УДК 621.9 DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).10

ПЕРМЯКОВ О.А., ЯКОВЕНКО І.Е., КАЛІНІЧЕНКО В.А., СКИБА О.С., ЮЖКОВИЧ П.

РЕВЕРСИВНИЙ ІНЖИНІРИНГ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

Автори, маючи кожен свій досвід наукової та практичної діяльності і накопичені знання з технології машинобудування, поставили собі за мету узагальнення та оцінку нових можливостей та альтернатив існуючим підходам до проектування технологічних процесів виготовлення або відновлення деталей в умовах реверсивного інжинірингу. Розглянуто сучасні технічні засоби, які є необхідними для виконання етапів реверсивного інжинірингу та забезпечують якість виготовлення і знижають трудомісткість технологічного проектування.

Ключові слова: реверсивний інжиніринг, технологічний процес, проектування, технічні засоби контрольних операцій.

PERMYAKOV O.A., YAKOVENKO I.E., KALINICHENKO V.A., SKIBA O.S., JOZKOWICZ P.

REVERSE ENGINEERING AND IMPLEMENTATION OF MODERN METHODS AND MEANS OF CONTROL OPERATIONS.

The authors, each with their own scientific and practical experience and accumulated knowledge of mechanical engineering technology, set themselves the goal of summarizing and evaluating new opportunities and alternatives to existing approaches to the design of technological processes of manufacturing or restoring parts in the conditions of reverse engineering. Modern technical means are considered, which are necessary for performing the stages of reverse engineering and ensure the quality of production and reduce the complexity of technological design

Keywords: reverse engineering, technological process, design, means of control operations.

Вступ. Автоматизація виробничого процесу проникає у всі галузі машинобудування, у всі ланки виробничого процесу, викликаючи в них якісні зміни, розкриваючи небачені раніше можливості зростання продуктивності праці, підвищення якості та збільшення випуску продукції, полегшення умов праці.

Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає нові можливості та альтернативу існуючим підходам до проектування технологічних процесів виготовлення або відновлення деталей. Завдяки розвитку сучасних технологій та сучасного обладнання машинобудування отримало такий потужний інструмент, як зворотний інжиніринг (реверс інжиніринг).

Реверсивний інжиніринг (реверс інжиніринг, зворотне проектування, reverse-engineering) – процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком. Зворотне проектування деталей потрібне, коли необхідне: відновлення втрачених деталей; відновлення зношених або деталей, що вийшли з ладу; збереження інформації про об'єкти для їхнього подальшого ремонту чи відтворення.

Реверс інжиніринг дуже корисний в інноваційній інженерній діяльності. Він важливий під час проведення дослідження механічних систем, що в подальшому вивченні за допомогою програмних засобів дозволяє виявити найбільш проблемні місця, які підлягають доопрацюванню чи модифікації, що скорочує час отримання інноваційних продуктів.

Аналіз досліджень та публікацій. Реверсивний інжиніринг не може існувати без відповідних програмних та технічних засобів. У наш час існує величезна кількість різноманітного високоточного обладнання та програмних засобів для проведення вхідного, міжопераційного та вихідного контролю (Inspection) деталей на виробництві, а також для проведення зворотного моделювання (reverse engineering). Нижче ми розглянемо декілька прикладів обладнання та програмних засобів (ПЗ), яке застосовується на підприємствах України та допомагає підтримувати конкурентоспроможність нашої продукції на світовому ринку.

Одним із основних етапів зворотного моделювання є процес 3Д-сканування існуючого виробу. 3D-сканування об'єктів – це процес перетворення фізичної форми реального об'єкта на цифровий вигляд. При використанні певних технологій можливе збереження текстури і навіть кольору вихідного зразка. Таким чином, 3D модель необхідного виробу можна отримати без зайвих зусиль. 3D-сканування об'єктів допомагає підготувати необхідну модель до 3D-друку, або використовувати цю модель для інжинірингу.На даний момент існують такі методи сканування: контактний метод та безконтактний метод. Кожен із методів має свої плюси і мінуси, і вимагає використання відповідного обладнання.

Координатно-вимірювальна машина (КВМ) типу рука з лазерним сканером Hexagon MI ROMER (Франція)

КВМ типу рука HexagonAbsoluteArm (рис.1) застосовується для вирішення задач контролю якості, інспекції, 3D-моделювання та зворотнього інжинірингу [1]. КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis оснащена лазерним 3D-сканером, що робить її універсальним інструментом для швидкого об'ємного контролю поверхонь складної форми та створення високоточних 3D-моделей. Основні технічні характеристики:

- Сканування: лазер;
- Точність, мм: від 0,05;
- 3D — сітка: OBJ, STL та ін.;
- Вимірювання: DXF, IGS, STP та ін.;
- Хмара точок: TXT.

AbsoluteArm 7-Axis покриває наступні задачі:

- Контроль геометрії об'єктів;
- Перевірка деталей на відповідність кресленням;
- Порівняння з CAD-моделлю;

© О.А. Пермяков, І.Е. Яковенко, В.А. Калініченко, О.С. Скиба, П.Южкович, 2023

- Зворотне моделювання;
- Відновлення втрачених моделей та креслень;
- Обмір зубчастих коліс та шестерень будь-якого типу і розміру;
- Серійний контроль виробів.

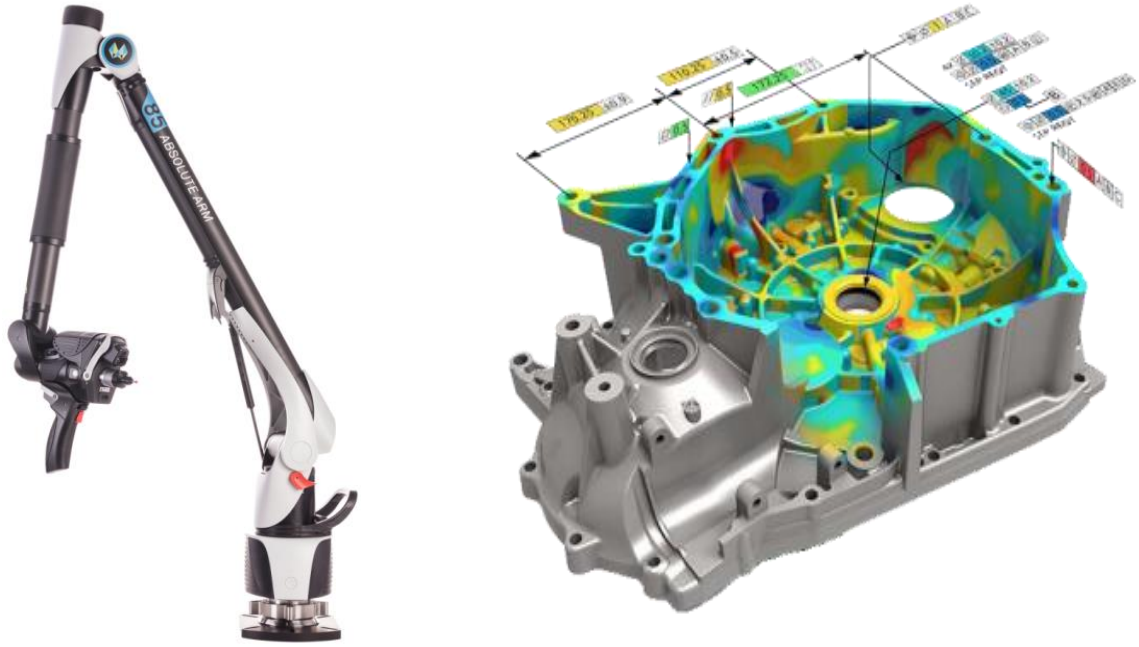


Рис.1 – КВМ типу рука HexagonAbsoluteArm та приклад деталі для якої виконується контроль геометрії

Координатно-вимірювальні машини HEXAGON MI DEA (Італія)

КВМ серії DEA GLOBAL (рис.2) розроблені спеціально для досягнення максимальної продуктивності при високій точності вимірів від 0,1 мкм.

Машини здатні вирішити найскладніші завдання метрологічного контролю та зворотного моделювання контактним методом. Основні технічні характеристики:

- Діапазони вимірювання, мм: від 500×700×500 до 6000×10000×4000;
- Точність вимірювання, мкм: від 0,5 (мкм) + L (мм)/1000;
- Результат вимірювання: звіт в текстовому та/або графічному вигляді;
- Сканування: тактильне, сплайнове.

Скануюча КВМ абсолютно незамінна при вирішенні задачі отримання геометричної інформації про поверхні, форма яких підбирається експериментально на моделях (наприклад, в авіа- та автомобілебудуванні). За результатами вимірювання дослідного зразка (або моделі) уточнюється технічна документація, складається керуюча програма для верстата з ЧПК. Дуже ефективним є застосування системи сканування спільно з фрезерним верстатом з ЧПК або обробним центром. [2]

Рис. 2 – КВМ серії DEA GLOBAL

Абсолютний трекер LEICA AT500 від HEXAGON MI (Швейцарія)

Абсолютний трекер LEICA AT500 - портативна КВМ для вимірювань великогабаритних деталей з високою точністю. Завдяки діапазону роботи у радіусі 160 метрів від станції система широко застосовуються в авіабудуванні, важкому машинобудуванні, суднобудуванні та ін. [3]. Основні технічні характеристики:

Діапазони вимірювання, м: 0,8 – 320;

Точність вимірювання: 15 мкм + 6 мкм/м;

- Ступінь захисту: IP54;
- Робоча температура,˚С: від -15 до +45;
- Результат: звіт в текстовому та/або графічному вигляді;
- Сканування: тактильне, сплайнове.

Рис. 3 – КВМ LEICA AT500

Оптичні сканери Artec 3D (США)

3D-сканери ArtecLeo,ArtecEva та SpaceSpider(рис.4) ідеально підходять для професійного використання. Вони сканують дуже швидко та з великою розподільною здатністю, що дозволяє отримати 3D-моделі високої якості не застосовуючи великих зусиль за короткий проміжок часу. Сканери ArtecLeo та ArtecEva дозволяють швидко та точно відсканувати об’єкти великих розмірів (включно до розмірів автомобіля). Сканер SpaceSpider створено спеціально для отримання високоточних моделей невеликих об’єктів з високою деталізацією.

Технологія тривимірного сканування, розроблена компанією Artec 3D, дозволяє з високою точністю та швидкістю отримувати інформацію про поверхню об'єктів (глибини), використовуючи принцип структурованого підсвічування, а вбудована у сканер фотокамера фіксує текстуру об'єкта. Завдяки такому технічному рішенню, 3D-сканери Artec дозволяють отримувати високоточні повнокольорові комп'ютерні моделі складних об'єктів [4]. Основні технічні характеристики:

Точність, мм: від 0,05;

Текстура: так;

3D-формат: OBJ, WRL, STL;

Вимірювання: CSV, DXF, XML;

Хмара точок: BTX, PTX.

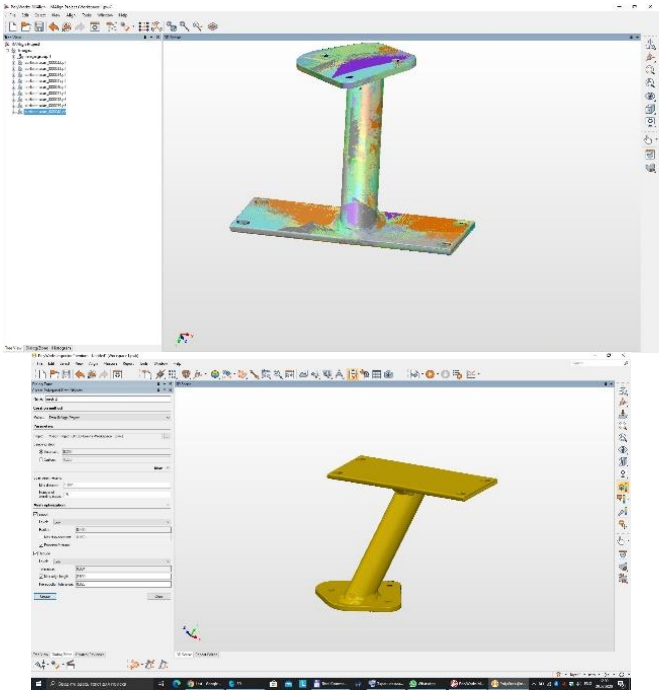
Рис. 3 – 3D-сканери ArtecLeo,ArtecEva та SpaceSpider

Приклад сканування кронштейну за допомогою КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis з подальшим моделюванням (реверс інжинірингом) в ПЗ GeomagicDesign X

Даний кронштейн було відсканованоза допомогою КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis оснащеною лазерним 3D-сканером RS-5 (точність сканування 0,028 мм) (рис.1).

Для отримання замкнутої моделі деталь необхідно було відсканувати з усіх боків. Програмне забезпечення сканера PolyWorks здійснює відображення процесу сканування у реальному часі, що дозволяє визначити те, що вже відсканово та майбутній обсяг роботи (рис. 6а). Після сканування деталі у двох положеннях упевнившись, що обидві групи містять спільну геометрію для роботи алгоритму вирівнювання, можна приступати безпосередньо до вирівнювання. Програмне забезпечення PolyWorks дозволяє виконувати вирівнювання відсканованих частин за загальною геометрією. Програмно визначається найкраще положення сканів у просторі з мінімальною відстанню між точками в цих сканах. Після завершення процедури вирівнювання ми отримуємо набір сканів, які максимально відповідають початковій деталі. Для подальшої роботи скани необхідно перетворити на полігональну модель. По суті, алгоритм виконує перетворення («склеювання») набору сканів у полігональну модель (рис.5а).

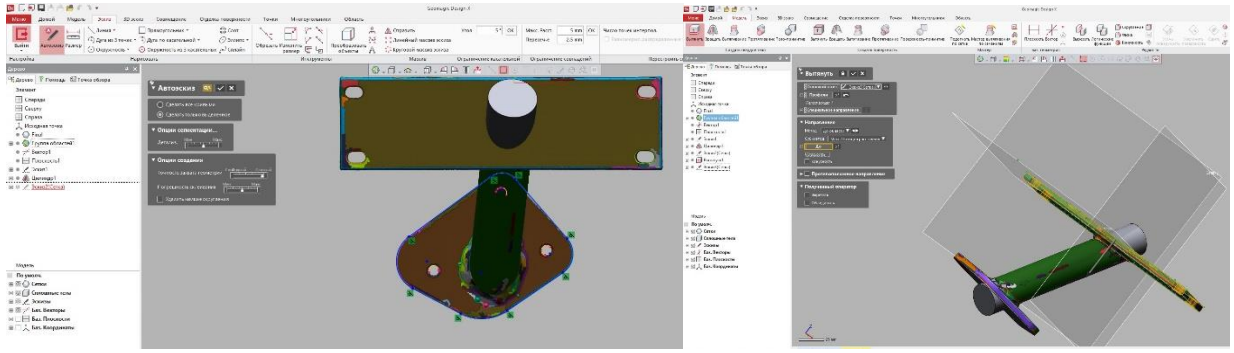
Рис. 4– Процес сканування кронштейну



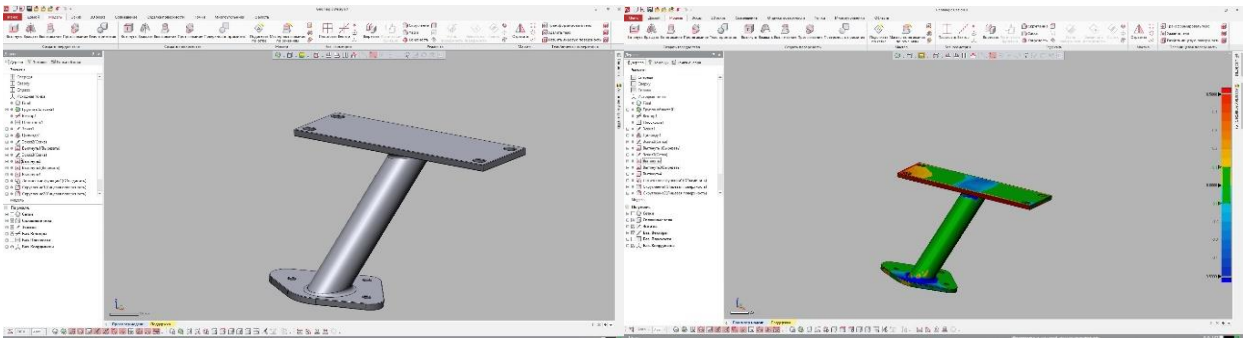
а) б)

Рис. 5– Робота в ПЗ PolyWorks: а) робота зі сирими даними; б) готова полігональна модель

Для створення твердотільноїпараметричної моделі було використано ПЗ GeomagicDesign X (рис.6). GeomagicDesign X розроблено спеціально для роботи з полігональними моделями та для конвертування 3D-сканів в високоякісні моделі САПР з геометричною параметризацією. Це єдине в своєму роді ПО з автоматичним або покроковим створенням параметричної моделі, неймовірно точним суміщенням поверхонь 3D-сканів органічних об'єктів, можливістю редагування полігональних сіток і обробки хмари точок. За допомогою GeomagicDesign X тепер можна сканувати практично будь-який об'єкт і створювати готові до виробництва моделі. В даному ПЗ можливо робити не тільки твердотільне моделювання, а також поверхневе та моделювання за допомогою NURBS- кривих.



а) б)



в) г)

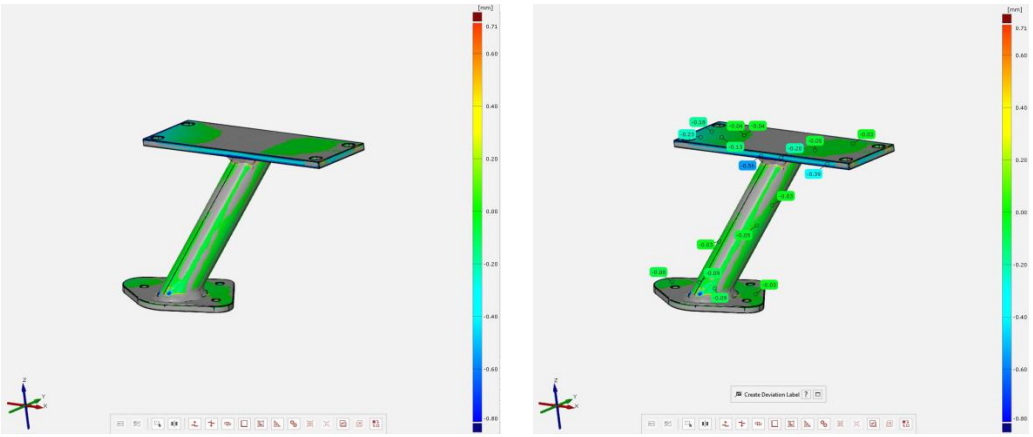
Рис.6– Робота в ПЗ GeomagicDesign X: а) створення ескізів за допомогою функції «ескіз за сіткою»; б) створення окремих твердотільних елементів; в) готова твердотільна модель; г) перевірка точностіотриманоїтвердотільної моделі відносно полігональної

Контроль та аналіз точності виготовлення деталі складної форми можна виконати за допомогою так званого порівняння отриманої геометрії з еталонною CAD-моделью (Inspection). Цей метод дозволяє значно пришвидшити вихідний контроль виробів криволінійних об’єктів, які раніше контролювались тільки за допомогою шаблонів.

Спочатку необхідно відсканувати готову деталь, яку ми отримали за допомогою механічної обробки або 3Д-друку, для одержання їх полігональної моделі. Другим кроком буде завантаження stl-моделі та CAD-моделі у ПЗ “GOM Inspect" чи PolyWorksInspector. Там їх необхідно вирівняти між собою, робимо це за допомогою функції best-fit (рис.7).

Рис.7 – Вирівняні stl-моделі щодо CAD-моделей за допомогою функції best-fit

Далі проводимо аналіз якості виготовлення за допомогою контролю відхилення поверхні stl-моделі щодо CAD-моделі. Результатам аналізу є карта відхилень, контрольні точки якої представлені на рисунку 8. Карта відхилень може бути надана у декількох представленнях: кольорова карта з діаграмою відхилень збоку вікна перегляду або додатково можна встановити маркери у точках, які нас цікавлять. Маркери дозволяють нам побачити числове значення невідповідності у конкретному місці, що полегшує аналіз результатів деталі на відповідність.



а) б)

Рис.8 – Карта відхилень деталі: а) кольорова карта відхилень; б) кольорова карта з додатковими з маркерами, що вказують числове значення невідповідності.

Після інспекшну результати збираються у протокол контролю, який можна прикріпити до кожної із перевірених деталей. Цей сучасний варіант контролю в декілька разів точніший та швидший за перевірку за допомогою шаблонів і дозволяє скоротити склад шаблонів майже до нуля, що зменшує витрати підприємства на обслуговування та зберігання шаблонів.

В роботі [5] наведено яскравий приклад впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу як основи забезпечення якості і скорочення циклів виготовлення деталей. В процесі освоєння у виробництві лопаток парових турбін з титану замість нержавіючої сталі виникало чимало проблем. У зв’язку з тим, що лопатка має складний профіль і після виготовлення повинна відповідати конструкторській документації по точності геометричних розмірів від 0,3 до 0,03 мм, то в процесі її виготовлення є велика кількість контрольних операцій: контроль розмірів і форми по необхідній кількості розрізів.

Існуючий метод контролю плоскими шаблонами у спеціальному пристрою (стапелю) є не ефективним, він затратний по металоємкості і не зовсім може відповідати вимогам по точності виконання вимірів. Також

на проектування і виготовлення стапелю з шаблонами витрачається багато часу (до 4-х місяців), також, кількість одиниць оснастки може сягати до 50 найменувань і ця оснастка не може бути використана для іншого типорозміру, для іншої лопатки, тобто не є універсальною.

Для титанової лопатки виникла необхідність вхідного контролю заготівки (штамповки) з можливістю реверсного інжинірингу. Заготовка титанової лопатки майже в 5 разів дорожча від сталевої, тому припуски на механічну обробку необхідно звести до мінімально допустимих, при цьому виникає нова задача забезпечення рівномірності припуску на поверхні пера лопатки, що має складний профіль. Для цього було змінено структуру нового технологічного процесу і впроваджено контрольні і розміточні операції деталей складного профілю (рис.10) для забезпечення рівномірності припуску за допомогою координатно-вимірювальної машини типу рука FARO PRIME 1.2M (Швейцарія) з наступними основними технічними характеристиками:

Діапазон вимірювання	до 1200 мм;
Об’ємна точність довжини	± 0,025 мм;
Повторюваність точки	± 0,016 мм;
Дискретність	± 0,001мм;
Маса	5,5 кг.

В комплекті є сучасний ноутбук з програмним забезпеченням DelcamPowerInspect для контролю та реверсного інжинірингу.

Ефект від впровадження методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу полягає в наступному:

1. Суттєво знижено трудомісткість контрольних операцій та собівартість виготовлення шляхом відмови від дорогої спеціальної оснастки та необхідності виготовлення еталонних деталей, скорочено виробничі цикли.

2.Забезпечено підвищення якості виготовлення титанових лопаток для парових турбін за рахунок використання 3Д моделей лопаток замість еталонних деталей-копірів, точність яких саме лімітує це.

3. Засоби контролю є універсальними для лопаток, глобоїдних черв'яків та інших деталей турбін на будь якому етапі їх виготовлення.

Рис.9 - Контроль титанових лопаток

Можливість створення 3D-моделей виробів методами ручного комп’ютерного графічного дизайну або за рахунок 3D-сканування, їх подальший експорт до CAM систем та використання методів традиційного субтрактивного виробництва (на основі верстатів з ЧПК) або методів адитивного виробництва (3D-друк) значно спрощує процес технологічного проектування та виготовлення деталі (рис.10).

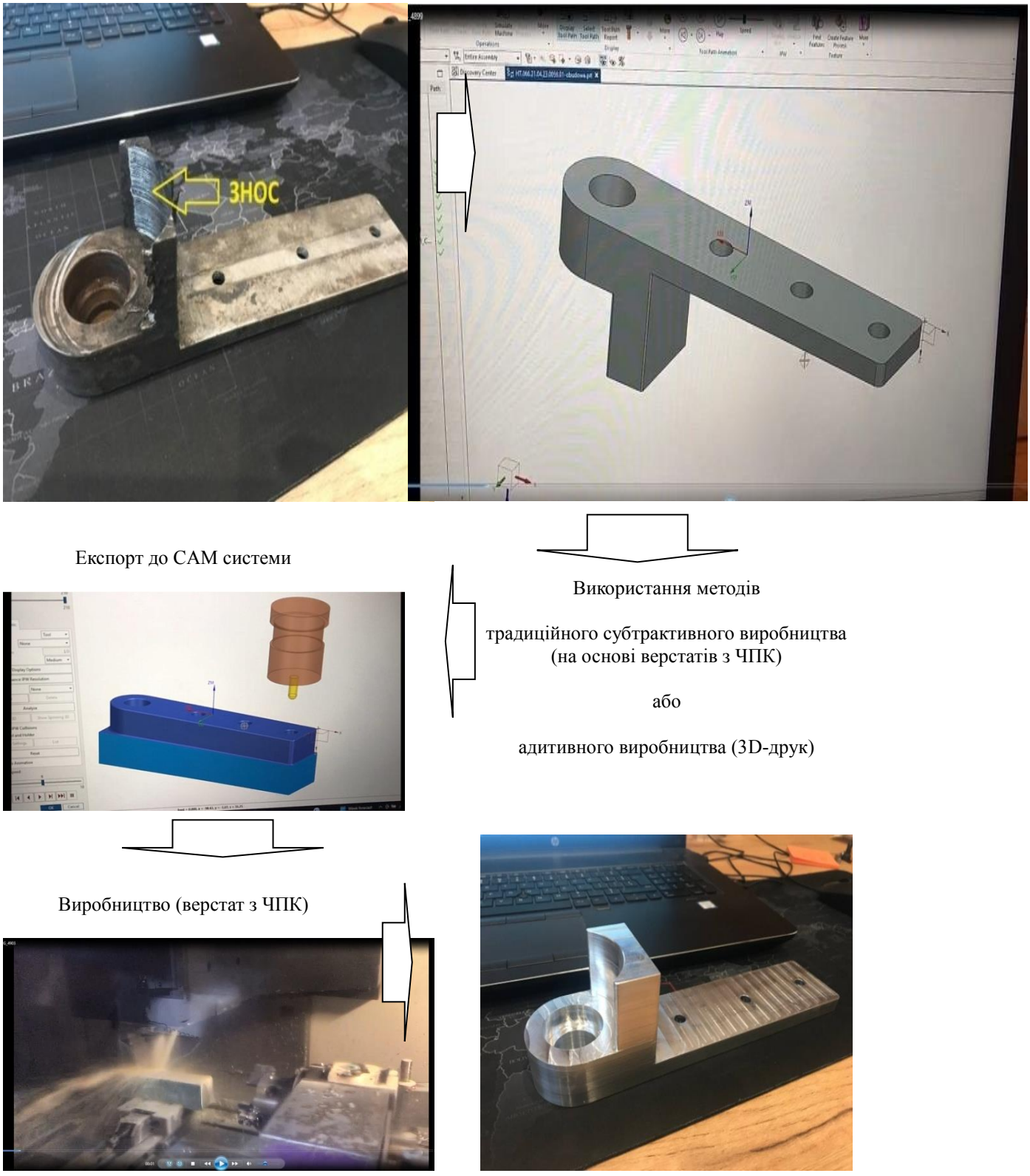


Рис. 10 – Реверсивний інжиніринг - створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком

Польська фірма HERMES TECHNIC [6] є компанією з багаторічним досвідом, яка займається широкими послугами в галузі металообробки, серійним і несерійним виробництвом, у тому числі регенерацією та ремонтом.Звичайною практикою став саме реверсивний інжиніринг зношених деталей за багаторазово перевіреною послідовністю (рис.11). Після аналізу деталі, відновлену копію якої необхідно отримати, створюється її 3D-модель методами ручного комп'ютерного графічного дизайну. Цей підхід є раціональним для нескладних деталей коли їх розміри є можливість отримати за допомогою звичайного мірильного інструменту. Подальший експорт 3D-моделі до CAM системи дозволяє згенерувати керуючу програму та виконати обробку на відповідному верстаті з ЧПК.

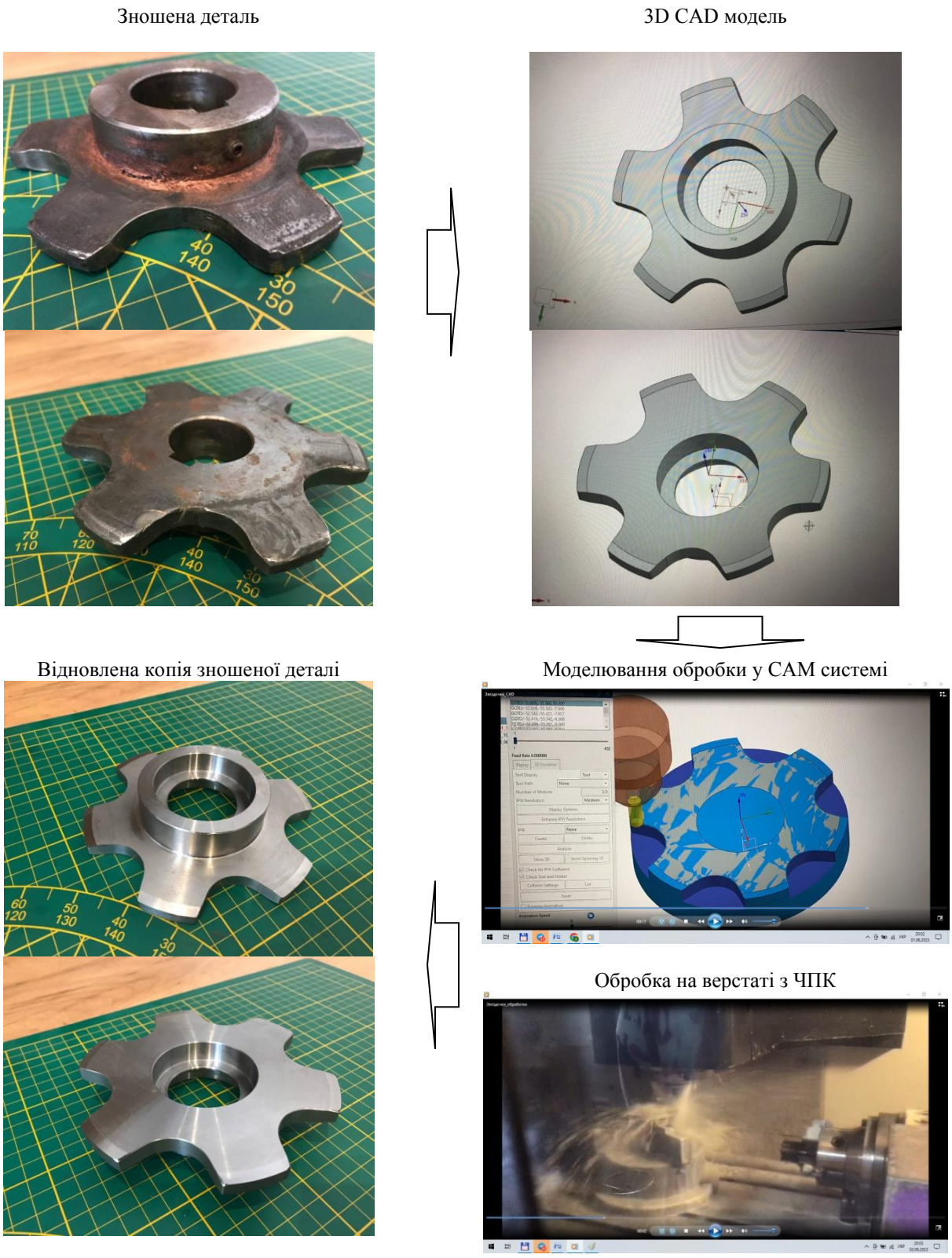


Рис. 11– Послідовність створення відновленої копії зношеної деталі

Висновки. Реверсивний інжиніринг прискорює та спрощує виробничі процеси. За допомогою сучасних високоточних технічних рішень (3D-сканерів та програмного забезпечення) метод забезпечує кілька важливих переваг:

Швидкість - багаторазове прискорення вимірювань порівняно з класичним методом, від кількох днів за кілька годин чи хвилин;

Точність – сканування дозволяє уникнути накопиченої помилки при знятті розмірів;

Універсальність - відтворення геометрії будь-якої складності та вироби практично будь-яких габаритів;

Контроль при проектуванні – швидка та наочна перевірка відхилення геометрії виробу від 3D-моделі у спеціалізованих програмах.

Слід вважати за доцільне вивчення, засвоєння та впровадження в практику роботи інженерів-механіків-технологів сучасного обладнання та програмних засобів для реалізації реверсивного інжинірингу на підприємствах машинобудівної галузі. Відповідно при підготовці фахівців за спеціальностями 131-Прикладна механіка та 133-Галузеве машинобудування виникає потреба у підготовці та викладанні окремого лекційного курсу та створення необхідної лабораторної бази для його забезпечення.

Список літератури:

1. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1158;https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis.
2.h ttps://hexagon.com/products/global-touch;http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1291.
3. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1262;https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500.
4. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=812;https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners.
5. Іщенко Г.І. Технологічне забезпечення якості виготовлення сложнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів: дис. на здобуття наук. ступ. кан. тех. наук 05.02.08 – технологія машинобудування. – Харків: НТУ»ХПІ», 2021 – 184 с.
6. https://www.hermes-technic.pl/
7. Петраков Ю.В. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1: навч. посіб. / Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с .

References (transliterated)

1. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1158;https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis.
2. https://hexagon.com/products/global-touch;http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1291.
3. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1262;https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500.
4. http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=812;https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners.
5. Ishchenko H.I. Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti vyhotovlennia slozhnoprofilnykh poverkhon turbinnykh lopatok z tytanovykh splaviv: dys. na zdobuttia nauk. stup. kan. tekh. nauk 05.02.08 – tekhnolohiia mashynobuduvannia. – Kharkiv: NTU»KhPI», 2021 – 184 s.
6. https://www.hermes-technic.pl/
7. Petrakov Yu.V. Tekhnolohii vyhotovlennia detalei skladnoi formy. Chastyna 1: navch. posib. / Yu.V. Petrakov, S.V. Sokhan, V.K. Frolov, V.M. Korenkov. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 288 s.

Поступила (received) 10.02.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr)–доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Яковенко Ігор Едуардович(Yakovenko Ihor)- кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; +38 (057) 707-66-34; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X

Скиба Олександр Сергійович (Skyba Oleksandr) – начальник групи сервісу верстатів УА ТОВ ФІРМА «КОДА», м. Харків; e-mail: a.skyba@koda.ua; тел. +38(096) 53 222 37

Калініченко Віктор Анатолійович (Kalinichenko Viktor)- Начальник ВТК, Метролог вищої категорії: довжина, неруйнівний контроль, ISO/IEC 17025 УА ТОВ ФІРМА «КОДА», м. Харків, e-mailv.kalinichenko@koda.ua; тел. +38(096) 619 09 95

Пшемислав Южкович (Przemysław Jóźkowicz) - HERMES TECHNIC, м.Легниця, Польща; +48 512 137 836; e-mail: pjozkowicz@wp.pl