення подальших досліджень у даному напрямку.

5.1.2 Створення портрета залізу кіля легкого літака

В якості досліджуваного АК обрано заліз кіля легкого літака (обшивка) з полімерних композиційних матеріалів (рис. 5.1).



Рис. 5.1 – Заліз кіля легкого літака [233]

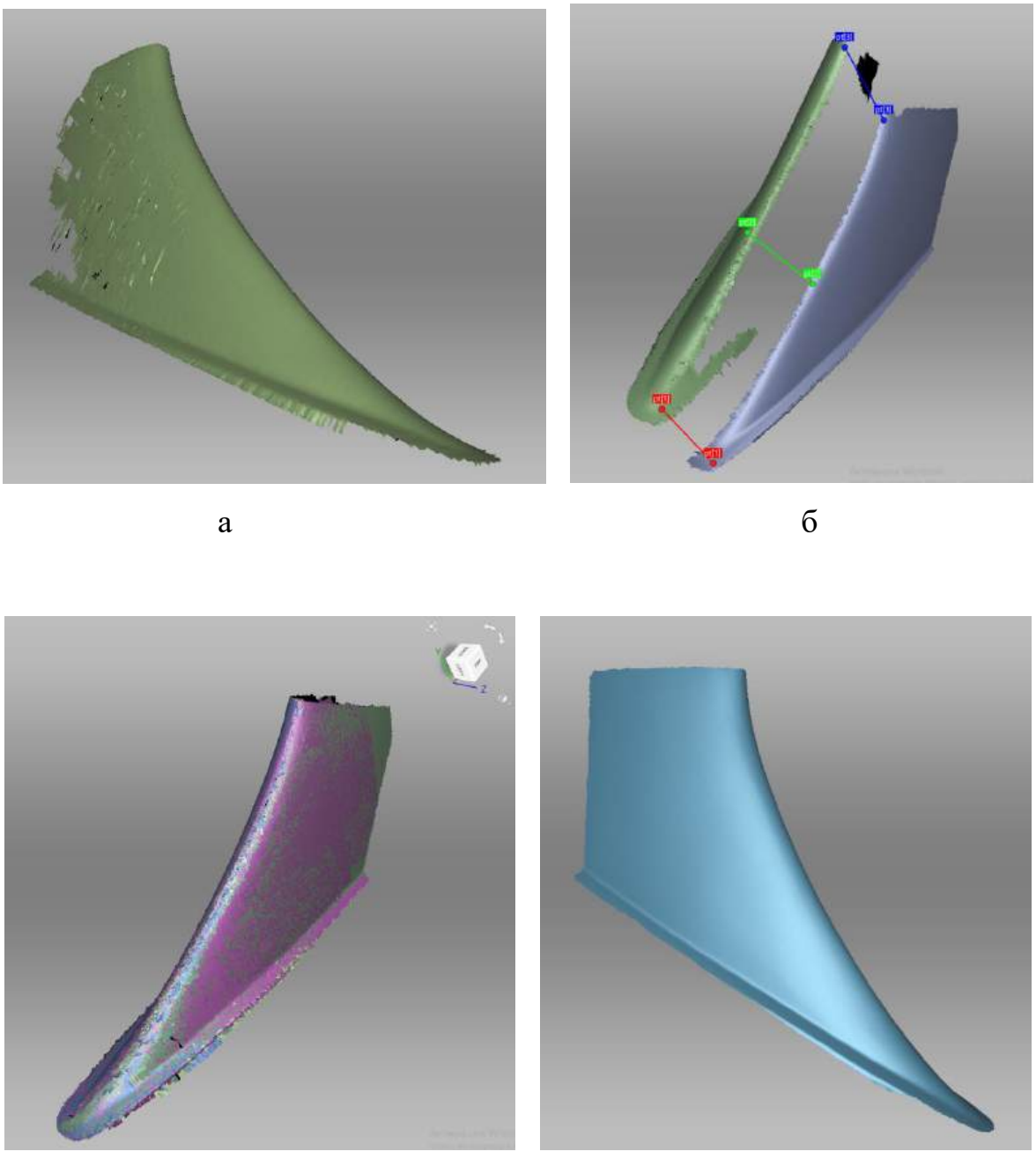
Для проведення контрольних вимірювань використано тривимірний портативний сканер Eva Lite виробництва Artec (США) (рис. 4.23, а). Обраний сканер працює за методом структурованого білого світла та забезпечує високу точність відтворення геометрії поверхні дослідного об’єкта, формуючи його цифровий портрет [20]. Отримані дані вимірювань цифрового портрета досліджуваного об’єкта зазвичай не містять топологічної інформації, тому були перетворені у файли сітчастої структури з трикутними елементами (формат «STL»). Наступним етапом виконано експорт файлу «*.STL» та подальше моделювання у доступному форматі програмного забезпечення: у вигляді сукупності поверхонь на основі неоднорідних раціональних сплайнів NURBS або як твердотільну модель у CAD-системах (SolidWorks, CATIA, Geomagic Design X тощо, США) [22–23]. При виборі обладнання для сканування кіля були враховані такі критично важливі чинники: точність вимірювання, мінімальний розмір об’єкта для сканування, портативність пристрою та сумісність із основними форматами цифрових моделей (табл. 5.1).

Табл. 5.1 – Основні характеристики сканера Eva

Характеристика	Значення
Точність вимірювання	0,1 мм
Роздільна здатність	0,5 мм
Мінімальний розмір об’єкта, що сканується	100 мм
Утримання траєкторії без маркерів	за формою
Швидкість зчитування	16 кадрів/с
Формати на виході	STL, OBJ, PLY, BTX та ін.
Маса сканера	0,9 кг

Для тривимірного сканування та подальшої обробки отриманих даних у ході досліджень використовувалося програмне забезпечення Artec Studio. За його допомогою було сформовано кілька сіток поверхні кіля, які надалі об’єднувалися внутрішніми алгоритмами програми в єдину сітку – портрет у форматі STL для подальшого використання у CAD-середовищі.

На рис. 5.2 представлено етапи сканування кіля та формування його портрета у вигляді полігональної сітки.

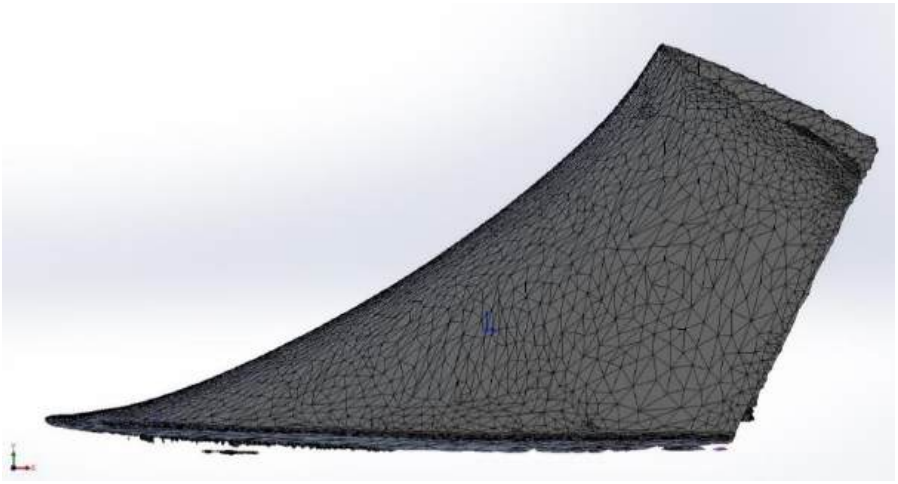


а б в г

а – отримання сканів; б – поєднання отриманих сканів;
в – первинна обробка сканів; г – створення портрета кіля

Рис. 5.2 – Етапи створення портрета залізу кіля легкого літака

Вибір Artec Studio обґрунтований повною сумісністю з обраним сканером, високою продуктивністю та оптимізацією для сучасних комп’ютерних систем, а також наявністю повного функціоналу для реалізації процедур сканування та обробки тривимірних моделей. Для створення 3D-моделі з файлу «*.STL» було обрано програмний пакет SolidWorks завдяки його інструментам для редагування ScanTo3D та можливостям конвертування таких файлів в твердотільну модель (рис. 5.3).



а



б

а – полігональна сітка файлу «*.STL»;

б – перетворений файл «*.STL» в файл «*.cdw»

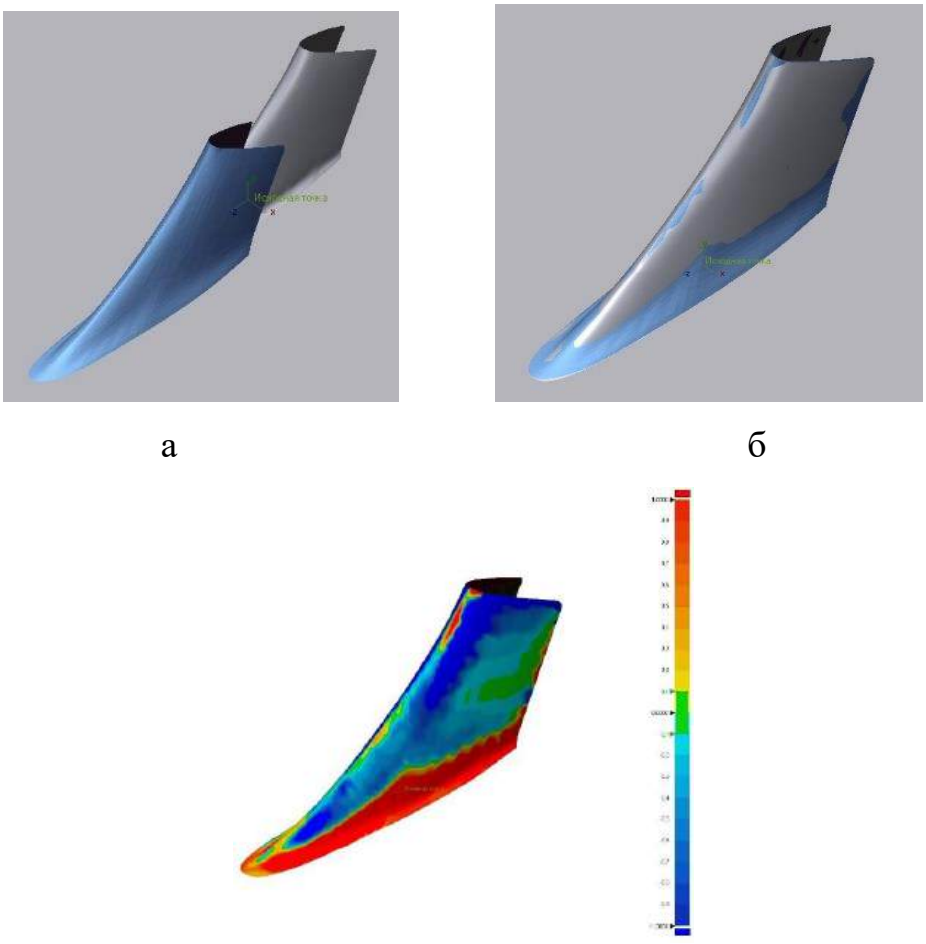
Рис. 5.3 – Створення 3D-моделі залізу кіля легкого літака в SolidWorks

Слід зазначити, що під портретом залізу кіля розуміється його аналітичний портрет, який представляє собою математичну модель у термінах аналітичної геометрії та містить дані щодо форми та розмірів кіля у CAD-середовищі.

Доказ ідентичності кіля до АЕ реалізовується шляхом контролю, тобто співставлення його аналітичного портрета, отриманого скануванням, з АЕ.

5.1.3 Реалізація контролю та порівняння геометрії форм АЕ з портретом залізу кіля легкого літака

Для контролю точності залізу кіля легкого літака була використана програма Geomagic Control X (США) (рис. 5.4).



а б в

а – первинне положення моделі відносно еталону; б – суміщення 3D-моделі й АЕ; в – візуальне відображення результатів контролю

Рис. 5.4 – Етапи контролю точності залізу кіля

З метою імпорту даних у середовище програми твердотільна 3D-модель конвертована в формат «*.STL». Варто уточнити, що перетворення 3D-моделі в полігональну сітку не є поверненням її до того ж вигляду, в якому вона була до оброблення в програми SolidWorks. Фактично, заліз кіля розбивається на простіші елементи зі збереженням геометрії, на відміну від сітки, утвореної на основі сканів. АЕ залізу кіля має формат X_T (формат ядра геометричного моделювання Parasolid).

В ході аналізу даних, наведених у сформованому звіті з програми Geomagic Control X, була підтверджена наявність суттєвих похибок в точності виготовлення залізу кіля легкого літака. Тобто максимальна позитивна похибка дорівнює +5,39 мм, а негативна складає –5,26 мм. При цьому середні значення не були настільки критичними: +0,94 мм та –0,65 мм для позитивної та негативної похибки відповідно. Але більш суттєву роль мала відносна площина залізу кіля, зайнята поверхнею, що знаходиться за межами поля допуску: цей показник дорівнював 85 %. Тобто майже весь заліз кіля мав великі відхилення від АЕ, за яким він виготовлений.

5.1.4 Аналіз отриманих результатів та надання рекомендацій щодо забезпечення заданої геометричної точності залізу кіля легкого літака

Враховуючи отримані результати контролю залізу кіля, де діапазон похибок становив від –5,26 мм до +5,39 мм, було надано пропозицію щодо контролю технологічного оснащення, за яким заліз кіля було виготовлено. Це необхідно, щоб встановити причини браку кіля: в технології його виготовлення або в неточності формоутворюючих поверхонь засобу технологічного оснащення. В цьому випадку виключенням становлять зношені залізи кіля, що підпадають під ремонт [234, 235, 236].

Результати контролю засобу технологічного оснащення за допомогою сканування показали ідентичність з результатами контролю отриманими з залізу кіля, що свідчить про знос форми. Було запропоновано виготовити нове технологічне осна-

щення не зі склопластику, який широко використовується для таких АК у виробництві, а з органопластику. Основним критерієм вибору органопластику були більша міцність та менша маса в порівнянні зі склопластиком та відсутність відволожування. Нове технологічне оснащення складалося з матриці та складового пуансону, де їх формоутворюючі поверхні були побудовані на базі існуючого АЕ залізу кіля (рис. 5.5).



а б



в г

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

Рис. 5.5 – Технологічне оснащення для виготовлення залізу кіля:

Після проведення замірів засобів технологічного оснащення з органопластику виявлено, що формоутворюючі поверхні технологічного оснащення з органопласт-

тику мали відповідні до АЕ форми та розміри і позбавлені неточностей попереднього варіанту.

Діапазон похибок відхилень від АЕ залізу кіля, виготовленого за технологічним оснащенням з органопластику, становив від –0,51 мм до +0,34 мм, а відносна площина залізу кіля за межами поля допуску, не перевищувала 15 %. Ці результати показали адекватність їх параметрів та позитивність прийнятого рішення з виготовлення засобів технологічного оснащення з нового матеріалу – органопластику.

Отже, результатами впровадження технології РІ для забезпечення заданої геометричної точності залізу кіля легкого літака стало виготовлення нових засобів технологічного оснащення (матриці та пуансону) з іншого матеріалу (органопластик). Основною і базовою інформацією в операціях контролю таких технологій є наявність даних аналітичної геометрії – еталону поверхні. Особливістю запропонованого підходу є можливість поновлення АЕ за наявним реально фізично існуючим дослідним зразком. Вирішення такої задачі передбачає відновлення АЕ за отриманою інформацією з геометрії портрета . Якщо порівнювати обсяг інформації АЕ дослідного зразка та його портрета , то останній містить інформацію виключно для виконання операцій контролю, обсяг якої істотно менше, ніж містить відповідний еталон. Слід враховувати також і обмеження при побудові АЕ. Створення моделі дослідного зразка необхідно виконувати за вимірами координат точок на поверхні дослідного зразка в тій же системі координат, що і майбутній АЕ. З цих причин побудова АЕ залізу кіля за портретними даними слід виконувати з урахуванням його майбутнього методу виготовлення, а саме: даних аеродинаміки, міцності, похибок методу ув’язування та ін. Власне складність створення АЕ і є його незначним недоліком. Полегшити задачу можливо лише використанням новітніх CAD-систем на базі аналітичної геометрії за теоріями сплайн-функцій, що повинно бути, перш за все, виправданим у виробництві. Сплайн в даному випадку з’єднує між собою точки поверхні дослідного зразка та утворює аналітичну геометрію і впливає на його точність. Тому забезпечення заданої точності геометрії та форм на базі технологій РІ неможливий без використання поглиблених теорій сплайн-функцій, CAD-систем та програм на їх основі, а також сучасних технічних рішень у виробництві.

5.2 Удосконалення технології прототипування повітряного гвинта

На сьогоднішній момент існують АК пострадянського простору, які раніше виготовляли за шаблонною технологією і які досі знаходяться в експлуатації, що супроводжується постійною підтримкою їх життєвого циклу ремонтами, замінами деталей та/або механізмів. Останнє найчастіше потребує оцифровування та прототипуваня, що в свою чергу спрощує питання відновлення втраченої документації та переведення на інформаційні технології виготовлення таких виробів з використанням верстатів із ЧПК і CAD/CAM-систем.

Як було зазначено в попередніх розділах 3-4, 3D-сканування – це один із важливих етапів РІ, оскільки оброблені відсканованої поверхні дають змогу одержувати з високою точністю портрет досліджуваного об'єкта, що стає основою для створення 3D-моделі у програмах CAD (SolidWorks, CATIA, Geomagic Design та ін.) для операцій контролю шляхом порівняння з АЕ досліджуваного об'єкта або для безпосереднього відновлення АЕ, про що більш детально сказано в попередніх розділах 1-2.

В операції контролю основним є визначення відхилення форми реального профілю від еталонного по нормалі до еталонного профілю в межах нормованої ділянки (рис. 1.26) [3]. Метою операцій контролю є встановлення факту знаходження цих відхилень у межах заданого допуску, чому, наприклад, не відповідають значення δ_1, δ_2, δ_3 і δ_4 (рис. 1.26). Виконання таких процедур на робочому місці викликає певні труднощі, особливо за складнопрофільної форми деталі, такої як у повітряного гвинта (ПГ), коли наявними у виробничому підрозділі засобами необхідно будувати нормалі до поверхні АЕ з виміром відстані до точок реальної поверхні.

На рис. 5.6 представлено блок-схему визначення АЕ ПГ з об'єднаними прямим і зворотним завданнями. Перед виготовленням ПГ необхідно виконати проєктувальні розрахунки з метою отримання його геометрії, для чого, виходячи з технічного завдання, визначають аеродинамічні характеристики профілів, виконують розрахунок і визначення геометрії ПГ у програмному комплексі XFOIL (рис. 5.6) [5, 6, 7, 8].

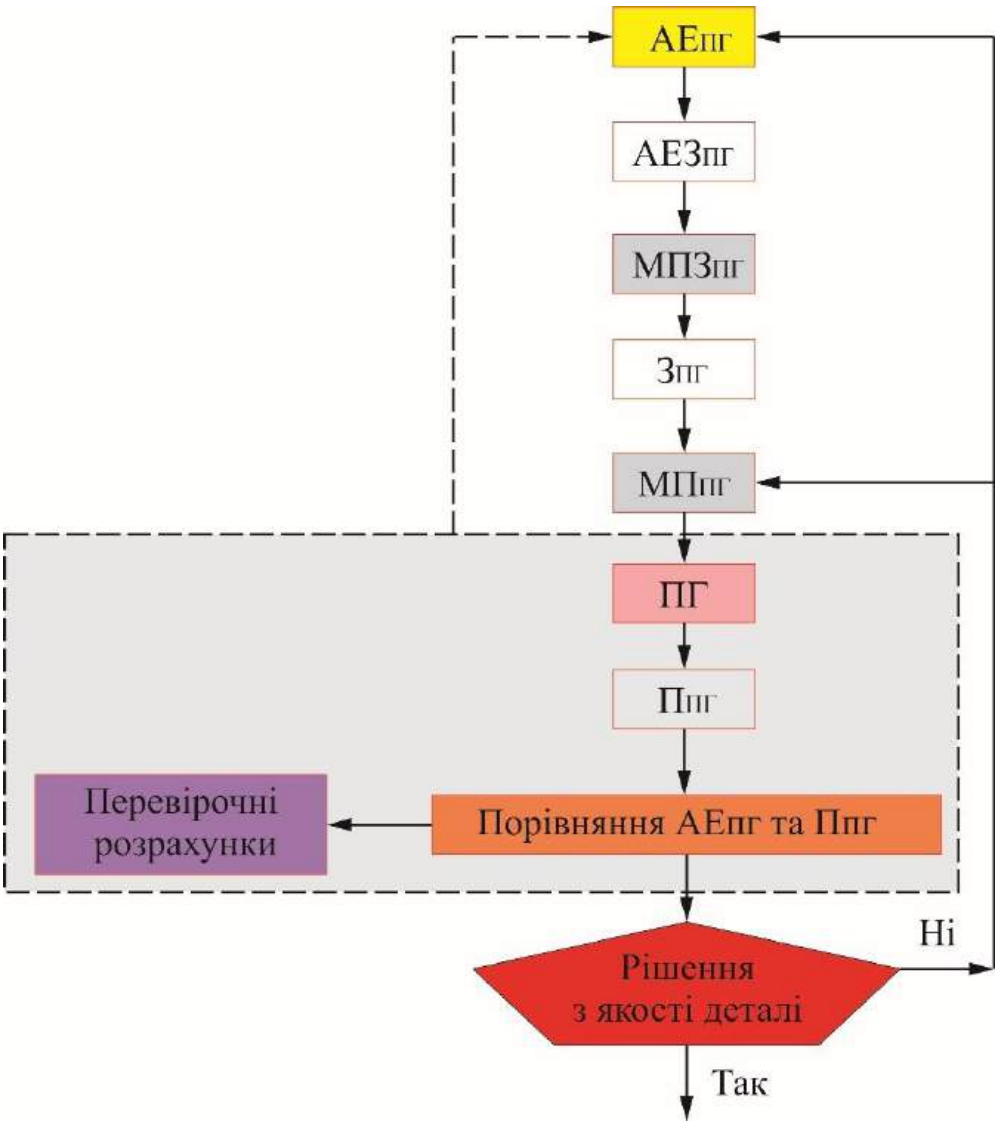


Рис. 5.6 – Схема вирішення прямого і зворотного завдань формоутворення повітряного гвинта

Потім відбувається формування АЕ заготовки ($АЕ_{ЗПГ}$) за інформацією $АЕ_{ПГ}$ геометрії ПГ.

Наступним етапом вирішення прямої задачі формоутворення є отримання виробу за наявним АЕ. Для реалізації цієї задачі з використанням, наприклад, лезового оброблення обирають обладнання, інструмент, спосіб кріплення матеріалу в стані постачання і розробляють моделі процесу отримання заготовок ($МП_{ЗПГ}$), на підставі якої виготовляють заготовку й остаточну деталь.

Зворотне завдання формоутворення реалізується в операціях РІ за необхідно-

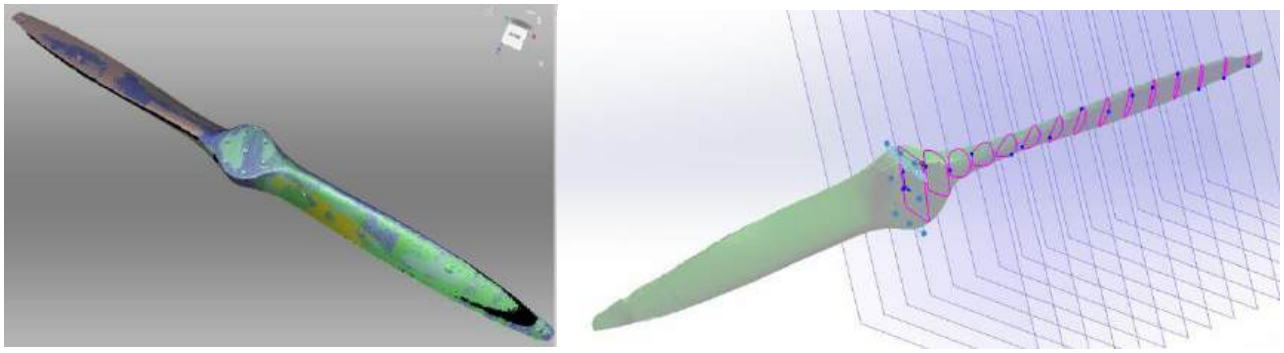
сті відновлення аналітичних даних гвинта $АЕ_{ПГ}$ за результатами вимірювань з готового виробу ПГ, де будують портрети геометрії гвинта ($П_{ПГ}$), визначають характерні перерізи профілів лопаті, визначають координати профілів тощо з побудовою 3D-моделі ПГ для відтворення інфомації $АЕ_{ПГ}$ та коригуванням моделей процесу виготовлення ПГ з подальшим запуском у виробництво.

Зворотне завдання формоутворення реалізовується і в операціях контролю готового виробу ПГ шляхом порівняння його портрета $П_{ПГ}$, отриманого 3D-скануванням, з аналітичним еталоном $АЕ_{ПГ}$. За результатами контролю з урахуванням перевірочного розрахунку ухвалюють рішення про якість виготовленої деталі, і в разі позитивного рішення завдання формоутворення вважається виконаним, в іншому разі може бути виконано коригування $АЕ_{ПГ}$ і $МП_{ПГ}$. У цьому розділі представлено результати контролю геометрії виготовленого дерев'яного ПГ надлегкого двомісного літака [4, 9]. 3D-сканування здійснювалося за допомогою лазерного сканера EVA фірми Artec з відтворенням хмари точок – портрета в програмі Artec Studio 12.

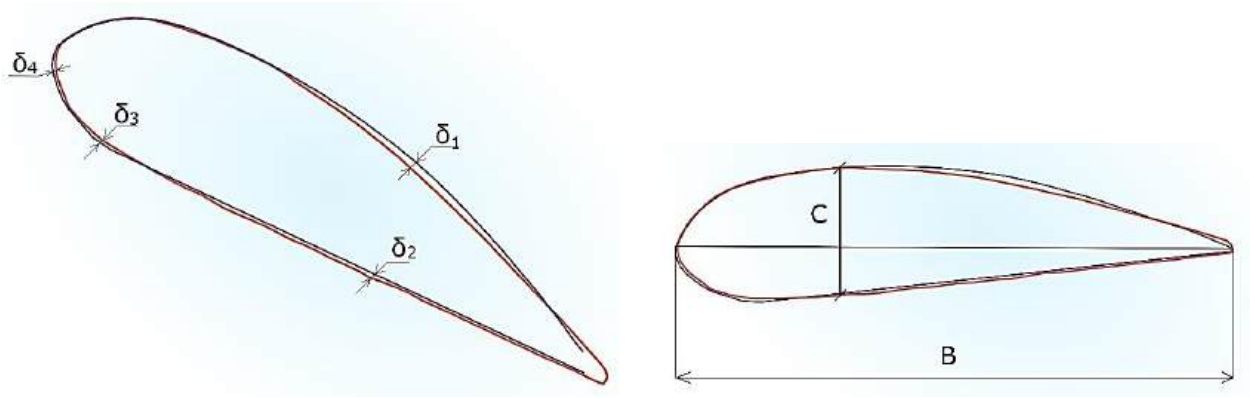
На рис. 5.7 показано РІ в операціях контролю.

Рис. 5.7 демонструє: відсканованої поверхні ПГ, зібрані заздалегідь до формування файлу «*.STL» (а); створення єдиної поверхні ПГ у SOLIDWORKS (б) та визначення контрольних перерізів профілів; відхилення геометрії виготовленого гвинта (портрета), отриманого на підставі 3D-сканування, від контрольних перерізів профілів ПГ $АЕ_{ПГ}$ (в, г).

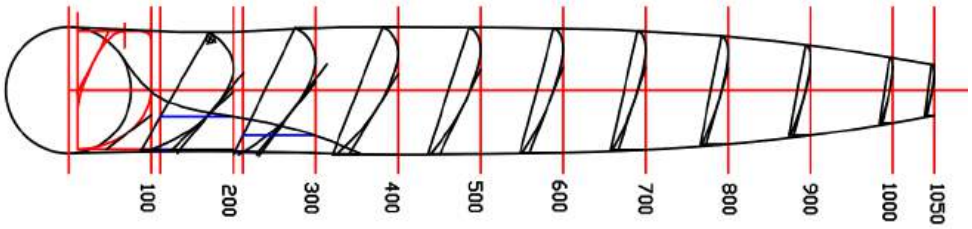
Результати вимірювань зведено в табл. 5.2, де показано дані відхилень геометрії відносних максимальних товщин перерізів С до відповідних хорд перерізів В виготовленого гвинта від теорії аналогічного співвідношення С/В в основних перерізах профілів, починаючи з радіусом перерізу лопаті 200 мм з кроком 100 мм, включно з крайнім розміром 1050 мм (рис. 5.7). Зазвичай для визначення даних відхилень геометрії поверхні деталі формується модель як різниця координат еталона і портрета в кожній точці еталонної моделі. Порівняння моделі із заданими конструктором значеннями допусків дають змогу ухвалити рішення про якість макрогеометричних параметрів. Аналогічним чином виконується порівняння і всіх інших характеристик деталі, описаних АЕ для прийняття рішення про її якість.



а б



в г



д

а – портрети $П_{ПГ}$; б – створення єдиного портрета з розташуванням контрольних перерізів профілей; в – відхилеення в контрольному перерізі профілю; г – параметри C і B в профілях перерізів, що контролюються; д – контрольні перерізи профілей $АЕ_{ПГ}$

Рис. 5.7 – РІ в операції контролю ПГ

Зазвичай для визначення даних відхилень геометрії поверхні деталі формується модель як різниця координат еталона і портрета в кожній точці еталонної моделі. Порівняння моделі із заданими конструктором значеннями допусків дають змогу ухвалити рішення про якість макрогеометричних параметрів.

Табл. 5.2 – Геометричні дані гвинта

Радіус перетину лопаті, мм	Відхилення геометрії виготовленого ПГ від його $AE_{ПГ}$, мм	Відносна товщина перерізу *C/B* за ПГ	Відносна товщина перерізу *C/B* за $AE_{ПГ}$
200	0,136	0,272	0,27163
300	–6,43	0,182	0,1945
400	1,02	0,1534	0,165185
500	–2,14	0,1241	0,12682
600	4,86	0,1156	0,11024
700	–0,56	0,1	0,10056
800	0,56	0,0955	0,09497
900	9,11	0,0982	0,09
1000	19,14	0,1012	0,08494
1050	36,9	0,1129	0,08247

Аналогічним чином виконується порівняння і всіх інших характеристик деталі, описаних АЕ для прийняття рішення про її якість.

На сьогоднішній момент, сучасне обладнання, що використовується під час РІ, вирішує відтворення геометрії досліджуваного об'єкта практично з точністю до 0,01 мм, а наявність аналітичного еталона в програмах CAD унеможливлює необхідність матеріальних витрат на додаткове виготовлення шаблонного оснащення.

Аналізуючи дані табл. 5.2, можна зробити висновок, що портрет ПГ і його АЕ мають незначні відхилення з точністю до 0,01 мм, і пояснюється це таким чином:

– допущено неточності під час технології виготовлення самого гвинта;

– було використано велику кількість відсканованих портретів поверхні ПГ з метою підвищення загальної точності, що призвело до збільшення трудомісткості та місцевої втрати геометрії під час їхнього оброблення.

Аналіз отриманого портрета також показав синусоїдальний характер задньої

кромки гвинта у фронтальній площині, що може бути наслідком помилок або в початкових проєктних розрахунках його характеристик та/або в недотриманні технології виготовлення. В результаті можна зробити рекомендаційний висновок про необхідність проведення додаткових проєктних розрахунків з метою уточнення теорії геометрії гвинта і технології його виготовлення відповідно до запропонованої блок-схеми (рис. 5.6).

Представлена технологія контролю виготовленого гвинта надлегкого двомісного літака наочно демонструє багаторазове використання та важливість правильно спроєктованого АЕ, оскільки інформація, закладена в АЕ, є основою для технології виготовлення та контролю на всіх етапах виробництва з використанням розв'язання тривимірних задач, в тому числі і з використанням гіперсингулярних інтегралів [232]. Результати контролю на всіх етапах виготовлення деталей АК для покращення оцінки та прийняття рішень щодо подальшого допуску до виробництва або експлуатації можливо отримати за допомогою кольорової палітри [233].

5.3 Розробка програмного модуля автоматизованого формування монолітних панелей з керуванням їх форми методом прототипування

Інтегральні панелі АК дозволяють поліпшити конструктивні, технологічні та експлуатаційні показники виробу завдякисвоєї монолітності та рівномірності розподілу внутрішніх напружень і властивостей матеріалу. Однак вони мають і ряд недоліків, серед яких складність забезпечення геометричної точності при формуванні таких великогабаритних інтегральних панелей. Тому пропонується використовувати контроль на базі методу сталого PI, де отриманий портрет з кожного етапу формування порівнюється з АЕ панелі. В цьому випадку для таких складних і опукло-вгнутих форм рекомендується використовувати КВМ разом із 3D-сканером.

5.3.1 Методи формування і контролю інтегральних панелей, що застосовуються на виробництві

Методи формування і контролю, що застосовуються на виробництві, мають низьку продуктивність, вимагають застосування складного обладнання, а контроль

поверхневої форми після формування також недосконалий [237, 238]. У застосовуваних технологічних методах складним питанням є моделювання деформації швів поверхні панелі, отворів і кромок на етапах технологічного процесу, що має кілька переходів [239, 240, 241]. Раніше для управління формою використовувалися просторові носії форм і розмірів, наприклад, координатний стенд, оснащений набором шаблонів перерізів.

При виготовленні панелей і облицюванні наразі застосовуються технологічні процеси багатоточкової локальної деформації [242], що виконують на етапах попереднього (чорнового) формування і остаточного доопрацювання панелі та дозволяють значно поліпшити якість одержуваної профільно-формоутворюючої поверхні цільної панелі і підвищити точність її виготовлення. Підвищення продуктивності може бути досягнуто завдякивикористання пристроїв, що дозволяють управляти панельною формою безпосередньо під час формування після закінчення чергового проміжного етапу [243, 244].

При локальному точкоутворенні можна значно зменшити площу деформації і кут вигину завдякивикористання схеми з двома крутними моментами, прикладеними до двох ділянок ребра і спрямованими один до одного. Це дає змогу значно зменшити площу деформації, а значить, і кута вигину під навантаженням і кута пружиніння [245, 246]. У той же час застосування систем контролю форми при формуванні і обробленні суцільних панелей в заготівельних і штампувальних цехах залишається досить обмеженим у зв’язку з відсутністю методів і пристосувань для реалізації процесу.

При обробленні форми панелей складної і опукло-вгнутої форми виникає необхідність проведення процесу методом послідовних наближень. Це досягається шляхом чергування ряду кроків. На першому етапі шляхом послідовної деформації відповідно до методики розрахунку впливу проводиться ряд дій по всій площі панелі пропорційно кожному краю. Далі вимірюється форма і розраховується необхідна поправка на зменшення. Виходячи з результатів вимірювань, на наступному

етапі проводиться корекція шляхом застосування необхідної кількості впливів. Потім процес повторюється і форма панелі допрацьовується відповідно до технічних вимог.

Результати формування послідовним ступінчастим методом мають найкращі показники за відхиленнями від теоретичного контуру і відносною хвилястістю. Це дає підстави рекомендувати ступінчастий метод для використання при формуванні панелей зі складною формою, особливо подвійної кривизни, коли в процесі формування кривизни збільшується жорсткість полотна панелі [247, 248, 249, 250]. Таким чином, даний метод реалізується за умови швидкого отримання портрета деталі 3D-сканування, аналізу контролю (суміщення портрета з АЕ), розрахунку необхідних додаткових дій, виконання дій і проведення чергового наближення.

Отже послідовність дій на кожний етап формування великогабаритних інтегральних панелей АК пропонується наступна:

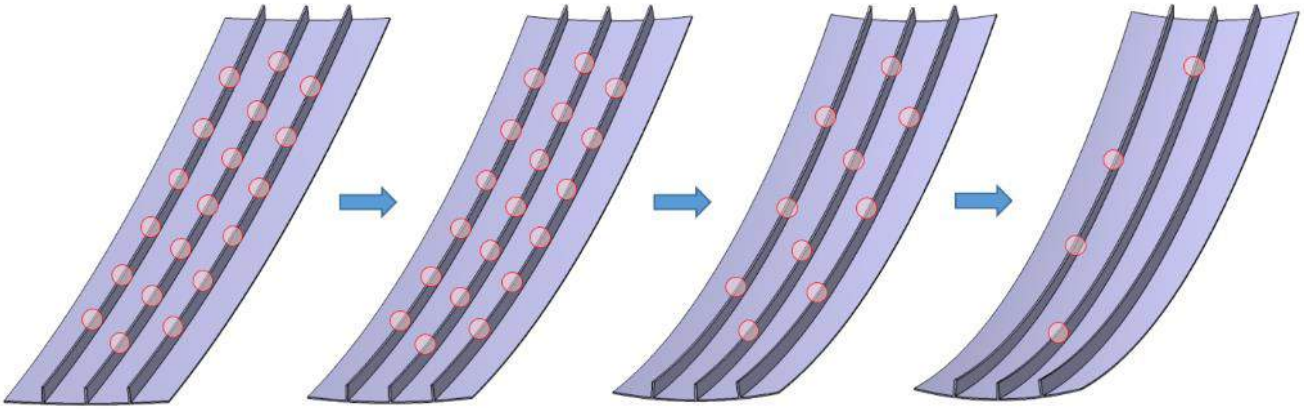
1. Формування форми локальними силами при формуванні подвійної кривизни панелі.
2. Контроль форми за допомогою КВМ і 3D-сканеру – порівняння отриманого портрета з АЕ панелі.
3. Коригування зусиль локального формування відповідно даних контролю геометрії за РІ.

5.3.2 Опис пропонованої технології процесу формування великогабаритних монолітних панелей АК

В даний час авіаційним підприємствам не вистачає технологічних засобів і обладнання для формоутворення, доведення і контролю форми монолітних панелей на всіх етапах їх виробництва. Технологічні режими формування цілісних панелей також до кінця не вивчені і тому нові методи використовуються в промисловості з великою обережністю.

Одним з проблемних питань є виконання панелі подвійної кривизни з плоскої заготовки з ребрами жорсткості. Як правило, авіабудівні підприємства виготовляють цю заготовку з плити або профілю на 3-координатних верстатах з ЧПК. Для

отримання цієї панелі місцева деформація проводиться послідовно, а локальні точкові ефекти накладаються у вигляді послідовних ступенів, що охоплюють всю поверхню панелі, що проілюстровано на рис. 5.7 з розрахунку достатності чотирьох етапів формування [251].



а б в г

а – етап 1; б – етап 2; в – етап 3; г – етап 4

Рис. 5.7 – Схема послідовного ступінчастого методу отримання панелі подвійної кривизни шляхом багатоточкової локальної деформації [251]

Після завершення кожного етапу деформації будуються цифрові портрети панелей $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$. Кожен портрет порівнюється з відповідним АЕ. Якщо відхилення у всіх контрольованих точках не перевищує допустиме відхилення, відбувається перехід до наступного етапу. В іншому випадку виконуються коригувальні дії, розраховані керуючою програмою. У розглянутій задачі для побудови портретів була використана технологія лазерного сканування.

Схема процесу представлена на рис. 5.8, на якій зображено застосування контролю форми в реальному часі [252].

Використання монолітних панелей в якості вихідних даних на етапах 1–4 (рис. 5.8) дозволило розробити програмний модуль автоматизованого формування монолітних панелей з керуванням їх формою за допомогою портретів $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$.

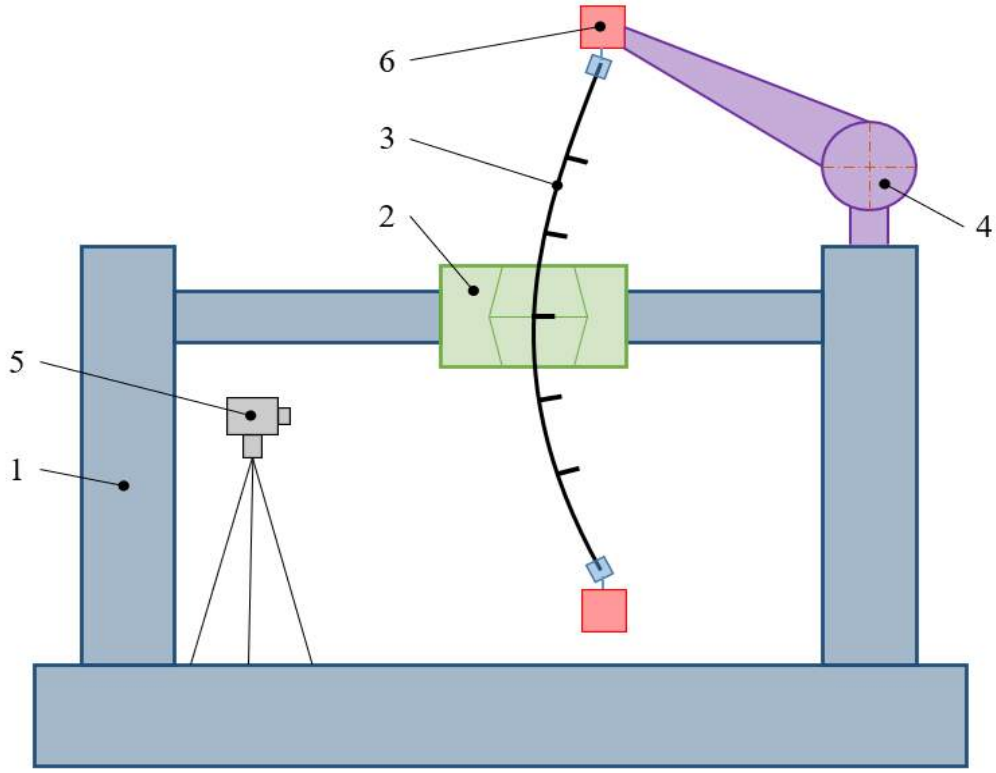


Рис. 5.8 – Принципова схема автоматизованого формування інтегральних панелей з керуванням формою за допомогою 3D сканера: 1 – консольний прес; 2 – розводильний пристрій з вигином; 3 – деформуюча панель; 4 – роботизована рука з п’ятьма ступенями свободи; 5 – 3D сканер; 6 – допоміжний пристрій [252]

Для контролю форми рекомендується використовувати об’ємні 3D-сканери, що дозволять порівнювати отримані тривимірні аналоги з реальними об’ємними моделями у форматі стереолітографії (точкова дифузія у форматі STL). Зазначимо, що доступна на ринку лінійка 3D-сканерів дає змогу повністю оцифрувати великогабаритні інтегральні панелі площею 50-100 м^2 за досить короткий час (6-10 годин) з високою точністю (5 ... 10 мкм) [245, 252]. А сучасне програмне забезпечення дає змогу не тільки обробляти 3D-модель, але і порівнювати її з базовою моделлю, створеною конструктором за допомогою CAD/CAM/CAE-систем, вирішуючи проблему контролю якості на виробництві, що в свою чергу спрощує формування дослідних панелей при забезпеченні вимог точності [252].

5.3.3 Теоретичні засади пропонованої технології формування великогабаритних монолітних панелей АК

На сучасному етапі вони використовуються для оцифрування і вимірювання, контролю точності виготовлення листових штампованих виробів, ливарних форм, пластмасових виливків, штампів, пуансонів та ін. 3D-сканери з успіхом замінюють контактні контрольно-вимірювальні машини, широко поширені у вітчизняному виробництві [6]. Спеціальне програмне забезпечення дає змогу швидко розрахувати відхилення від заданої форми у всіх точках на поверхні. Відхилення точок поверхні візуалізуються за допомогою діаграм відхилень або графічних дисплеїв. Формування форми і фінішної обробки панелі за допомогою 3D-сканера в системах автоматизованого проєктування (САПР) може бути відображена у вигляді схеми, наведеної на рис. 5.9.

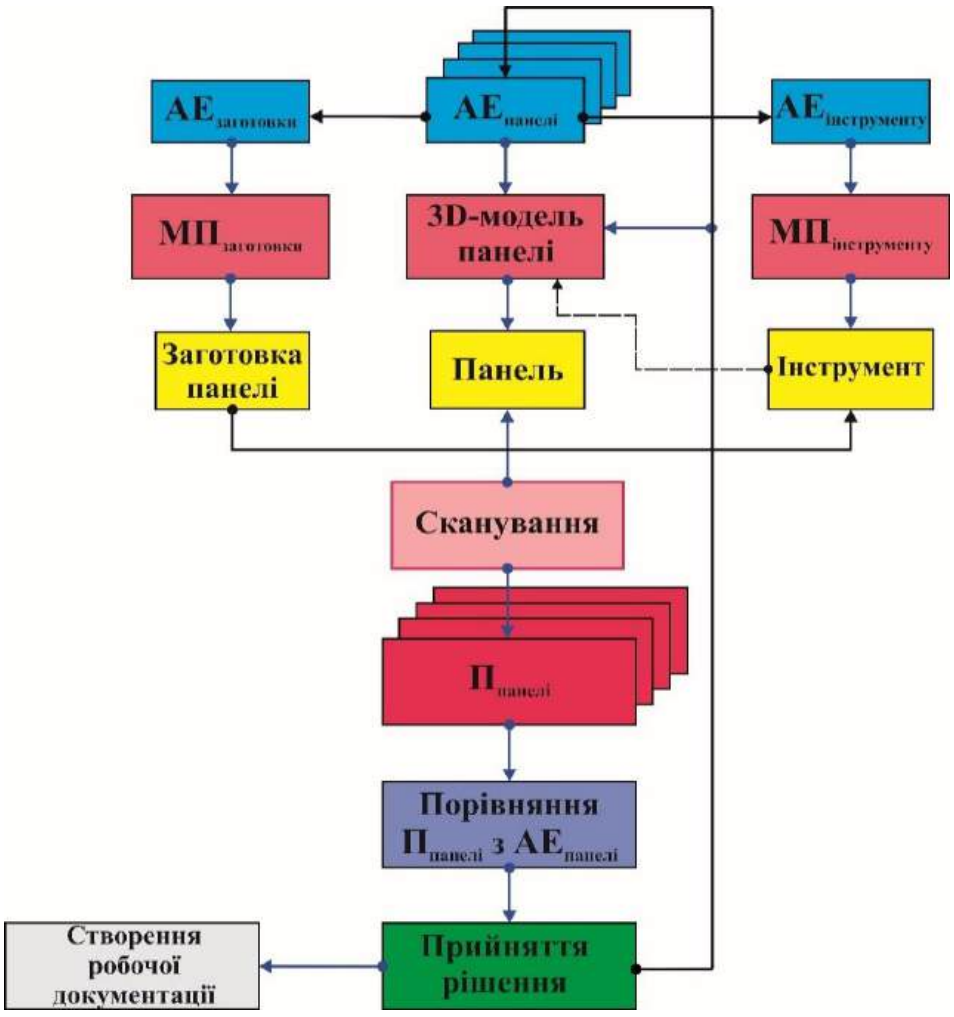


Рис. 5.9 – Схема формування форми та фінішної обробки панелі за допомогою 3D-сканера в системі CAD / CAM / CAE

Очевидно, що використання цих систем дозволить підвищити ефективність роботи на ділянках з використанням CAD / CAM технологій.

3D-сканери можуть використовуватися для великогабаритних деталей, коли вимірювальна частина встановлена на маніпуляторі і переміщається уздовж деталі. При цьому можливе вимірювання досить великих деталей до декількох десятків метрів (з відповідною розбивкою на частини за допомогою спеціальних маркерів).

Завдання, що стоять перед сучасним авіаційним виробництвом, включають в себе оцифрування, вимірювання і контроль якості великогабаритної продукції різної конфігурації, в тому числі деталей для заготівлі і штампувального виробництва [7].

Дані вимірювань 3D-сканерів містять не тільки інформацію про поверхню довільної форми, що складається з сотень тисяч точок, але і визначення елементів деталей, таких як отвори і грані.

Результати 3D-сканування вже використовуються для таких завдань:

– створення даних про поверхню об'єкта для комп'ютерної моделі з використанням CAD та аналізу методом скінченних елементів;

– порівняння реального об'єкта з даними систем автоматизованого проєктування, кресленнями або зразком;

– швидке дублювання деталей (швидке прототипування або фрезерування);

– отримання даних для PI.

Обсяг вимірювань може бути адаптований до розмірів об'єкта в будь-який момент часу. Тому одна і та ж система може бути використана для оцифровки мікроелектронних компонентів і планера з високою роздільною здатністю. Абсолютна точність досягає 5 мкм і залежить від розмірів об'єкта і умов роботи в цеху [8].

Багатодоступні CAD та аналітичні системи забезпечують інтерфейс для масиву точок, які є вихідними даними систем оцифрування. Дані вимірювань з високою роздільною здатністю можуть бути миттєво відображені у вигляді візуалізованих або затінених поверхонь. Використовуючи такі детальні дані, користувач може

визначити набагато більш якісне тривимірне зображення, ніж це було можливо за допомогою поперечних перерізів.

При вимірюванні великих об'єктів для отримання високої точності координати цих маркерів можуть бути попередньо визначені за допомогою цифрової камери з високою роздільною здатністю та фотограмметричного програмного забезпечення Tritop.

Система постійно контролює як власне калібрування, так і вплив зовнішніх умов, забезпечує надійність, точність і швидкість вимірювань навіть в жорстких виробничих умовах.

Дані вимірювань можуть бути виведені в декількох стандартних форматах, таких як IGES, а також набір точок VDA, ASCII, STL. Стандартне програмне забезпечення також підтримує створення даних поперечного перерізу для інших типів лазерних систем у порівнянні з механічними системами, які засновані на принципі безконтактних вимірювань. Вони також забезпечують більш високу швидкість сканування і не пошкоджують поверхню сканованих моделей.

Для того, щоб надати форму та завершити цілісні панелі, був створений автоматизований комплекс, який також використовує 3D-сканер, що забезпечує контроль форми панелі в режимі реального часу [252].

Дані з 3D сканера у вигляді портретів відправляються на комп'ютер, де порівнюються з даними, що описують необхідну форму панелі, а потім, відповідно до технологічних рекомендацій, призначаються додаткові коригувальні дії для отримання високої точності форми панелі [8].

5.3.3 Підтвердження теоретичних засад технології формування великогабаритних монолітних панелей АК

Основним елементом цього процесу є пристрій для редагування та доопрацювання панелей, який встановлюється в руку робота-маніпулятора. Призначення останнього полягає в розташуванні пристрою в потрібній точці на панелі по нормалі до дотичної площині в точці додавання певної дії на лицьовій поверхні

панелі. Тут призначення опорного пристрою полягає в тому, щоб виключити дію масових сил на пружну деформацію самої монолітної панелі.

З метою забезпечення високої точності формування великогабаритних монолітних панелей, незалежно від відхилень розмірів поперечного перерізу ребер і поверхні після механічної обробки, підвищуються вимоги, що стосуються як якості зовнішньої поверхні панелі, яка виходить в результаті процесу формування, так і безпосередньо до форми панелі управління процесом на всіх етапах її виготовлення.

Для визначення відповідності геометричних параметрів виробу проєктному значенню конструкторська документація передається на виробництво в зручному для комп'ютера вигляді – у вигляді 3D-моделі або AE, що представляє собою тривимірне зображення математичної моделі об'єкта, описаного з високою точністю в просторі за допомогою координованих поверхонь, ліній і точок, побудований з використанням принципів тривимірної параметризації.

На реальному виробництві використання стандартів цифрової геометрії дає змогу користувачеві відмовитися від виготовлення дорогих моделей поверхні, використовувати литий метод для виготовлення робочих заготовок і штампів і приступити до виготовлення профіліоформоутворюючих елементів і різних видів необхідного обладнання з використанням верстатів з ЧПК.

Можливості комп'ютерної техніки привели до створення сучасних промислових вимірювальних систем, що дозволяють користувачеві отримувати, обробляти і аналізувати інформацію, необхідну для контролю якості вимірюваних деталей складної форми на відповідність отриманих поверхонь їх аеродинамічним нормативам.

Інтеграція сучасних координатно-вимірювальних і обчислювальних комплексів (МСС) в технологічні методи виготовлення деталей складної форми, а також з використанням можливостей автоматизованих систем класу CAD / CAM / CAE / PLM, дає змогу реалізувати процес наскрізного проєктування, виготовлення та контролю великогабаритних елементів зі складною геометрією.

Відповідно до вихідних геометричних параметрів досліджуваної монолітної панелі було визначено положення панельної системи координат, а також розроблено схему взаємного зв'язку системи координат панелі з глобальною системою координат при обробці отриманих даних вимірювань.

Після виконання відповідного етапу оздоблювальних операцій по вимірюванню отриманих геометричних параметрів панелі, досліджуваний зразок був взятий за основу вимірювального столу в трьох заздалегідь визначених точках. На кожному етапі локальної деформації панелі за допомогою ROMER Absolute Arm 7525SI шляхом вказівки необхідних контрольних точок на поверхні панелі задавалося положення початку координат панелі та її базової площини XY.

Процедура визначення системи координат виробу, в якій забезпечуються всі вимірювання, називається «математичним вирівнюванням» і виключає необхідність механічного вирівнювання об'єкта випробування. Вимірювання геометричних параметрів панельного зразка проводилися після кожного планованого технологічного етапу локальної деформації досліджуваної монолітної панелі.

Програмний комплекс для комплексного аналізу геометрії об'єкта PC-DMIS дає змогу оператору виконувати геометричні вимірювання об'єкта, обробляти результати вимірювань, формувати звіти будь-якої складності, будувати поверхні та елементи на основі хмарного набору оцифрованих даних, порівнювати з CAD-моделлю, аналізувати отримані відхилення, похибки тощо.

Для експорту результатів вимірювань в зовнішні програмні продукти використовуються різні формати даних залежно від типу використовуваного програмного забезпечення і методів подальшої обробки результатів вимірювань досліджуваного об'єкта. Так при передачі даних в текстовому вигляді використовується формат ASCII, а для готових звітів - різні графічні формати для зберігання растрових зображень (BMP, JPEG, TIFF). Для отримання протоколу вимірювань у вигляді готового текстово-графічного документа використовуються кросплатформні формати електронних документів PDF або PostScript. Експорт отриманих цифрових даних про рельєф поверхні механічно сканованих виробів за допомогою CAD-систем, що використовуються у виробництві, здійснюється в наступних

зовнішніх форматах даних, стандартизованих національними або міжнародними організаціями:

– IGES (початкова специфікація обміну графіками) (рис. 5.10, б);

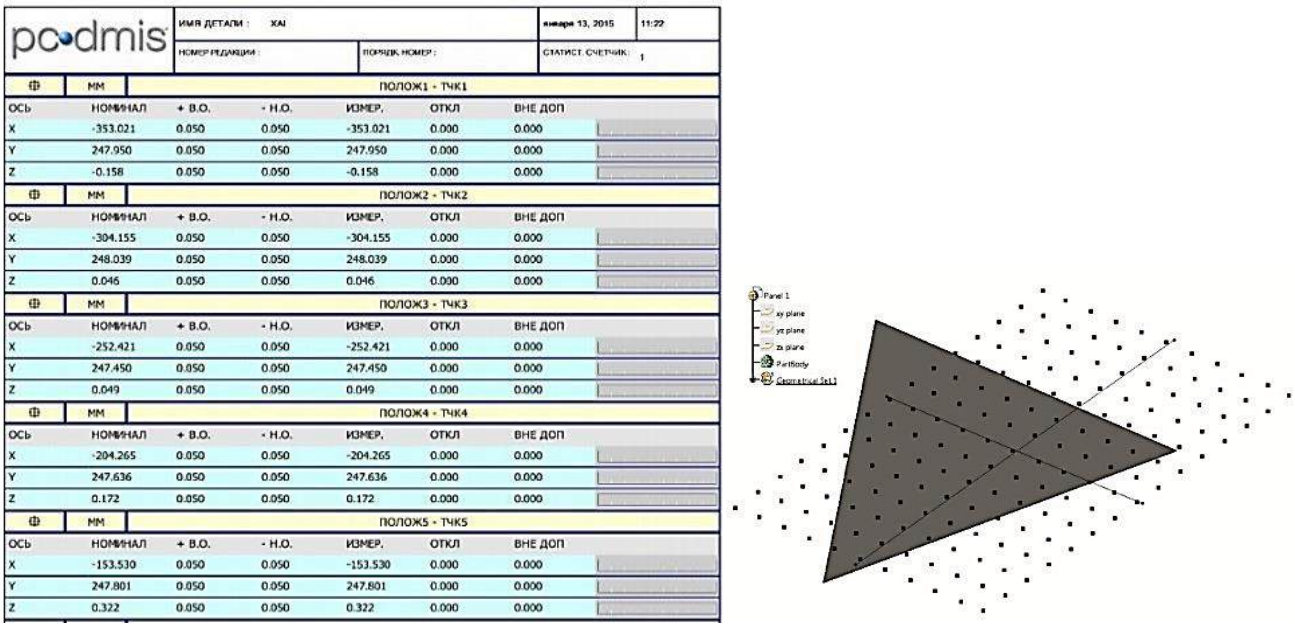
– STEP (стандарт обміну даними про моделі товару);

– SET (стандарт експангу та переведення);

– VDA-FS (Асоціація наземного інтерфейсу німецької автомобільної промисловості);

– SAT/SAB (стандартний текстовий/двійковий файл ACIS).

Дані вимірювань контрольних точок її обхідно-формувальної поверхні, отримані для всіх етапів формування тестового зразка панелі, виконаної в роботі за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, були експортовані та збережені у форматах IGES (рис. 5.10, б) і DXF, STP та PDF (рис. 5.10, а).



pc-dmis

ИМЯ ДЕТАЛИ : XAI — января 13, 2015 — 11:22

НОМЕР РЕДАКЦИИ : — ПОРЯДК. НОМЕР : — СТАТИСТ. СЧЕТЧИК : 1

ПОЛОЖ1 - ТЧК1

ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
X	-353.021	0.050	0.050	-353.021	0.000	0.000
Y	247.950	0.050	0.050	247.950	0.000	0.000
Z	-0.158	0.050	0.050	-0.158	0.000	0.000

ПОЛОЖ2 - ТЧК2

ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
X	-304.155	0.050	0.050	-304.155	0.000	0.000
Y	248.039	0.050	0.050	248.039	0.000	0.000
Z	0.046	0.050	0.050	0.046	0.000	0.000

ПОЛОЖ3 - ТЧК3

ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
X	-252.421	0.050	0.050	-252.421	0.000	0.000
Y	247.450	0.050	0.050	247.450	0.000	0.000
Z	0.049	0.050	0.050	0.049	0.000	0.000

ПОЛОЖ4 - ТЧК4

ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
X	-204.265	0.050	0.050	-204.265	0.000	0.000
Y	247.636	0.050	0.050	247.636	0.000	0.000
Z	0.172	0.050	0.050	0.172	0.000	0.000

ПОЛОЖ5 - ТЧК5

ОСЬ	НОМИНАЛ	+ В.О.	- Н.О.	ИЗМЕР.	ОТКЛ	ВНЕ ДОП
X	-153.530	0.050	0.050	-153.530	0.000	0.000
Y	247.801	0.050	0.050	247.801	0.000	0.000
Z	0.322	0.050	0.050	0.322	0.000	0.000

а б

а – у вигляді готового текстово-графічного документа PDF; б – імпортовані в систему CAD з використанням формату IGES

Рис. 5.10 – Дані вимірювань контрольної точки, що контуроутворюють поверхню досліджуваної монолітної панелі [251]

На основі даних вимірювань обрисоутворюючої поверхні в роботі застосовано процес зворотного інжинірингу, який дає змогу перетворити отримані набори

дискретних оцифрованих точок в моделі гладкої поверхні для візуалізації та аналізу якості вимірюваної поверхні панелі, визначення характеру і відхилень величини координат контрольних точок від номінальних значень для кожного етапу формування монолітної панелі, що досліджується.

В даний час найбільш привабливим способом представлення поверхонь з точки зору їх реконструкції в промислових додатках є представлення NURBS, яке використовується в програмному забезпеченні для промислового проєктування CATIA, NX, Pro / Engineer, SolidWorks, Gemma, Kompas-ZD і т.д.

Для обробки отриманих даних вимірювань поверхні контуру досліджуваної панелі використовувалася система CATIA V5.

Процес обрисоутворюючої реконструкції досліджуваної монолітної панелі за результатами її вимірювань можна представити у вигляді послідовності наступних основних етапів.

Першим етапом є імпорт оцифрованих даних вимірювань об'єкта в робоче середовище використовуваної САПР системи.

Результати вимірювань контрольних точок поверхні панелі за допомогою стандарту передачі даних IGES були імпортовані в середовище Shape Design & Freestyle системи CATIA V5 у вигляді «хмари» точок, що описують форму панелі на певному етапі її деформації. Використання формату IGES дає змогу передавати інформацію про положення початкової точки обраної панелі системи координат у вигляді двох пересічних ортогональних ліній. У систему імпортується також базова площина X'Y ' системи координат панелі, яка в поєднанні з параметрами початкової точки описує положення «хмари» точок вимірюваної поверхні панелі щодо глобальної системи координат для кожного розглянутого випадку зміни форми монолітної панелі, що досліджується.

Другий етап – обробка імпортованих даних вимірювань.

Положення і правильність орієнтації «хмари» точок системи координат поверхні панелі щодо системи координат залежить від вибору точок базування вибірки на вимірювальному столі, а також від положення контрольних точок на поверхні панелі, які визначають положення початку координат панелі і її базової

площини X'Y'. Для зручності аналізу даних вимірювань, а також для більшої інформативності отриманих результатів в роботі, за допомогою необхідних перетворень (поворотів і зсувів), система координат панелі була суміщена з глобальною системою координат.

Третій етап – створення електронної моделі фізичного об'єкта.

За допомогою універсального інструменту Power Fit модуля Quick Surface Recovery, що використовується для відновлення поверхонь будь-якого типу, на основі імпортованих в систему точок, отриманих на кожному етапі формування панелі, створюються тривимірні електронні поверхні NURBS, що описують фізичну форму контурної поверхні монолітної панелі, що вивчається після відповідного етапу її деформації. Поверхні, відновлені за допомогою команди Power Fit, можуть бути побудовані в двох основних режимах: в межах заданих граничних кривих або у вигляді великої чотирикутної поверхні, яка примикає до «хмари» точок і контуру із заданою точністю.

З огляду на габаритні розміри досліджуваного зразка, а також параметри обраної маркувальної сітки, для реконструкції був використаний другий режим побудови обхідних поверхонь досліджуваної монолітної панелі.

В якості контрольного параметра використовувалося тільки відхилення точок реконструйованої поверхні від базової «хмари» точок. Кількість сегментів поверхні та їх черговість для кожного випадку будівництва система розраховувала автоматично.

З урахуванням вимог до якості побудови електронної моделі обрисоутворюючої поверхні досліджуваної монолітної панелі всі реконструйовані в роботі поверхні конструюються з відхиленням від базової «хмари» точок не більше ніж на 10-4 мм.

Використовуючи портрети, реконструйовані для кожного етапу формування панелі, за допомогою інструменту Deviation Analysis [8-10] модуля Quick Surface Reconstruction було проведено аналіз зміни геометричної форми панелі при її деформації.

Для керування зміною форми обхідно-утворюючої поверхні монолітної панелі, показаної на рис. 5.11, в результаті зміни її форми в якості номінальної моделі використовується зовнішня поверхня заготовки панелі, яка після виконання операції вирівнювання систем координат збігається з площиною XY глобальної системи координат.



Рис. 5.11 – Зразок монолітної панелі подвійної кривизни, що формується та контролюється за PI

Завдяки об'єднанню процесів проєктування (CAD), виробництва (CAM) і контролю якості готової продукції (CAQ) в одному інформаційному середовищі, а також завдяки збільшення швидкості внесення змін на будь-якому етапі підготовчого виробничого циклу продукції досягається значне скорочення часу, необхідного для виконання роботи, при цьому підвищується якість і конкурентоспроможність.

При апробації пропонованої технології формування монолітної панелі були досягнуті наступні результати: час формування панелей подвійної кривизни довжиною 5,5 м і шириною 1,1 м з контролем форми за допомогою 3D-сканера становить 5–6 годин; час фінішного оброблення панелей становить 1–2 години. Зазначемо, що при формуванні допускалися відхилення 0,7 ... 0,9 мм від заданої поверхні, а після фінішної обробки форми 0,3 ... 0,5 мм.

Нижче представлено порівняльні результати за одним із етапів контролю.

На рис. 5.12 показано графічне порівняння портрета зовнішньої сторони панелі з АЕ послідовного деформування на одному з етапів формування панелі подвійної кривизни.

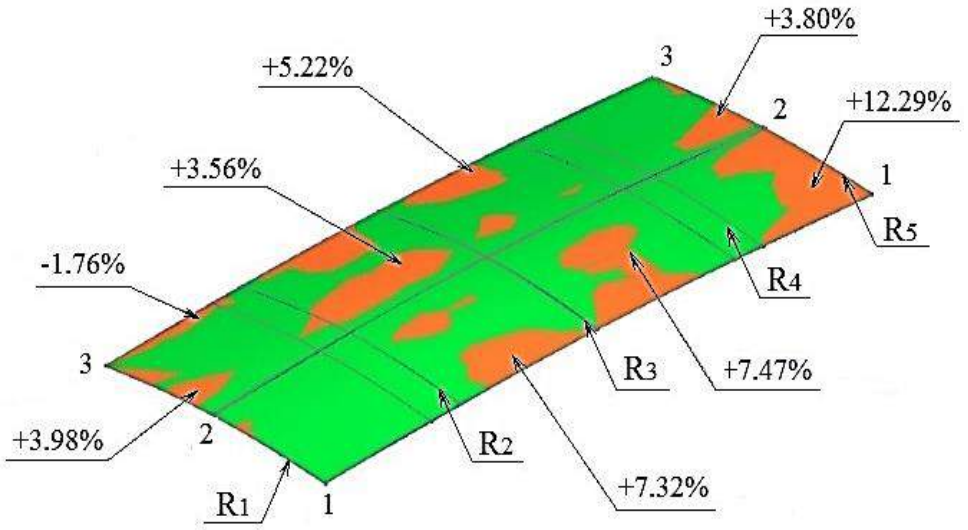


Рис. 5.12 – Графічне порівняння портрета панелі з АЕ на одному з етапів її формування

На відміну від розрахунково-графічного методу, графічний метод дає наочне уявлення про розподіл відхилень по поверхні.

Для забезпечення точності сканування на панель були нанесені спеціальні маркери для забезпечення її геометричної однорідності. Результатом сканування та обробки є STL-файл, який був використаний для вимірювання контрольних ділянок та порівняння їх з еталонною геометрією.

Ділянки, які відрізняються від АЕ панелі в межах допуску, виділені зеленим кольором, тоді як ділянки панелі, які мають великі відхилення і потребують доопрацювання, виділені помаранчевим кольором.

Видно, що найбільші відхилення спостерігаються на краях панелі, а скручування поверхні спостерігається на ділянці з найбільшим відхиленням (12,29%).

Розрахункові значення відхилень були отримані шляхом порівняння заданих радіусів кривизни панелей та отриманих шляхом сканування (табл. 5.3).

Для розрахункового методу були виміряні радіуси кривизни поперечних (R_1...R_5) і поздовжніх ($R_{1\text{-}1}$...$R_{3\text{-}3}$) перерізів панелей.

Обчислені відхилення (табл. 5.3) апроксимуються у відсоткових значеннях відхилень по радіусах контрольних ділянок досліджуваної панелі.

Табл. 5.3 – 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

Розподіл відхилень зумовлений появою сумарної похибки вимірювання, випадковою складовою якої є шум, що виникає при отриманні порових характеристик. Що стосується сканування, то ця панель має складну геометрію через свою однорідність, і найбільші труднощі виникають при порівнянні портретів під час сканування.

5.3.4 Перспективи удосконаленої технології формування монолітних панелей

Експериментальна перевірка викладених положень проводилась на зразках панелей повнорозмірного перерізу та великогабаритних панелей (рис. 5.11) і показала позитивність результатів, що підтвердило адекватність теоретичних засад технології формування великогабаритних монолітних панелей.

Отже підвищення точності зовнішньої поверхні великогабаритних монолітних панелей, незалежно від відхилень розмірів поперечного перерізу ребер і поверхні після їх механічного оброблення, можливе завдяки реалізації інформаційної підтримки процесу вимірювання форми виробу в реальному часі.

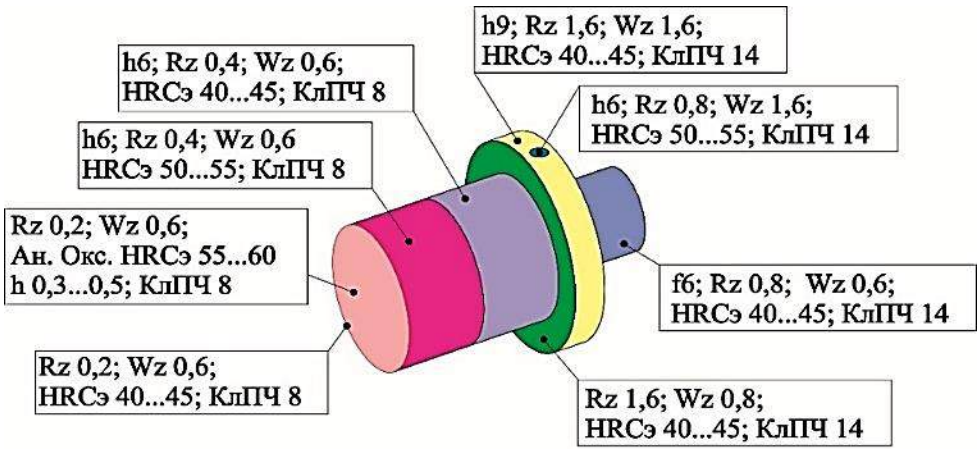
Для неглибоких деталей великих габаритів краще використовувати 3D-сканери, коли вимірювальна частина встановлюється на маніпулятор і переміщується вздовж деталі. В цьому випадку можна вимірювати досить великі деталі з відповідним поділом на ділянки за допомогою спеціальних маркерів. Такий підхід дозволив розробити програмний модуль для автоматизованого формування монолітних панелей з контролем їх форми за портретами на кожному етапі формування, який може бути задіяний для контролю геометрії у всіх дослідженнях життєвого циклу виробу АК.

Завершення програми досліджень і розробка серійної технології дасть можливість накопичити статистичні дані, які складно отримати на етапі експериментальної роботи через високу вартість зразків монолітних панелей. Отримані в цьому випадку результати додатково скоротять основний час на формування панелей на 25 ... 30% і забезпечать стабільність процесу.

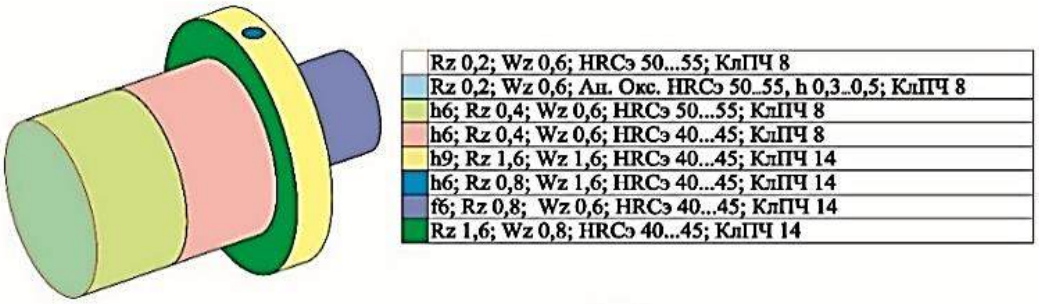
5.4 Рекомендації щодо вирішення завдань формоутворення з використанням технології PI під час технологічного підготовлення виробництва

Аналіз заходів щодо технологічного підготовлення машинобудівного виробництва дозволив дійти висновку про домінантну значущість процесів формоутворення деталей механічним обробленням, які можуть бути реалізовані шляхом вирішення прямих та зворотних завдань [5, 57]. Зазначимо, що проблема полягає у відсутності механізму їх коректної постановки для забезпечення якості виробів при виконанні підготовлення виробництва в умовах промислових підприємств, інформаційному супроводженні цих процесів, наявності та ефективному застосуванні економічно виправданих інструментальних засобів. Формування АЕ деталі (рис. 2.1 і 2.5) дає змогу розробникам виробу оперативно і без зайвих витрат труда надавати потрібну інформацію учасникам життєвого циклу виробу.

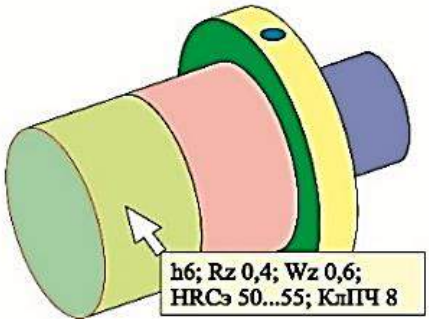
Для зручності сприйняття користувачами цієї інформації, форми її подання можуть бути різними, що й показано на рис. 5.14.



а



б



в

а – все одночасно; б – у вигляді таблиці; в – показ при наведенні мишкою

Рис. 5.14 – Форми подання $AE_Д$ [5]

Отже технологічний процес повинен містити опис змін дослідного АК виробництва у часі, що визначає необхідність розроблення моделей формоутворювальних процесів зміни об'єкта від стану заготовки до готової деталі, виконання технологічних вимірювань для отримання її портрета і порівняння з АЕ у межахпроцедур контролю (рис. 5.15).

Укрупнена першочергова послідовність формування моделей досліджуваної деталі АК (рис. 5.15) складається з:

– АЕ деталі ($АЕ_Д$ – модель 5, рис. 5.15), що включає еталонні моделі геометрії поверхонь ($ЕМ_Г$) і кромок ($ЕМ_{КР}$), мікрорельєфу ($ЕМ_{МІКР}$), модель властивостей ($ЕМ_{ВЛ}$), за необхідності їх контролю, та промислової чистоти ($ЕМ_{ПЧ}$);

– вибору устаткування, пристроїв та інструменту з внесенням усієї інформації до їх аналітичних зразків ($АЕ_{УСТ}$, $АЕ_{ПР}$, $АЕ_І$ – моделі 1, 2 і 3, рис. 5.15);

– формування АЕ заготовки ($АЕ_З$ – модель 4, рис. 5.15) за інформацією $АЕ_Д$.

Перший етап вирішення прямого завдання формоутворення зводиться до отримання заготовок за інформацією $АЕ_З$. Для реалізації цього завдання з використанням, наприклад, лезового оброблення необхідно вибрати устаткування, інструмент, спосіб кріплення матеріалу в стані постачання та розробити моделі процесу виготовлення заготовок (моделі 7 – $МП_З$, рис. 5.15). Закінчення побудови $МП_З$ це і буде розв'язання прямої задачі формоутворення заготовки (позиція 13, рис. 5.15).

Потім слід вирішити зворотне завдання формоутворення, де: за результатами вимірювань необхідно побудувати аналітичні портрети заготовок (моделі 18 – $П_З$, рис. 5.15), а для реалізації процедур контролю – необхідно виконати порівняння $АЕ_З$ та їх портретів (модуль 23, рис. 5.15) відповідно формулі 2.1.

Виконання умови (2.1) дасть завершення вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення заготовок (процедура 26, рис. 5.15), що дозволить розпочати другий етап виготовлення деталей за отриманою інформацією $АЕ_Д$ (модель 5, рис. 5.15).

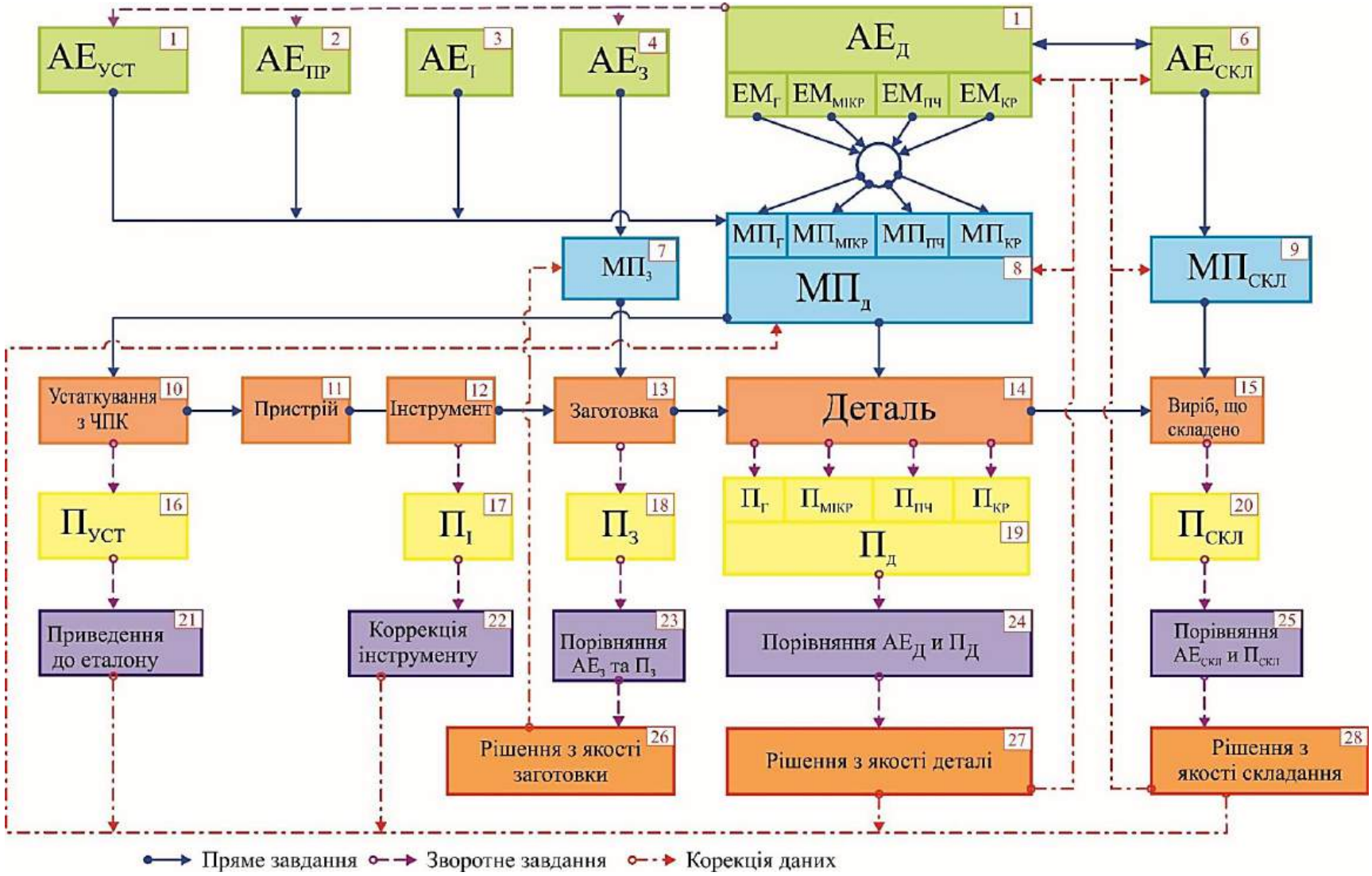


Рис. 5.15 – Інформаційне забезпечення та послідовність вирішення прямих та зворотних завдань формоутворення під час технологічного підготовлення виробництва деталей АК

Для реалізації наступного етапу (другого) слід розробити моделі процесу отримання деталей (модель 8 – $МП_Д$, рис. 5.15) для чого слід використати моделі обраного устаткування ($АЕ_{УСТ}$ – модель 1, рис. 5.15), пристроїв ($АЕ_{ПР}$ – модель 2, рис. 5.15) та інструменту ($АЕ_І$ – модель 3, рис. 5.15).

Якщо як устаткування обрано верстат з ЧПК, то значна частина $МП_Д$ буде полягати в розробленні керувальної програми (КП). При цьому необхідно забезпечити задану геометрію поверхонь ($ЕМ_Г$), кромок ($ЕМ_{КР}$) і їх мікрорельєф ($ЕМ_{МІКР}$), властивості матеріалу, поверхонь та кромок ($ЕМ_{ВЛ}$), промислову чистоту ($ЕМ_{ПЧ}$). Зазначимо, що така постановка завдання затребує проведення аналізу з існуючих на підприємстві технологічних процесів, вибору раціонального варіанту і розроблення моделей процесів, які крім забезпечення необхідних форм і розмірів деталі ($МП_Г$), повинні описати формування кромок ($МП_{КР}$), необхідну шорсткість і промислову чистоту ($МП_{МІКР}$ і $МП_{ПЧ}$). При цьому, слід враховувати, що послідовність реалізації процесів вплине на кінцеву таким чином модель процесу ($МП_Д$ – модель 8, рис. 5.15), що повинна забезпечити виготовлення деталі у відповідності з її АЕ, де як критерій відповідності використовуються обмеження щодо якості поверхневого шару та промислової чистоти деталей. Оскільки модель процесу формується у середовищі CAD/CAM систем (рис. 5.16), то генерацію необхідної документації, наприклад, технологічних карт слід адаптувати під стандарти підприємства. Зазвичай трудомісткість виконання такої процедури незначна.

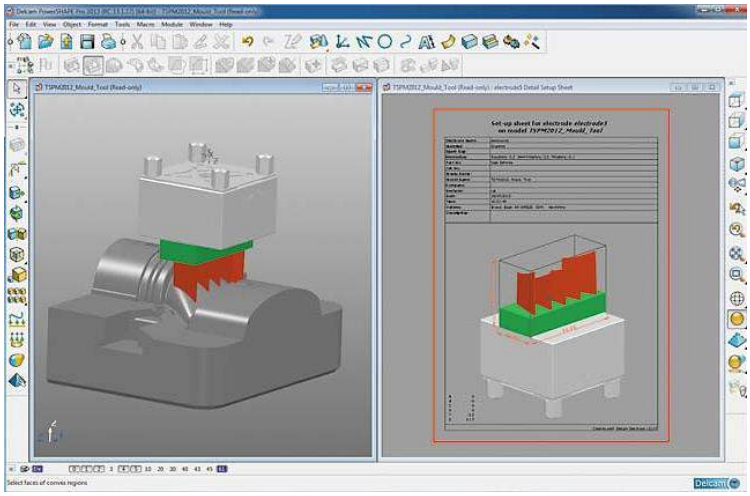


Рис. 5.16 – Розробка моделі процесу виготовлення деталі ($МП_Д$)
у середовищі CAD/CAMсистеми та генерація необхідної документації [5]

Присутність кромок у опису конструкції деталі вказує на особливі функції, які вона повинна виконувати. АЕ таких деталей має включати сукупність моделей, які описують специфічні вимоги до поверхонь і кромок ($ЕМ_Г$, $ЕМ_{КР}$, $ЕМ_{ВЛ}$, $ЕМ_{ПЧ}$, тощо). Це пояснюється тим, що значущість забезпечення заданих параметрів визначить успіх експлуатації вузла, механізму чи всього виробу. Тому для гарантованої реалізації такого комплексу вимог під час розроблення $МП_Д$ слід вирішити зворотне завдання – побудувати $АЕ_З$ за інформацією $АЕ_Д$ (див. п.п. 2.2). Першим кроком його вирішення мають бути саме операції з формування кромок. При цьому порядок виконання процедур необхідно розпочинати з фінішних операцій, потім переходити до чистових, напівчистових тощо. Однак, звісно завдання має вирішуватися в інформаційному просторі виробничого підрозділу з урахуванням реально наявного устаткування, пристроїв, інструментів. Побудова такої послідовності операцій дозволить отримати вихідні дані та вимоги до $МП_Д$ (тобто й ТП) формування поверхонь, що сполучаються кромками. Реалізація такого підходу дозволить сформувати послідовність операцій, що гарантовано забезпечить виготовлення кромки. Крім того, послідовність операцій формування кромки стане вихідною інформацією для розроблення операцій (і їх послідовності) виготовлення поверхонь, що сполучаються. Наступним стане формування сукупності та послідовності операцій виготовлення деталі, які є інформаційною основою побудови технологічної системи (ТС). Потім слідує вирішення зворотних завдань формоутворення з метою виконання контрольних операцій. Якщо під час виготовлення деталей використовували устаткування з ЧПК, то раціонально виконати на цьому ж устаткуванні вимірювальні процедури, замінивши формоутворювальний інструмент на вимірювальний.

Для реалізації процедури контролю (модуль 21, рис. 5.15) необхідно виконати порівняння $АЕ_Д$ та її портретів геометрії поверхонь і кромок, мікрорельєфу, промислової чистоти та інших фізичних параметрів (моделі 19 – $П_Г$, $П_{КР}$, $П_{МІКР}$, $П_{ВЛ}$, $П_{ПЧ}$, рис. 5.15), які складають портрет деталі ($П_Д$) (моделі 19, рис. 5.15 – $П_Д$) за результатами вимірів та сканування.

Визначення контрольних параметрів буде за процедурою порівняння визначальних параметрів еталонних моделей деталей та їх портретів відповідно до формули 2.2. Як приклад на рис. 2.15, 2.17, 2.31, 2.34, 3.12, 5.4, 5.12 представлено порівняння такої еталонної моделі геометрії та її портрета для різних деталей АК, за результатами якого можна робити висновки про відповідність деталі АК заданим вимогам.

Формування АЕ складеного виробу ($АЕ_{СКЛ}$ – модель 6, рис. 5.15) дозволить оцінити сумісність окремих деталей після їх складання та виконати уточнення моделей окремих деталей. Крім того, процес їх виготовлення $МП_{Д}$ (модель 8, рис. 5.15) врахує їх контактну взаємодію в процесі складання та експлуатації. Тому модель складання $МП_{СКЛ}$ (модель 9, рис. 5.15) необхідна для розроблення процесів технологічного вирішення проблем забезпечення мікрорельєфу, властивостей матеріалу деталей, промислової чистоти та геометрії елементів, що взаємодіють, тому що це пов'язано із забезпеченням розумних вимог до ресурсу виробу за мінімальних витрат на його експлуатацію.

Наприклад, реалізація болтових і заклепкових з'єднань вимагає виконання отворів у деталях. Якість їх поверхневого шару характеризується макро- і мікроструктурою, що значною мірою і визначає довговічність розглядаємого елемента конструкції. Під час утворення отвору свердлінням поверхневий шар зазнає пластичної деформації, впливу високих температур (особливо поблизу різальної кромки), хімічного впливу МОТЗ, занурення продуктів зношування різального інструменту [56, 232, 233, 234]. Як наслідок, властивості поверхневого шару отвору значно відрізняються від властивостей основного матеріалу [246, 247]. Модуль пружності, наприклад, змінюється на 10-15% [248, 249, 250]. Внаслідок нерівномірності деформації структура поверхневого шару може значно змінюватися, зерна витягуватися або подрібнюватися. Нерівномірний температурний вплив викликає температурні залишкові напруження та фазові зміни структур, що стосується і деталей, виготовлених в адитивний спосіб [244, 254, 255]. У разі хімічної дії МОТЗ утворюються окисні та інші хімічні сполуки. Тому способи отримання з'єднувальних отворів безпосередньо впливають на якість виробу, що слід обов’язково враховувати

при інформаційному забезпеченні та послідовності вирішення прямих та зворотних завдань формоутворення під час технологічного підготовлення виробництва.

Представлена послідовність виконання завдань формоутворення та етапів їх підготовлення (рис. 5.15) наочно демонструє багаторазове використання $AE_Д$, оскільки практично в кожному з представлених прямих і зворотних завдань має використовуватися інформація саме таких моделей, що значною мірою сприяє зниженню загальної трудомісткості ТПВ при одночасному зростанні інформативності результату та його наочності [256].

Слід також зазначити, що розроблення $AE_{УСТ}$ з ЧПК у виробничому ланцюгу не потребує великих трудовитрат, оскільки в багатьох CAD/CAM-системах вже сформовані бази з моделями найпопулярнішого устаткування. У більшості систем є можливість створення моделей устаткування, що бракує. Тому після виконання ТПВ в ІС підприємства можуть бути включені всі одиниці устаткування з ЧПК та все технологічне оснащення, що в свою чергу спрощує реалізацію схеми рис. 5.15.

Тому впровадження запропонованої схеми у виробництво АК (рис. 5.15) створить можливість вирішення багатьох завдань з обслуговування формоутворювальних систем, розроблення матеріальних і трудових норм, проведення робіт з розроблення планів-графіків ТПВ, спростить впровадження спроєктованих технологічних процесів, нормалізації та уніфікації технологічного оснащення, модернізації устаткування – тобто створення на підприємстві такої технологічної системи, що гарантує отримання авіаційних виробів високої та, що не менш важливо, стабільної якості під час їх серійного виробництва.

Отже для впровадження і реалізації завдань формоутворення з використанням технології РІ у виробництво АК (за схемою рис. 5.15) рекомендується виконати наступне:

1. Провести аналіз існуючих технологічних ланцюгів та виробничих процесів на предмет вузьких місць, де РІ зміг би підвищити продуктивність виробництва. Визначити тип продукції та деталей (зазвичай криволінійні, складні вироби, які важко обміряти за допомогою стандартного вимірюючого інструменту), де максимально доцільно використовувати 3D-сканування та 3D-моделювання.

Тобто слід визначити, де технологія РІ дозволить скоротити час на проєктування, ремонт та виготовлення деталей та/або виробу АК в цілому. Останнє в свою чергу збільшить економічну ефективність.

2. Визначити «точку входу» РІ в процес: наприклад, ремонтні роботи, контроль якості, проєктування оснастки або відтворення деталей без креслень та опрацювати і створити технологічну послідовність, що влючає вирішення прямих і зворотних завдань РІ, як представлено на рис. 5.15.

3. Після аналізу завдань РІ та КТР деталей (розміри, точності, тип матеріалу тощо) необхідно підібрати обладнання для 3D-сканування (стаціонарні, портативні або ручні 3D сканери), яке відповідало б вимогам виробництва на досліджувану деталь та/або виробу АК.

Примітка – Досвід із РІ показує, що в більшості випадків, якщо номенклатура виробів велика і має дуже велику розбіжність у точності та розмірах, виробнику треба бути готовим до необхідного виробу декількох екземплярів 3D-сканерів.

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

5. Обравши обладнання та програмне забезпечення, наступним стає навчання співробітників: інженерів-конструкторів (створення CAD-моделей), технологів (аналіз і впровадження моделей у CAM), 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 CAD-файлів, створити базу.

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

Для моніторингу ефективності впровадження РІ на виробництві необхідно:

1. Запровадити систему обліку результатів РІ (кількість відновлених деталей, економія часу, усунення дефектів).

2. Регулярно проводити аналіз результатів і зворотній зв’язок від користувачів.

3. У разі появи нових задач та викликів на виробництві вчасно реагувати та коригувати процес або розширювати номенклатуру обладнання для 3D-сканування.

5.5 Висновки за розділом

1. Випробувано технологію РІ для залізу кіля легкого літака на базі сучасного сканеру Eva Lite (фірма Artec, США) з точністю 0,1 мм. Основним фактором з вибору сканеру в даному випадку стали його технічні характеристики з забезпечення необхідної точності саме для залізу кіля легкого літака, де граничні відхилення контуру від теоретичного становлять ±2 мм. Показано, що збереження геометрії та форми реалізовано на базі єдиного формату файлу «*.STL» для різних програмних пакетів CAD-системи.

2. Визначним фактором для реалізації контролю кіля легкого літака та засобів технологічного оснащення є коректне створення портретів, а на їх основі АЕ в CAD-системі. В ході аналізу даних, наведених у сформованому звіті з програми Geomagic Control X, виявлено наявність суттєвих похибок в точності виготовлення кіля легкого літака та існуючих засобів технологічного оснащення. Ці похибки були в діапазоні від –5,26 мм до +5,39 мм, а відносна площина кіля за межами поля допуску дорівнювала 85 %. Такі результати дозволили стверджувати, що засоби технологічного оснащення з полімерних композиційних матеріалів (склопластику), в яких виготовлено заліз кіля, можуть бути відбраковані.

3. Запропоноване рішення з виготовлення нових ЗТО з органопластику показало, що формоутворюючі поверхні технологічного оснащення з органопластику мають відповідні до АЕ форми та розміри і позбавлені неточностей попереднього варіанту. Діапазон похибок відхилень від АЕ залізу кіля, виготовленого за техно-

логічним оснащенням з органопластику, становить від –0,51 мм до +0,34 мм, а відносна площина кіля за межами поля допуску не перевищує 15 %. Це стає можливим саме завдяки забезпеченню заданої геометрії та форм формоутворюючих поверхонь технологічного оснащення з органопластику.

4. Запропоновано та розроблено модель, що поєднує вирішення прямого та зворотного завдань формоутворення для повітряних гвинтів і яка комплексно враховує особливості проєктування, виготовлення та контролю на виробництві. Показано, що до операцій контролю на сучасному рівні залучається РІ, який дає змогу здійснити прототипування поверхні виготовленого повітряного гвинта, створити його точний геометричний портрет. Аналіз результатів контролю (з точністю до 0,01 мм) повітряного гвинта дозволив сформулювати комплексний підхід до технології виготовлення гвинта від корекції геометрії його АЕ до технології виготовлення та контролю.

5. Розроблено програмний модуль автоматизованого формування монолітних панелей з керуванням їх форми за допомогою отриманих портретів кожного етапу формування. Для контролю форми рекомендовано використовувати об’ємні 3D-сканери, що дозволять порівнювати отримані тривимірні аналоги з реальними об’ємними моделями у форматі стереолітографії (точкова дифузія у форматі STL). Такий програмний модуль створено з урахуванням доступної на ринку лінійки 3D-сканерів, які дозволяють повністю оцифрувати великогабаритні інтегральні панелі площею 50-100 м^2 за досить короткий час (6-10 годин) з високою точністю (5 ... 10 мкм).

6. Розроблено схему інформаційного забезпечення та послідовність вирішення прямих та зворотних завдань формоутворення під час технологічного підготовлення виробництва деталей АК. Надано рекомендації впровадження та реалізації прямих і зворотних завдань формоутворення з використанням РІ.

Основні наукові результати, наведені в п’ятому розділі, опубліковано в працях автора [6, 8, 9, 13, 23, 35].

ЗАГАЛЬНІ 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 кромок, 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 раза при розв'язанні зворотного завдання та в 1,5 раза – при розв'язанні 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 ±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 «сходинками», 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 кромок 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 від час створення аналітичного еталону та на його основі 3D-моделей для виробництва деталей авіаційних конструк-

цій, а також під час вибору технології виготовлення деталей авіаційних конструкцій з метою забезпечення вимог до точності та допусків на розміри поверхонь і кромок, 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 ±0,5 мм обґрунтованим є використання технології штампування. При тій же кількості деталей, але точності менше ±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 ±0,5 мм надано рекомендації щодо використання 3D-друку з подальшим ручним зачищенням. При тій же кількості деталей, але точності менше ніж ±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 контркалібрів за даними аналітичного еталона. Доведено, що при використанні калібрів і контркалібрів похибка ув'язування стиків деталі та деталі-прототипу зменшується в 3,78 раза 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз використання технології реверс-інжинірингу / І. В. Бичков, К. В. Майорова, В. Т. Сікульський, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков // Грааль науки. 2023. № 31. С. 258–260.

2. Laser Scanning in Aircraft Construction Electronic resource : website. URL: https:.www.laserscanning-europe.com/en/aircraft-and-ship-building-industry (31.08.2025).

3. Hawryluk M., Ziemba J. Application of the 3D-reverse scanning method in the analysis of tool wear and forging defects // Measurement. 2018. Vol. 128. P. 204–213.

4. Koda company. Products description Construction Electronic resource : website. URL: https:www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1241 (31.08.2025).

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

6. 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 // ΛΌГОΣ : зб. наук. пр. 2020. Vol. 2. P. 31–38. DOI: 10.36074/24.04.2020.v2.09.

7. Quality management systems – Requirements [Electronic resource] : ISO 9001:2015. URL: https:.www.iso.org/standard/62085.html (31.08.2025).

8. Huda Z. Reengineering of manufacturing process design for quality assurance in axle-hubs of a modern car – a case study // International Journal of Automotive Technology. 2012. Vol. 13. P. 1113–1118. DOI: 10.1007/s12239-012-0113-5.

9. ДСТУ ГОСТ 17216:2004. Чистота промислова. Класи чистоти рідин (ГОСТ 17216-2001, IDT) : зі скасуванням в Україні ГОСТ 17216-71 ; чинний від 01.01.2005. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 7 с.

10. Asgharizadeh E., Haghnegahdar L., Ghorbani H. Re-engineering based on using artificial neural networks in manufacturing & production industries // World Applied Sciences Journal. 2011. Vol. 14, № 10. P. 1515–1522.

11. Anwar M. Y., Ikramullah S., Mazhar F. Reverse Engineering in Modeling of Aircraft Propeller Blade – First Step to Product Optimization // IIUM Engineering Journal. 2014. Vol. 15, № 2. P. 43–57.

12. Wróbel K. Expert Systems in the Reengineering of Technological Equipment // Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control. 2020. P. 294–301. DOI: 10.1007/978-3-030-51981-0_37.

13. Yurdakul M., Ic T., Celek O. E. Design of the Assembly Systems for Airplane Structures // Design Engineering and Science. 2021. P. 521–541. DOI: 10.1007/978-3-030-49232-8_18.

14. Xu J., Su H., Zhang H. Research on Design Collaboration of Aircraft Digital Mock up for Suppliers // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2006. P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/2006/1/012066.

15. Method for identifying and counting objects / O. Pohudina, D. Kritskiy, A. N. Bykov, T. Szalay // International Scientific and Technical Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. ICTM'2019 : proceedings, 28–30 Nov. 2019, Kharkiv, Ukraine. Cham : Springer, 2020. P. 161–172. (Advances in Intelligent Systems and Computing. AISC ; vol. 1113, ISSN 2194-5357). DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_15.

16. Set-Based Prototyping with Digital Mock-Up Technologies / B. Toche, R. Pellerin, C. Fortin, G. Huet // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2012. Vol. 388. P. 299–309. DOI: 10.1007/978-3-642-35758-9_26.

17. Toth G. Real Analytic Plane Geometry // Elements of Mathematics. 2021. P. 207–261. DOI: 10.1007/978-3-030-75051-0_5.

18. 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_Кременчук_1_2020.pdf
(07.09.2025).

19. 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.

20. 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.

21. ДСТУ 2498-94. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення : чинний від 1995-07-01. Київ : Держстандарт України, 1995. 111 с.

22. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT+ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT+ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT) : на заміну ДСТУ ISO 4287:2002 та зі скасуванням ДСТУ ГОСТ 25412:2009 ; чинний від 2013-03-01. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.

23. ДСТУ ISO 4288-2001. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури поверхні (ISO 4288:1996, IDT) : чинний від 2003-01-01. Київ : Держстандарт України, 2002. 10 с.

24. Набродов В. З. Допуски, посадки та технічні вимірювання : підруч. для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. Київ : Літера ЛТД, 2019. 224 с. ISBN 978-966-178-867-0.

25. The Tribology Handbook / ed. M. J. Neale. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1995. 582 c.

26. Основи трибології / А. М. Антипенко, О. М. Бєлас, В. А. Войтов, О. С. Вотченко. Харків : ХНТУСГ, 2008. 342 с.

27. Сучасні аспекти трибології у транспортних засобах / В. А. Косенко, Н. Ф. Кущевська, О. Г. Добровольський, В. В. Малишев. Київ : Ун-т «Україна», 2016. 356 с.

28. 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/aktt.2022.4.03.

29. Попов С. М., Антонюк Д. А., Нетребко В. В. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні. Запоріжжя : ЗНТУ, Мотор Січ, 2010. 368 с.

30. ДСТУ 2413-94. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення : чинний від 1995-01-01. Київ : Держстандарт України, 1994. 37 с.

31. Кузьменко А. Г. Теоретическая экспериментальная трибология. В 12 т. Т. 3. Развитие методов контактной трибомеханики : монография. Хмельницкий : ХНУ, 2010. 270 с.

32. ISO 16610-21:2011. Geometrical product specifications (GPS). Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters [Electronic resource]. Geneva : ISO, 2011. URL: https:www.iso.org/standard/50176.html (31.08.2025).

33. ASME B46.1-2009. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) [Electronic resource]. New York : ASME, 2009. URL: http:cstools.asme.org (31.08.2025).

34. Тарасов Н. А., Васюта С. П., Хамула О. Г. Інформаційні технології 3Д моделювання // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології : тези доп. VII Міжнар. наук.-техн. конф., 17–21 трав. 2022 р. Харків : ХНУРЕ, 2022. Т. 1. С. 115–116.

35. ДСТУ ГОСТ 24869:98. Промислова чистота. Загальні положення (ГОСТ 24869:98, IDT) : зі скасуванням в Україні ГОСТ 24869:98 : чинний від 01.09.2000. Київ : Держспоживстандарт України, 2000. 7 с.

36. Состояние проблемы промышленной чистоты машин и механизмов / А. В. Лосев, И. В. Бычков, А. М. Григорович, Н. И. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2017. Вып. 76. С. 57–67.

37. Шипуль О. В. Наукові основи прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами : дис. … д-ра техн. наук : 05.03.07 / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2024. 417 с.

38. Лосева О. А., Бычков И. В., Лосев А. В. Формирование и отделка кромок деталей машин // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. 2013. № 6. С. 74–78.

39. ISO/TC 107. Metallic and other inorganic coating [Electronic resource]. URL: https://www.iso.org/committee/51358.html (31.08.2025).

40. ISO 13715:2017. Technical product documentation – Edges of undefined shape – Indication and dimensioning [Electronic resource]. Geneva : ISO, 2017. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13715:ed-3:v1:en (31.08.2025).

41. ASME B46.1-2019. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) [Electronic resource]. New York : ASME, 2019. URL: https://www.findstandards.com/preview/asme-b46-1.pdf (31.08.2025).

42. ASME Y14.36-2018. Surface Texture Symbols [Electronic resource]. New York : ASME, 2018. URL: https://ru.scribd.com/document/734932675/ASME-Y14-36-2018 (31.08.2025).

43. ISO 25178-2:2021. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters [Electronic resource]. Geneva : ISO, 2021. URL: https://ru.scribd.com/document/791682502/ISO-25178-2-2021 (31.08.2025).

44. Shape of part edges with the various surface finish of the adjacent surfaces / V. Sikulskyi, K. Maiorova, I. Bychkov, S. Myronova, S. Sikulskyi // 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. 134–145. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 657, ISSN 2367-3370). DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_12.

45. Лосева О. А. Проблема скругления кромок // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2010. Вып. 45. С. 122–128.

46. Лосева О. А., Коростелева А. А. Обработка кромок золотниковых пар термоимпульсным методом // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2013. Вып. 59. С. 82–88.

47. Лосева О. А. Обработка кромок деталей термоимпульсным методом // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2009. Вып. 42. С. 120–126.

48. Лосев А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода : дис. … канд. техн. наук : 05.02.08. Харків, 1995. 210 с.

49. Лосева О. А., Майорова Е. В., Лосев А. В. Перспективы применения термоимпульсного метода // International Forum: Problems and Scientific Solutions : proc. 5th Intern. sci.-pract. conf., Aug. 6–8, 2020. Melbourne : CSIRO Publishing House, 2020. P. 60–63.

50. Venturion. The Premium System for Professional Tool Presetting and Measuring [Electronic resource]. 2023. URL: https:www.zoller.info/fileadmin/DATA/_US/Produkt_PDFs-us/ZOLLER_Broschuere_venturion_BRVEN_06_EN.pdf (31.08.2025).

51. Сучасні методи координатних вимірювань в авіа- та ракетобудуванні [Електронний ресурс] : навч. посіб / І. В. Бичков, К. В. Майорова, І. О. Воронько, С. Ю. Миронова, Ю. В. Д’яченко, О. В. Романцов, А. С. Морголенко, Г. С. Селезньова. Харків : ХАІ, 2019. 96 с. URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Suchasni_Metodi_Koordinatnih.pdf (31.08.2025).

52. Autodesk Fusion 360 with PowerInspect: 3D measurement software for metrology hardware [Electronic resource] : website. 2023. URL: https:www.autodesk.com/products/powerinspect/overview (31.08.2025).

53. Аналіз чинників щодо формалізування математичної моделі високоточних деталей складної форми [Електронний ресурс] / 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. Вінниця, 2023. С. 282–284. URL: https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/
01.12.2023/47 (31.08.2025).

54. Види математичної моделі геометрії об’єктів. Достоїнства і недоліки / І. В. Бичков, К. В. Майорова, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков, С. М. Рябіков // Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень : матеріали I Міжнар. наук. конф., 14 квіт. 2023 р., Харків, Україна / 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).

55. Probing and tool measurement systems for machine tools [Electronic resource] : website. 2023. URL: https: www.renishaw.com/en/probing-and-tool-measurement-systems-for-machine-tools--6073 (31.08.2025).

56. Study of drilling cutting modes impact on shrinkage and surface roughness of holes in composite materials / B. Lupkin, K. Maiorova, Iu. Vorobiov, V. Nikichanov, V. Sikulskyi // 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. 88–98. (Lecture Notes in Networks and Systems. LNNS ; vol. 657, ISSN 2367-3370). DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_8.

57. Засоби контролю процесів механообробки надточних деталей : монографія / Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, М. А. Вайнтрауб, Т. Р. Клочко. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 516 с.

58. Внуков Ю. М., Залога В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2010. 243 с.

59. Залога В. О., Криворучко Д. В., Залога О. О. Прогнозування деформаційної складової сил тертя на контактних поверхнях різального інструменту // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2009. № 3 (50). С. 38–45.

60. Інструменти для механічної обробки матеріалів / Г. М. Стискін, М. П. Ревнівцев, М. М. Берізко, В. А. Мелещик. Львів : Оріяна-Нова, 2002. 240 с.

61. Технологічні основи програмування обробки деталей на верстатах з ЧПК / Г. М. Стискін, М. П. Ревнівцев, М. М. Берізко, В. Д. Гаєвський. Львів : Оріяна-Нова, 2002. 208 с.

62. Технологія конструкційних матеріалів : підручник / М. А. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін ; за ред. М. А. Сологуба. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ : Вища шк., 2002. 374 с.

63. Черепін В. Т., Васильєв М. А. Методи і прилади для аналізу поверхні матеріалів : довідник. Київ : Наукова думка, 1982. 399 с.

64. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням : навч. посіб. Київ : УкрНДІАТ, 2003. 384 с.

65. Robinson J. W., Frame E. S., Frame G. M. Undergraduate Instrumental Analysis. 7th ed. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1264 p.

66. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. Основи автоматизації гірничого виробництва. Донецьк : Схід. вид. дім, 2007. 168 с.

67. Analyse élémentaire par fluorescence X-1 [Electronic resource]. URL: http://deuns.chez.com/sciences/fluo/fluo.html (01.09.2025).

68. Joost R., Mönchinger S., Lindow K. New methodology for the characterization of 3D model reconstructions to meet conditions of input data and requirements of downstream application // Proceedings of the Design Society. 2024. № 4. P. 613–622. DOI: 10.1017/pds.2024.64.

69. Jamshidi J., Mileham A. R., Owen G. W. Dimensional tolerance approximation for reverse engineering applications // International Design Conference. DESIGN'2006 : proceeding, May 15–18, 2006 / University of Dubrovnik. Dubrovnik, 2006. P. 855–862.

70. Sáenz-Nuñoa M. A., Lorente-Pedreilleb R. ISO Tolerance specification in reverse engineering // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 13. P. 472–479. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.063.

71. Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions / T. Lieneke et al. // 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference : proceeding, 10–12 Aug. 2015, Austin, Texas. Austin, 2015. P. 371–384. URL: https: web.mit.edu/2.810/www/files/readings/2015-30-Lieneke.pdf (31.08.2025).

72. Zha J., Zhang H., Chen Y. A strategy to evaluate and minimize parallelism errors of a rotor system in a precision rotary table // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. P. 3641–3648. DOI: 10.1007/s00170-019-04828-2.

73. Technology of airplane and helicopter manufacturing. Fundamentals of aircraft manufacturing = Технология производства самолетов и вертолетов : конспект лекций / В. Т. Сикульский, Ю. А. Боборыкин, С. Г. Васильченко, А. В. Пьянков, В. Ф. Деменко. Харьков : ХАИ, 2006. 206 с.

74. Технологія виробництва літальних апаратів (складально-монтажні роботи) : навч. посіб. до лаб. практикуму / В. С. Кривцов, Ю. А. Воробйов, Ю. М. Букін, Ю. В. Д'яченко, О. К. Горлов, О. М. Мещеряков, С. Ю. Миронова, О. В. Шипуль, В. В. Воронько. Харків : ХАІ, 2009. 80 с.

75. Artec Studio and Solidworks full workflow [Electronic resource] : website. URL: https:support.artec-group.com/hc/en-us/articles/15149299160978-Artec-Studio-and-Solidworks-full-workflow (31.08.2025).

76. Аналіз програмного забезпечення для реверс-інжинірингу і моделювання / О. Л. Комісаров, А. С. Суслов, О. С. Скиба, О. М. Сидоренко, К. В. Майорова // Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики : матеріали

III Міжнар. наук. конф., 12 лип. 2024 р., Хмельницький, Україна. Вінниця, 2024. С. 83–86. DOI: 10.62731/mcnd-12.07.2024.004.

77. Майорова К. В., Книр А. В. Аналіз сучасних тенденцій виготовлення авіаційних деталей [Електронний ресурс] // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення. Серія: Економічні науки : матеріали Інтернет-конференції, 9–10 лип. 2024 р. Вип. 90. URL: http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1838/ (31.08.2025).

78. 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).

79. Alcácer V., Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. Vol. 22, № 3. P. 899–919. DOI: 10.1016/j.jestch.2019.01.006.

80. Stojkic Z., Culjak E., Saravanja L. 3D Measurement – Comparison of CMM and 3D Scanner // Proceedings of the 31st International DAAAM Symposium. 2020, 21–24 Oct. 2020, Mostar, Austria. Vienna, 2020. Vol. 31, № 1. P. 780–787. DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.108.

81. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications / M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman // Sensors International. 2021. Vol. 2. P. 100–114. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.1001144.

82. Reverse engineering modeling methods and tools: a survey / F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini, Y. Volpe // Computer-Aided Design and Applications. 2017. Vol. 15, № 3. P. 443–464. DOI: 10.1080/16864360.2017.1397894.

83. Технологія, устаткування і оснащення для виготовлення деталей літальних апаратів з видаленням припуску [Електронний ресурс] : підручник / Ю. В. Д’яченко, В. Т. Сікульський, І. О. Воронько, О. К. Горлов, К. В. Майорова,

С. Ю. Миронова, О. В. Шипуль. Харків : ХАІ, 2024. 177 с. URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Tekhnologiia_Ustatkuv_Pidruchnik.pdf (31.08.2025).

84. Сучасні методи координатних вимірювань в авіа- та ракетобудуванні [Електронний ресурс] : навч. посіб / І. В. Бичков, К. В. Майорова, І. О. Воронько, С. Ю. Миронова, Ю. В. Д'яченко, О. В. Романцов, А. С. Морголенко, Г. С. Селезньова. Харків : ХАІ, 2019. 96 с. URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Suchasni_Metodi_Koordinatnih.pdf (31.08.2025).

85. ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits [Electronic resource]. Geneva : ISO, 2010. 48 p. URL: https://www.iso.org/standard/45975.html (31.08.2025).

86. ISO 286-2:2010. Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts [Electronic resource]. Geneva : ISO, 2010. 59 p. URL: https://www.iso.org/standard/54915.html (31.08.2025).

87. Kondić Ž., Tunjić Đ., Maglić L. Tolerance Analysis of Mechanical Parts // Tehnički glasnik. 2020. Vol. 14, № 3. P. 265–272. DOI: 10.31803/tg-20200504092314.

88. Бабенко А. Г., Бондаревська К. В. Нормування праці : навч.-наоч. посіб. для студентів економ. спеціальностей ВНЗ. 2-ге вид., допов. Дніпропетровськ : ДДФА, 2013. 158 с.

89. Laha R. G., Rohatgi V. K. Probability theory. New York : Courier Dover Publications, 2020. 557 p. ISBN 10: 0486842304.

90. Implementation of reengineering technology to reduce the terms of the technical preparation of manufacturing of aviation technology assemblies / V. Sikulskiy, K. Maiorova, I. Vorobiov, M. Boiko, O. Komisarov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, № 1 (117): Engineering technological systems. P. 25–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.258550.

91. Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Implementation of CAD/CAM system CATIA V5 in Simulation of CNC Machining Process // Procedia Engineering. 2014. Vol. 69. P. 638–645. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.037.

92. Integrated manufacturing features and Design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment / A. S. M. Hoque, P. K. Halder, M. S. Parvez, T. Szecsi // Computers & Industrial Engineering. 2013. Vol. 66, № 4. P. 988–1003. DOI: 10.1016/j.cie.2013.08.016.

93. Piegl L., Tiller W. The NURBS book. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 1997. 660 p.

94. Arnal A., Monterde J. Bezier surfaces with prescribed diagonals [Electronic resource] // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2023. Vol. 424. P. 1–13. URL: https:.www.sciencedirect.com/journal/journal-of-computational-and-applied-mathematics/vol/424/suppl/C (31.08.2025).

95. Ванін В. В., Вірченко Г. А., Яблонський П. М. До питання геометричного моделювання з використанням кривих Безьє // Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2020. № 98. С. 29–34. DOI: 10.32347/0131-579x.2020.98.29-34.

96. Вірченко Г. А., Яблонський П. М. Деякі аспекти комп’ютерного геометричного моделювання з використанням кривих Безьє // Прикладні питання математичного моделювання. 2020. Т. 3, № 1. С. 41–48. DOI: 10.32782/2618-0340/2020.1-3.4.

97. Курєннов С. С., Барахов К. П., Барахова Г. С. Застосування кривих Безьє для опису форми конструкції при оптимізації клейового з’єднання // Системні дослідження та інформаційні технології. 2023. № 2. С. 127–138. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2023.2.09.

98. Стрелковська І., Соловська І., Стрелковська Ю. Застосування параметричних сплайн-функцій в моделюванні // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2024. Vol. 335, № 3 (1). С. 228–232. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-335-3-32.

99. Blender. Design and Model [Electronic resource] : website. URL: https: www.blender.org/features/modeling/ (31.08.2025).

100. Стрелковська І. В., Соловська І. М. Сплайн-апроксимація в 3D-моделюванні // Гуманітарний і інноваційний ракурс професійної майстерності: Пошуки молодих вчених : матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. учених,18 листоп. 2022 р., Одеса, Україна / Міжнар. гуманітар. ун-т, Півден. регіон. центр нац. акад. правових наук України. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2022. С. 90–394. DOI: 10.36059/978966-397-266-4/1163.

101. Параметричні сплайни в 3D-моделюванні / І. В. Стрелковська, І. М. Соловська, Н. Снігур, В. Малюга // Передові технології в інформаційно-комунікаційній інженерії : матеріали міжнар. конф., 17–20 лип. 2023 р., Одеса, Україна / Міжнар. гуманітар. ун-т. Одеса, 2023. С. 22–26.

102. ДСТУ ГОСТ 2.052:2006. Єдина система конструкторської документації. Електронна модель виробу. Загальні положення (ГОСТ 2.052-2006, IDT) : чинний від 2007-07-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 15 с.

103. Мялица А. К. Сравнение информационных свойств чертежа и аналитического эталона // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 1999. Вып. 4. С. 37–43.

104. Мялица А. К. Технологическая подготовка авиационного производства при зависимом образовании размеров деталей с использованием инженерных компьютерных средств : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2001. 160 с.

105. М’ялиця А. К. Технологічна підготовка літакобудівного виробництва в умовах дискретно-нестабільних програм випуску виробів : дис. … д-ра техн. наук / ВАТ «Укр. НДІ авіаційної технології». Київ, 2003. 306 с.

106. Бычков И. В. Основы технологической подготовки авиационного производства сложнопрофильных изделий на базе аналитических моделей процесса формообразования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАНУ. Харьков, 2011. 322 с.

107. ДСТУ ISO 9004-2001. Система управління якістю. Настанови щодо поліпшення діяльності (ISO 9004:2000, IDT) : чинний від 2001-06-27. Київ : Держспоживстандарт України, 2001. 53 с.

108. Іванов В. В. Евристичні моделі в машинобудуванні : монографія. Одесса : Бахва, 2012. 234 с.

109. Sollo A. Aircraft Manufacturing // International Encyclopedia of Transportation. [S. l.], 2021. P. 290–299. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10438-5.

110. ДСТУ 2974-95. Технологічне підготовлення виробництва. Основні терміни та визначення : чинний від 1995-06-23. Київ : Держстандарт України, 1995. 28 с.

111. ISO/IEC/IEEE 26531:2015. Systems and software engineering – Content management for product life-cycle, user and service management documentation [Electronic resource]. Geneva : ISO/IEEE, 2015. 49 p. URL: https://www.iso.org/standard/43090.html (07.09.2025).

112. Abigail A. A. Reverse Engineering Research [Electronic resource]. 2021. 12 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/356784389_Reverse_Engineering_Research (07.09.2025).

113. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling / S. A. Lyubomudrov, I. N. Khrushtaleva, A. A. Tolspoles, A. P. Maslakov // Journal of Mining Institution. 2019. Vol. 240. P. 669–677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669.

114. On the problem of the variability of processes in improving the technological preparation of aircraft components production / V. A. Kudryashov, B. Arazveliev, E. V. Seltsov, Y. V. Zhukova // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2021. № 72–1. P. 154–157. DOI: 10.18411/lj-04-2021-40.

115. Lee J. J., Yoon H. A comparative study of technological learning and organizational capability development in complex products systems: Distinctive paths of three latecomers in military aircraft industry // Research Policy. 2015. Vol. 44, № 7. P. 1296–1313. DOI: 10.1016/j.respol.2015.03.007.

116. Hoque A. S. M., Jambor J. Quality of production process with CAD/CAM system support [Electronic resource] // DAAAM International Scientific Book. Vienna, 2012. P. 277–286. URL: https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/science_books_pdfs/2012/Sc_Book_2012-024.pdf (31.08.2025).

117. Smart inspection tools in robotized aircraft panels manufacturing / A. Bruni, E. Concettoni, C. Cristalli, M. Nisi // 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace. MetroAeroSpace'2019 : 19–21 June 2019, Turin, Italy / IEEE. 2019. P. 649–654. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869690.

118. Early cost estimate of product during design stage using design for manufacturing and assembly (DFMA) principles / K. Annamalai, C. D. Naiju, S. Karthik, M. Prashanth // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 622–623. P. 540–544. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.540.

119. Розробка алгоритмів процесів формоутворення для виготовлення авіаційної техніки при технологічній підготовці виробництва / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, І. В. Бичков, М. М. Бойко, О. Л. Комісаров // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2022. № 2 (178). С. 64–73. DOI: 10.32620/aktt.2022.2.08.

120. Воробйов Ю. А. Наукові основи створення комплексу імпульсних технологій і оснащення для агрегатного складання конструкцій літальних апаратів : автореф. дис. … д-ра техн. наук. Харків, 2020. 43 с.

121. Технологічне забезпечення точності та якості виготовлення крупномодульних зубчастих коліс [Електронний ресурс] / К. В. Майорова, М. І. Бичков, А. С. Суслов, В. Б. Бочаров // Світ наукових досліджень : матеріали міжнар. наук. інтернет-конф, 16–17 лип. 2025. [Б. м.], 2025. Вип. 43. URL: https: www.economy-confer.com.ua/full-article/6384/ (31.08.2025).

122. Groover M. P. Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2015. 793 p. ISBN 10: 0-13-349961-8.

123. An extended framework for knowledge modelling and reuse in reverse engineering projects [Electronic resource] / A. Durupt et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B-Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233, 5. P. 1377–1389. DOI: 10.1177/0954405418789973.

124. As-scanned Point Clouds Generation for Virtual Reverse Engineering of CAD Assembly Models / J. Montlahuc, G. A. Shah, A. Polette, J. P. Pernot // Computer-Aided Design & Applications. 2019. Vol. 16, № 6. P. 1171–1182. DOI: 10.14733/cadaps.2019.1171-1182.

125. Ivsac D. The comparison of 3D measurement procedures in quality control : Master Thesis / Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. Zagreb, Croatia, 2014.

126. Stark R. Major Technology 6: Digital Mock-Up-DMU. In: Virtual Product Creation in Industry. Berlin ; Heidelberg : Springer. 2022. P. 273–304. DOI: 10.1007/978-3-662-64301-3_12.

127. Reverse Engineering in the Remanufacturing: Metrology, Project Management, Redesign / V. Ivanov, L. Dimitrov, S. Ivanova, M. Volkova // New Technologies, Development and Application IV / ed. I. Karabegović. Cham : Springer, 2021. P. 169–176. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 233). DOI: 10.1007/978-3-030-75275-0_20.

128. Kang X., Peng Q. Integration of CAD models with product assembly planning in a web-based 3Dvisualized environment // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2014. Vol. 8, № 2. P. 121–131.

129. Sustainable Reverse Engineering Methodology Assisting 3D Modeling of Footwear Safety Metallic Components [Electronic resource] / J. V. Silva, S. L. Costa, H. Puga, N. Peixinho, J. P. Mendonça // International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE'2013 : proceedings, Nov. 15–21, 2013, San Diego, California, USA. [S. l.], 2013. P. 1–7. DOI: 10.1115/IMECE2013-65190.

130. A sustainable reverse engineering process / K. Saiga, AMM S. Ullah, A. Kubo, Tashi // The 28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering : proceedings, March 10–12, 2021, Jaipur, India. Cham : Elsevier Ltd, 2021. P. 517–522. (Procedia CIRP; vol. 98). DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.144.

131. Technical specifications Artec Space Spider [Electronic resource] : website. URL: https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider#specifications (1.09.2025).

132. PHENIX: Product history-based reverse engineering / A. Durupt, S. Remy, M. Bricogne, N. Troussier // International Journal of Product Lifecycle Management. 2013. Vol. 6, № 3. P. 270–287. DOI: 10.1504/IJPLM.2013.055884.

133. User Guide. Geomagic Design X [Electronic resource]. USA, 2013. 968 p.URL: https://www.engineering.pitt.edu/contentassets/52314f399aba40fa86709314a569641c/geomagicdesignx2014userguide.pdf (20.09.2025).

134. 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.

135. Three-dimensional point cloud data subtlefeature extraction algorithm for laser scanning measurement of large-scaleirregular surface in reverse engineering / Y. Yang, H. Fang, Y. Fang, S. Shi // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2020. Vol. 151. 107220. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107220.

136. Guan G., Wen-wen G. Reconstraction of propeller and complex ship hull surface based on reverse engineering // Journal of Marine Science and Technology. 2019. Vol. 27, № 6. P. 498–504. DOI: 10.6119/JMST.201912_27(6).0002.

137. Development based on reverse engineering to manufacture aircraft custom-made parts / A. Gómez et al. // International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2017. Vol. 10, № 1, P. 40–58. URL: https://www.inderscience-online.com/doi/abs/10.1504/IJMMS.2017.084406.

138. Балушок К. Б. Досвід створення та впровадження інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва нових авіаційних двигунів // Mechanics and Advanced Technologies. 2023. Vol. 7, № 1 (97). P. 24–35. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.1.27810.

139. Rejeesh C. R., Mathew M., Renjith R. Machining. Process Simulation of SOM 125 Series PrintingMachine Components Using CATIA V5 Machining // International Journal of Computer Aided Manufacturing. 2016. Vol. 1, № 2. P. 40–50.

140. Model for Developing a Feature Recogntion System for a Reconfigurable Bending Press Machine / E. Murena, Kh. Mpofu, J. Trimble, N. Gwangwava // Manufacturing Systems 4.0 : proc. of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Cham : Elsevier Ltd, 2017. P. 533–538. (Procedia CIRP ; vol. 63). DOI: 10.1016/j.procir.2017.04.029.

141. On the symmetric localization problem / J. Gou et al. // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1998. Vol. 14, № 4. P. 533–540.

142. Remanufacturing of compressor blade by laser direct metal deposition and subsequent multi-axis milling / Y. Zhao at al. // ICALEO’2015: proc. 34th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing, Oct. 18–22, 2015, Atlanta, Georgia, USA. 2015. P. 748–753.

143. Gessner A., Staniek R. Computer-aidedalignment of castings and machining optimization // Journal of Mechanical Engineering Science. 2015. Vol. 229, № 3. P. 485–492.

144. Chatelain J.-F, Fortin C. A balancing technique for optimal blank part machining // Precision Engineering. 2001. Vol. 25, № 1. P. 13–23. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00050-7.

145. Machining localization and quality evaluation of parts with sculptured surfaces using SQP methods / Y. Sun, W. Xiaoming, G. Dongming, L. Jian // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 42. P. 1131–1139. DOI: 10.1007/s00170-006-0430-9.

146. A best-fitting algorithm for optimal location of large-scale blanks with free-form surfaces / B. Shen et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 139. P. 310–314. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00241-3.

147. Research on the localization of the workpieces with large sculptured surfaces in NC machining / Y. Sijie, Z. Yunfei, F. Peng, X. Lai // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2004. Vol. 23, № 5. P. 429–435.

148. Mehrad V., Xue D., Gu P. Robust localization to align measured points on the manufactured surface with design surface for freeform surface inspection // Computer-Aided Design. 2014. Vol. 53. P. 90–103. DOI:10.1016/j.cad.2014.04.003.

149. Geometry of signed point-to-surface distance function and its application to surface approximation Electronic resource / L. M. Zhu et al. // Journal Computing and Information Science in Engineering. 2010. Vol. 10, № 4. P. 1–10. DOI: 10.1115/1.3510588.

150. Li W.-I., Yin Z.-P., Xiong Y.-I. Adaptive distance function and its application in free-form surface localization // International Conference on Information and Automation, 22–24 June 2009, Zhuhai/Macau, China / IEEE. [S. l.], 2009. P. 24–28. DOI: 10.1109/ICINFA.2009.5204889.

151. A unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surface / Y.-wen Sun et al. // Precision Engineering. 2009. Vol. 33, № 4. P. 516–523. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.02.003.

152. He G., Zhang M., Song Z. Error evaluation of free-form surface based on distance function of measured point to surface // Computer-Aided Design. 2015. Vol. 65. P. 11–17. DOI: 10.1016/j.cad.2015.02.004.

153. Flory S., Hofer M. Surface fitting and registration of point clouds using approximations of the unsigned distance function // Computer Aided Geometric Design. 2010. Vol. 27, № 1. P. 60–77. DOI: 10.1016/j.cagd.2009.09.001.

154. Method of parts virtual localization for near shape blanks / S. Plankovskyy, Y. Tsegelnyk, V. Myntiuk, S. Zadorozhniy, V. Kombarov // Aerospace Technic and Technology. 2020. № 4 (164). P. 74–82. DOI: 10.32620/aktt.2020.4.09.

155. Математична модель та метод розв’язання задачі віртуального базування / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник, О. В. Панкратов, Т. Є. Романова, С. В. Максимов, В. В. Комбаров // Cybernetics and Computer Technologies. 2022. № 4. С. 33–44. DOI: 10.34229/2707-451X.22.4.3.

156. Виробництво тонкостінних деталей літальних апаратів на обладнанні з ЧПК : монографія / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник, В. В. Комбаров, І. В. Білецький. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 247 с. ISBN 978-966-695-603-6. DOI: 10.33042/978-966-695-603-6.

157. Lasaruk A., Sturm T. Automatic Verification of the adequacy of models for families of geometric objects // Automated Deduction in Geometry. ADG'2008 : proc. 7th Intern. workshop, Shanghai, China, Sept. 22–24, 2008. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. P. 116–140. (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 6301). DOI: 10.1007/978-3-642-21046-4_6.

158. Стоян Ю. Г., Семкин В. В., Чугай А. М. Оптимизация компоновки трехмерных объектов в мнрогосвязной области с учетом кратчайших расстояний // Кибернетика и системный анализ. 2014. Т. 50, № 3. С. 58–70.

159. Improving the Method of Virtual Localization of Near-Net-Shaped Workpieces for CNC Machining / S. Plankovskyy, O. Kapinus, K. Maiorova, S. Myronova // Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS'2022 : sel. papers of 17th Intern. conf., Nov. 14–16, 2022, Chernihiv, Ukraine. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2023. P. 119–128. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 667). DOI: 10.1007/978-3-031-30251-0_10.

160. Landman D. Reverse engineering source code: Empirical studies of limitations and opportunities : academisch proefschrift. Amsterdam, 2017. 166 p.

161. Knowledge and Information Structuring in Reverse Engineering of Mechanical Systems / M. I. Ouamer-Ali, F. Laroche, S. Remy, A. Bernard // 12th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management. PLM'2015 : proceedings, Oct 2015, Doha, Qatar. Springer : Cham, 2016. P. 418–427. (IFIP Advances in Information and Communication Technology ; vol. 467. DOI: 10.1007/978-3-319-33111-9_39.

162. Durupt A., Remy S., Ducellier G. Knowledge based reverse engineering: anapproach for reverse engineering of a mechanical part [Electronic resource] // Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2010. Vol. 10, № 4. P. 1–4. DOI: 10.1115/1.3482059.

163. 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production / F. Tondini, U. Arinbjarnar, A. Basso, Ch. V. Nielsen // 9th CIRP Global Web Conference – Sustainable, resilient, and agile manufacturing and service operations : Lessons from COVID-19 : proceeding, 26–28 Oct. 2021. Cham : Elsevier, 2021. P. 91–96. (Procedia CIRP ; vol. 103). DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.014.

164. Additive manufacturing and foundry innovation / Y. S. Shi et al. // China Foundry. 2021. Vol. 18, № 4. P. 286–295. DOI: 10.1007/s41230-021-1008-8.

165. Benefits of laser beam based additive manufacturing in die production / Z. C. Oter et al. // Optik. 2019. Vol. 176. P. 175–184. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.09.079.

166. Advanced thermal energy method for finishing precision parts / S. Plankovskyy, V. Popov, O. Shypul, Y. Tsegelnyk, O. Tryfonov, D. Brega // Advanced Machining and Finishing : Handbooks in Advanced Manufacturing. Amsterdam, 2021. Chap. 15. P. 527–575. DOI: 10.1016/B978-0-12-817452-4.00014-2.

167. Advanced Forging and Milling Solutions [Electronic resource] : website. URL: https://www.cblade.it/language-ru.html (7.09.2025).

168. Пат. на корисну модель № 158919 Україна, МПК G06T 17/20, G06T19. Спосіб реконструкції опукло-вгнутих об’єктів / В. Т. Сікульський, К. В. Майорова, М. І. Бичков, В. В. Нікічанов, О. О. Капінус, О. С. Скиба (Україна) ; заявник й патентовласник Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». № u202404992 ; заявл. 21.10.2024 ; опубл. 02.04.2025, Бюл. № 14.

169. A high-efficiency and high-precision automatic 3D scanning system for industrial parts based on a scanning path planning algorithm [Electronic resource] / Yulong Zong et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2022. Vol. 158, art. 107176. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107176.

170. Optical inspection of cutting parts by 3D scanning / D. Lazarević et al. // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2019. Vol. 531. Art. 121583. DOI: 10.1016/J.PHYSA.2019.121583.

171. Investigating the accuracy of boat propeller blade components with reverse engineering approach using photogrammetry method [Electronic resource] /

M. Faizin, P. Paryanto, N. Cahyo, R. Rusnaldy // Results in Engineering. 2024. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102293.

172. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1986. 656 с.

173. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 2. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1982. 584 с.

174. Типові технологічні процеси та системи автоматизованого проєктування при виготовленні повітряних суден / О. В. Мамлюк та ін. Київ : НАУ, 2019. 251 с. ISBN 978-966-932-124-4.

175. Мамлюк О. В., Кудрін А. П., Зайвенко Г. М. Інженерія забезпечення якості деталей, вузлів та агрегатів у машинобудуванні : монографія. Київ : НАУ, 2021. 138 с. ISBN:978-966-932-162-6.

176. ISO 1101:2004. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – tolerances of form, orientation, location and run-out [Electronic resource]. URL: https://www.iso.org/ru/standard/1147.html.

177. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – tolerances of form, orientation, location and run-out [Electronic resource]. URL: https://www.iso.org/ru/standard/66777.html (7.09.2025).

178. Допуски, посадки та технічні вимірювання : практикум. Ч. 1 / Ю. І. Адаменко, О. М. Герасимчук, С. В. Майданюк, Н. В. Мініцька, В. А. Пасічник, О. А. Плівак. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. 164 с.

179. Machining Digital Twin using real-time model-based simulations and look ahead function for closed loop machining control / R. Ward et al. // International Journal Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117. P. 3615–3629. DOI: 10.1007/s00170-021-07867-w.

180. A Digital Twin Design of Induction Motor with Squirrel-Cage Rotor for Insulation Condition Prediction / V. Pliuhin et al. // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. 2023 Vol. 14. С. 185–191. DOI: 10.17683/ijomam/issue14.22.

181. 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.

182. Maiorova K., Kapinus O., Skyba O. Study of the features of permanent and usual reverse-engineering methods of details of complex shapes // Technology audit and production reserves. 2024. Vol. 1, № 1 (75) : Industrial and technology systems. P. 6–12. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.297768.

183. Robin H. H., Hirpa G. L. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45, pt. 6. P. 5255–5262. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.828.

184. A Combined Reverse Engineering and Multi-Criteria Decision-Making Approach for Remanufacturing a Classic Car Part / A. Ch. Kyaw, N. Nagengast, C. Usma-Mansfield, F. K. Fuss // Procedia CIRP. 2023. Vol. 119. P. 222–228. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.133.

185. A way of supporting the servicing of production machines using reverse engineering and 3d printing techniques / A. Loska, D. Palka, A. Bień, K. Substelny // Technologia i automatyzacja montażu. 2022. Vol. 115, № 1. P. 28–36. DOI: 10.7862/TIAM.2022.1.3.

186. The world’s first wireless and AI-driven 3D scanner : website. URL: https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo (17.09.2025)

187. 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).

188. Max K. A. Computer Graphics and Geometric Modelling. Implementation & Algorithms : textbook. London : Springer, 2005. 908 p. ISBN 978-1-85233-818-3. DOI: 10.1007/b138805.

189. Langetepe E., Zachmann G. Geometric Data Structures for Computer Graphics [Electronic resource]. 1st ed. New York, 2006. 369 p. e-ISBN 9780367803735. DOI: 10.1201/9780367803735.

190. Automatic 3D CAD models reconstruction from 2D orthographic drawings / C. Zhang et al. // Computers & Graphics. 2023. Vol. 114. P. 179–189. DOI: 10.1016/j.cag.2023.05.021.

191. Agarwal P. K., Arge L., Danner A. From Point Cloud to Grid DEM: A Scalable Approach // Progress in Spatial Data Handling : proc. 12th Intern. Symp. on Spatial Data Handling. Heidelberg : Springer Berlin, 2006. P. 771–788. DOI: 10.1007/3-540-35589-8_48.

192. 3D PRINTER CREATBOT F430 [Electronic resource] : website. URL: https://3ddevice.com.ua/en/product/3d-printer-creatbot-f430/ (7.09.2025).

193. Pajerová N., Koptiš M. Shape functions of scanner comparison // The International Journal Manufacturing Technology. 2024. Vol. 132. P. 3889–3902. DOI: 10.1007/s00170-024-13520-z.

194. Sullivan J. M. Curvatures of smooth and discrete surfaces // Discrete diferential geometry / eds: A. I. Bobenko et al. Basel : Springer : Birkhäuser, 2008. P. 175–188. ISBN978-3-7643-8620-7.

195. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Lebanon, U.S.A. : Prentice Hall, 1993. 369 p. ISBN 978-0-13-119462-5.

196. Devi 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.

197. ISO 14253-1:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment [Electronic resource]. URL: https://www.iso.org/ru/standard/70137.html (7.09.2025).

198. Kaisarlis, G. J. A Systematic Approach for Geometrical and Dimensional Tolerancing in Reverse Engineering // Reverse Engineering. Recent Advances and Applications : handbook / ed. by A. C. Telea. Rijeka : In Tech, 2010. P. 133–160. DOI: 10.5772/32001.

199. Bochnia J., Blasiak M., Kozior T. A. Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications // Materials. 2021. Vol. 14. P. 1–24. DOI: 10.3390/ma14227062.

200. Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling / T. Lieneke, V. Denzer, G. A. O. Adam, D. Zimmer // Procedia CIRP 43: 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. CAT'2016 : proceedings, Gothenburg, May 18–20, 2016. Gothenburg, 2016. P. 286–291. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.361.

201. Scale, Material Concentration, Stress Relief and Part Removal Effects on the Dimensional Behaviour of Selected AlSi10Mg Components Manufactured by Laser Powder Bed Fusion / F. Zongo, A. Tahan, V. Brailovsk // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2019. Vol. 3, № 49. P. 1–18. DOI: 10.3390/jmmp3020049.

202. Superimposed RBF and B-spline parametric surface for reverse engineering applications / I. M. Kragic´, S. Perišic´, D. Vucˇina, M. Curkovic // Integrated Computer-Aided Engineering. 2019. Vol. 27, ą 1. P. 17–35. DOI: 10.3233/ICA-190611.

203. Balasubramanian M. P., Vignesh R., Rajamani R. Evaluation of Uncertainty in Angle Measurement performed on a Coordinate Measuring Machin Electronic resource // Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization. ICCAP'2021 : proceedings, Chennai, Dec. 7–8, 2021. Chennai, 2021. P. 1–8. DOI: 10.4108/eai.7-12-2021.2314516.

204. A strategy to evaluate and minimize parallelism errors of a rotor system in a precision rotary table / J. Zha, H. Zhang, Y. Chen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. P. 3641–3648. DOI: 10.1007/s00170-019-04828-2.

205. Желєзна А. М., Кирилович В. А. Основи взаємозамінності, стандартизації та технічних вимірювань : навч. посіб. Київ : Кондор, 2004. 796 с.

206. Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting / F. Calignano et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 88. P. 451–458. DOI: 10.1007/s00170-016-8759-y.

207. 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.

208. Про затвердження Авіаційних правил України Ч. 21. Сертифікація повітряних суден, пов'язаних з ними виробів, компонентів та обладнання, а також організацій розробника та виробника : АПУ-21 (Part-21) [Електронний ресурс] : наказ, редакція від 25.07.2025 / Держ. авіац. служба України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0543-19#Text (07.09.2025).

209. Донець О. Д. Наукові основи створення сучасних реактивних регіональних пасажирських літаків : дис. … канд. техн. наук : 05.07.02 / Держ. підприємство «АНТОНОВ», Держ. концерн «УКРОБОРОНПРОМ», Нац. авіац. ун-т. Київ, 2019. 256 с.

210. Особливості серійного виробництва регіональних пасажирських літаків Ан-148 та Ан-158 / С. А. Бичков, О. Д. Донець, В. Г. Читак // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2019. Вып. 84. С. 125–143.

211. Jigs and Fixtures in Production: A Systematic Literature Review / F. Fiedler et al. // Journal of Manufacturing Systems. 2024. Vol. 72. P. 373–405. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.10.006.

212. Mei Z., Maropoulos P. G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2014. Vol. 228, № 10. P. 1185–1197.

213. Bukin Yu. M., Vorobyov Yu. A. Technology of airplanes and helicopters production. Assembling, mounting and testing operations in airplane and helicopter production. Kharkov : KhAI, 2003. 331 p.

214. Технологія виробництва літальних апаратів : підручник. У 2 кн. Кн. 2. Технологія складання літальних апаратів / Ю. М. Терещенко, Л. Г. Волянська, К. А. Животовська, В. М. Король, М. С. Кулик, А. П. Кудрін, О. П. Мамлюк, В. В. Панін. Київ : НАУ, 2006. 492 с. ISBN 978-966-598-356-3.

215. Experience and effectiveness of the no-loft linking shape and dimension method using laser optical systems in aircraft production / B. Lupkin, K. Maiorova, O. Pavlenko, S. Tolstoy, I. Voronko // Technology Audit and Production Reserves. 2024. №3(1(77). P. 19–26. DOI: : 10.15587/2706-5448.2024.307330https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.307330

216. Токарчук Д. В. Перспективи розвитку інтеграційних процесів у логістичній системі України. Спеціальність 292: Міжнародні економічні відносини. Освітня програма «Міжнародні економічні відносини» [Електронний ресурс] : кваліфікац. (магістер.) робота / Донец. нац. ун-т ім. Василя Стуса. Вінниця, 2022. 93 с. URL: file:///C:/Users/MainUser/Downloads/13504-26873-1-10-20230224.pdf (16.09.2025).

217. Jamshidi J., Kayani A., Iravani P. Manufacturing and assembly automation by integrated metrology systems for aircraft wing fabrication // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2010. Vol. 224, № 1. P. 25–36.

218. Вірченко Г. А., Пасічник Д. Д. Особливості нівелювання літаків за допомогою лазерної координатно-вимірювальної машини // Інформаційні системи, механіка та керування / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». Київ, 2014. Вип. 10. С. 152–159.

219. Туташинський В. І. Технології сучасного виробництва [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ: КОНВІ ПРІНТ, 2021. 155 с. ISBN 978-966-644-547-9. URL: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/723048/1.pdf (07.09.2025)

220. Проєктно-конструкторські особливості планеру регіонального пасажирського літака / О. Д. Донець, О. З. Двейрін, Є. Т. Василевський, С. А. Філь, О. Г. Гребеніков, А. М. Гуменний // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2019. Вып. 83. С. 4–27.

221. Miah H., Chand D. S., Malhi G. S. Research on key charrecteristics of aircraft product assembly process to improve assembly accuracy [Electronic resource] // Recent Advances in Material, Manufacturing, and Machine Learning. RAMMML'22 : proc. of 1st Intern. conf. London, 2023. Vol. 1. P. 1–7. DOI: 10.1201/9781003358596-37 (07.09.2025).

222. Najmon J. C., Raeisi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / ed. by F. Francis, B. Rodney. London : Elsevier, 2019. P. 7–31. ISBN 978-0-12-814062-8. DOI: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9.

223. Shiping Z., Yang G. Noncontact 3-D Coordinate Measure-ment of Cross-Cutting Feature Points on the Surface of a Large-Scale Workpiece Based on the Machine Vision Method // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010. Vol. 59, № 7. P. 1874–1887. DOI: 10.1109/TIM.2009.2030875.

224. Campbell F. C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials. London : Elsevier Science, 2006. 600 p. ISBN 978-1-85617-495-4.

225. Forming the geometric accuracy and roughness of holes when drilling aircraft structures made from polymeric composite materials / K. 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.

226. Vorkapić M. Implementation of RE in the 6R Strategy in Considering the Sustainable Development of Parts for the Aviation Industry Using Additive Technologies // Novel Techniques in Maintenance, Repair, and Overhaul : proc. of the Intern. Symp. on Aviation Technology, MRO, and Operations. ISATECH'2022. Springer : Cham, 2023. P. 369–375. DOI: 10.1007/978-3-031-42041-2_47.

227. ДСТУ 8540:2015. Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент : чинний від 01.07.2016. Київ : Нац. стандарт України, 2016. 39 с.

228. Технологічна підготовка виробництва корпусних деталей в системі UNIGRAPHICS / Ю. О. Шевченко, О. Є. Мацулевич // Інформаційні технології проєктування : зб. наук. пр. / Тавр. держ. агротехнол. ун-т. Мелітополь, 2013. С. 116–126.

229. Допуски, посадки та технічні вимірювання : практикум / Ю. І. Адаменко та ін. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. Ч. 2. 188 с.

230. Ніколенко Є. Ю., Ткачов Ю. В. Основи технології виробництва ракетно-космічних літальних апаратів : навч. посіб. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2006. 116 с.

231. Subsonic Airfoil Development System: XFOIL [Electronic resource] : website. URL: https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/ (08.09.2025).

232. Gopalakrishnan M. M., Taira K., Asai K. Low Reynolds number wake modification using a Gurney flap // 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting : proceedings, 9–13 Jan. 2017, Grapevine, Texas. Grapevine, 2017. P. 1–13. DOI: 10.2514/6.2017-0543.

233. Implementation of reengineering technology to ensure the predefined geometric accuracy of a light aircraft keel / K. 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.

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

235. 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.

236. 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).

237. 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.

238. 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.

239. 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.

240. 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_60241.

241. Yu Y., Min W., Haibo W., Lin H. Design and Optimization of Press Bend Forming Path for Producing Aircraft Integral Panels with Compound Curvatures, Chinese Journal of Aeronautics. 2010. Vol. 23, № 2. P. 274–282.

242. Ramati S., Levasseur G., Kennerknecht S. Single Piece Wing Skin Utilization Via Advanced Peen Forming Technology [Electronic resource] // Presented at the Intern. shot peening conf. ICSP-7, Warsaw, Poland, Sept. 28–30, 1999. P. 1–19. URL: http://www.aerosphere.ca/docs/ICSP-7.pdf (13.09.2025).

243. Jinqiang T., Mei Z., Shuai L. Guideline for Forming Stiffened Panels by Using the Electromagnetic Forces // Metals. 2016. Vol. 6, № 11. P. 2–24. DOI: 10.3390/met6110267.

244. Fracture prediction in the forming of aircraft Al stiffeners using multi-point dies / C. G. Liu et al. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 90. P. 3109–3118. DOI: 10.1007/s00170-016-9634-9.

245. Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming / V. Sikulskiy, V. Kashcheyeva, Yu Romanenkov, A Shapoval // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, № 1 (88). P 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061/2017.108190.

246. An Equivalent Calculation Method for Press-Braking Bending Analysis of Integral Panels / Z. Min, T. Xitian, L. Wupeng, S. Xiaolin // Metals. 2018. Vol. 8, № 5. P. 2–18. DOI: 10.3390/met8050364.

247. Investigation of creep-age forming of aluminum lithium alloy stiffened panel with complex structures and variable curvature / H. Luo, W. D. Li, C. Li, M. Wan // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 91. P. 3265–3271. DOI: 10.1007/s00170-017-0004-z.

248. Feasibility study of flexibly reconfigurable roll forming process for sheet metal and its implementation / J. S. Yoon, J. Kim, H. Kim, B. S. Kang // Advanced forming technology for lightweight components : from theory to application. 2014. Vol. 6. P. 45–63. DOI: 10.1155/2014/649406.

249. Analytical methods for determining the static and dynamic behavior of thin-walled structures during machining / S. Plankovskyy, V. Myntiuk, Y. Tsegelnyk, S. Zadorozhniy, V. Kombarov // Mathematical Modeling and Simulation of Systems.

MODS'2020 : sel. papers of 15th Intern. sci.-pract. conf., 2020 June 29–July 01, Chernihiv, Ukraine. Cham, 2021. P. 82–91. (Advances in Intelligent Systems and Computing. AISC ; vol. 1265). DOI: 10.1007/10.1007/978-3-030-58124-4_8.

250. 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.

251. Modeling the forming process by successive local deforming for monolithic stiffened panels / V. Sikulskiy, S. Sikulskyi, 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.

252. 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.

253. Thread inspection using the waveline W800R profilometer: methodology for method verification / K. Maiorova, V. Kalinichenko, V. Bocharov, I. Voronko, N. Khayyam // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2025. № 2 (202). С. 38–46. DOI: 10.32620/aktt.2025.2.04.

254. Використання реверс-інжинірингу і адитивних технологій в авіаційному виробництві / К. В. Майорова, І. В. Бичков, В. Л. Малашенко, М. І. Бичков, О. Л. Комисаров // 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.

255. 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.-технічн. конф., 23–24 квіт. 2019 р., Харків, Україна / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2019. С. 47–48. URL: https://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/Problemi_Stvorennya_Ta.pdf (15.09.2025).

256. 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.

257. Сучасні підходи до метрологічного контролю зубчастих коліс редукторів у важких умовах експлутації / 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
Акти використання результатів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»
_____ Андрій ГУМЕННИЙ
«02» 09 2025 р.

АКТ
використання результатів докторської дисертації
Майорової Катерини Володимирівни
«Наукові основи виробництва авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу за умови обмеженого часу»
в навчальному процесі та в науково-дослідній частини
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Комісія у складі в.о. начальника відділу якості освіти, аналітики та навчально-методичного забезпечення БАРЗДУН Олени Василівни, декана факультету літакобудування (№ 1), к.т.н., доцента КРИЦЬКОГО Дмитра Миколайовича, завідувача кафедри проектування літаків і вертольотів (№103), к.т.н., доцента ТРУБАЄВА Сергія Васильовича, склала цей акт про впровадження результатів докторської дисертації МАЙОРОВОЇ Катерини Володимирівни в навчальний процес кафедри технології виробництва літальних апаратів (№ 104) при викладанні наступних дисциплін:

- «Науково-практична підготовка»;
- «Планування, організація і звітність науково-дослідної діяльності»;
- «Проєктування, випробування та сертифікація об'єктів АРКТ»

для здобувачів освіти рівня «магістр» за освітньо-науковою програмою «Проєктування, виробництво та сертифікація авіаційної техніки» та в науково-дослідну частину Університету у вигляді науково-технічної бази, яка використовується під час виконання науково-дослідних робіт.

В.о. начальника відділу
якості освіти, аналітики та
навчально-методичного забезпечення Олена БАРЗДУН

Декан факультету
літакобудування (№ 1) Дмитро КРИЦЬКИЙ

Завідувач кафедри
проектування літаків і
вертольотів (№103) Сергій ТРУБАЄВ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «ХМЗ «ФЕД»
Ігор ШИПУЛЬ
«18» 08 2025 р.

АКТ
використання результатів докторської дисертації
Майорової Катерини Володимирівни
«Наукові основи виробництва авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу за умови обмеженого часу»
поданої на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук

Цей акт укладено комісією у наступному складі.
Голова комісії: в.о. директора технічного Сергій НЕСТЕРЕНКО
Членів комісії: головний технолог Юрій ЧОРНИЙ
в.о. головного конструктора Олександр БІКІН

Комісія підтверджує, що в період з 2023 по 2025 роки відповідно до угоди про співробітництво №104-2/2017 від 23.02.2017 між Національним аерокосмічним університетом «Харківський авіаційний інститут» та Товариство з обмеженою відповідальністю «Харківський машинобудівний завод «ФЕД», а також в рамках виконання Національним аерокосмічним університетом «ХАІ» науково-дослідного проєкту «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» (0123U102001) на наше підприємство передані матеріали «Рекомендації щодо відтворення геометрії об'єкту виробництва за технологією реверс-інжинірингу та вибору технології швидкого виробництва або ремонту за умови мінімізації часу ТПВ» (вхід. лист №39-104/1036 від 27.11.2023, вих. лист №203-4/22 від 29.11.2023), «Рекомендації щодо апробації даних оцифровування та щодо ув'язування при прототипуванні складних авіаційних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі реверс-інжинірингу» (вхід. лист 38-04/17 від 06.01.2025, вих. лист №203-1 від 27.01.2025).

У зазначених рекомендаціях наведено наступні результати докторської дисертації МАЙОРОВОЇ Катерини:

- технологічні рекомендації зі створення аналітичного еталону за допомогою Geomagic Design X та метод вибору раціональної технології швидкого виробництва авіаційних конструкцій за умови обмеженого часу й забезпечення достатньої якості на базі реверс-інжинірингу;
- технологічні рекомендації щодо використання 3D-принтерів і 3D-сканерів для виготовлення дослідних зразків і контролю точності отриманих моделей та технологічні рекомендації щодо ув'язування при прототипуванні складних авіаційних деталей високої точності з роз'ємами та стиками на основі реверс-інжинірингу;

Комісія підтверджує, що вказані вище результати є важливими рішеннями науково-практичної проблеми створення авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу за умови обмеженого часу й можуть бути використані під час модернізації існуючих виробничих ліній на підприємстві та удосконалення CAD/CAM/CAE-технологій.

Голова комісії _____ Сергій НЕСТЕРЕНКО

Члени комісії _____ Юрій ЧОРНИЙ

_____ Олександр БІКІН

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
АНТОНОВ
JOINT STOCK COMPANY
ANTONOV

вул. Мрії, 1, м. Київ, 03062, Україна
тел: +38 (044) 454 34 50, 454 31 49
e-mail: info@antonov.com
код ЄДРПОУ 14307529

1, Mrii str., Kyiv, 03062, Ukraine
phone: +38 (044) 454 34 50
phone: +38 (044) 454 31 49
e-mail: info@antonov.com

від "11" 08 2025 р. № 146.12/18-25

АКТ

впровадження результатів докторської дисертації
Майорової Катерини Володимирівни
«Наукові основи виробництва авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу за умови обмеженого часу»
поданої на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук

Цей акт складений у тому, що на базі розроблених в дисертаційній роботі МАЙОРОВОЇ Катерини з наукових основ виробництва авіаційних конструкцій із застосуванням технологій реверс-інжинірингу (РІ) за умови обмеженого часу виробництва, а саме прототипування авіаційних деталей і складальних одиниць (СО) або ремонту з забезпеченням високої якості виробів та точності поверхонь в найкоротші терміни та найменшою трудомісткістю робіт з метою підвищення ефективності рівня виробництва авіаційних конструкцій (АК), на Акціонерному товаристві «АНТОНОВ» впроваджено наступне:

- класифікатор щодо особливостей використання методів РІ для різних груп деталей і СО АК, суть якого полягає в можливості прототипування тієї чи іншої групи деталей в залежності від технічних можливостей різних сканерів та інших вимірювальних пристроїв, а також визначення раціонального методу РІ для реалізації самого процесу прототипування;
- метод вибору раціональної технології швидкого виробництва та/або ремонту деталей АК при їх прототипуванні за методами РІ в залежності від кількості (партії) та вимог допуску на форму деталей АК, де враховано технології штампування, 3D-друку, високошвидкісне оброблення на верстаті з ЧПК штампованої заготовки та фрезерування плити на верстаті з ЧПК, а також метод збільшення точності віртуального базування створеного портрету дослідної деталі АК при її виготовленні на верстаті з ЧПК;
- метод прототипування опукло-вгнутих деталей сталим РІ за умов забезпечення заданої точності їх виготовлення, зменшення трудомісткості та термінів технологічної підготовки виробництва;
- рекомендації з впровадження і реалізації завдань формоутворення з використанням технології РІ у виробництво АК.

Головний інженер, д.т.н. Олексій АНДРЄЄВ

Головний технолог Андрій ДОБИЖА

Головний металург, к.т.н. Сергій АНТОНЮК

«APPROVED»
Ankara Yıldırım Beyazıt University
Assoc. Prof. Dr. Abdulhamit Küçükaslan
12.04.2025

Doç. Dr. Abdülhamit KÜÇÜKASLAN
Dekan Yardımcısı

ACT

of Implementation of Doctor of Technical Science Dissertation Results
of Kateryna Maiorova
«Scientific foundations of the aircraft structures creation using reverse engineering technologies under limited time conditions»
Applied for Scientific Degree of Doctor of Technical Science

This act confirms that on the basis of results of Kateryna Maiorova dissertation as to aircraft parts digital models creation using reverse engineering (RI) technologies under limited time conditions, namely, prototyping the parts of various shapes with ensuring high products quality and surfaces accuracy under limited time conditions in order to increase the efficiency and technical level of production of aerospace technology (AT) objects, the following has been used/introduced into the educational process of the courses "Manufacturing Technologies" and "Innovative Approaches in Engineering" (Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Faculty of Aviation and Astronautics):

- a classification on the peculiarities of RI methods applicability for various groups of AT parts and assembly units (AU), which concept 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 prototyping process itself.
- sequence of technological operations for 3D scanning and appointing the tolerances for dimensions of the aircraft part to be manufactured as well as recommendations for solving problems of AT parts shapes and dimensions forming using RI technologies in the AT production.

Prof. Dr. Ferhat KADIOĞLU
Bölüm Başkanı

Head of Aeronautical and
Astronautical Engineering Department

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційної роботи.

Статті у 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. Boiko, Y. Korolkov. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2022. № 1 (177). С. 42–50. DOI: 10.32620/aktt.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/aktt.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/aktt.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. (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. (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. (Категорія «Б»).

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

9. Сучасні підходи до метрологічного контролю зубчастих коліс редукторів у важких умовах експлутації / 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. (Категорія «Б»).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму:

–

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 / K. 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. (Scopus, Q2)

11. Forming the geometric accuracy and roughness of holes when drilling aircraft structures made from polymeric composite materials / K. 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. (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. (Scopus, Q3)

13. Modeling the forming process by successive local deforming for monolithic stiffened panels / V. Sikulskiy, S. Sikulskyi, 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. (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. (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. (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. (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.-технічн. 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_Stvorennya_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 elparadigma de la sociedad post-industrial* : col. de doc. científicos «ΛΌГОΣ» 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.

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_Кременчук_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.

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. **(**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. (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 (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 І 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. Комисаров. *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. (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)

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/.