

УДК 621.7.01

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-07

Денисюк В. Ю.

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Використання нових технологій виробництва дозволяє підвищити якість продукції, однак, збільшення темпів виробництва вимагає більшої швидкості роботи існуючих технологій контролю виробів чи застосування нових ефективних підходів. В статті описано сучасні технології контролю якості виробів для забезпечення конкурентоспроможності продукції та її затребуваності на ринку з урахуванням специфіки формування виробів. Найбільш перспективними методами сучасних технологій контролю виробів є комп'ютерна томографія, що використовується для детального контролю та аналізу різних виробів і об'єктів; використання оптичних сенсорів для двовимірного аналізу виробів; використання оптоволоконних інструментів у координатно-вимірювальних машинах.

Ключові слова: *контроль, комп'ютерна томографія, модель, деталь, об'єкт, вимірювання, виріб, аналіз, сенсор, точність, дефект, якість.*

Постановка проблеми. Основною галуззю промисловості, що забезпечує науково-технічний прогрес суспільства, є приладобудування, якому властиві єдині вектори розвитку, що приводять виробництво до нового типу. Головні тенденції цих змін пов'язані з поняттям Індустрія 4.0, яка визначає новий вид промисловості з характерними особливостями представлення всіх процесів та зв'язків. Ключовими поняттями нового виду промисловості є зниження об'єктів виробництва, персоналізація виробів та постійна мережева взаємодія всіх учасників процесу. Таким чином, технології швидкого виробництва починають відігравати все більш важливу роль у створенні нових виробів [1].

Сучасні прилади включають в себе крім механічної складової, також і мікроелектронні компоненти, підвищення темпів виробництва яких суттєво впливає на розвиток промисловості. При цьому, в умовах швидкого виробництва ключову роль починає відігравати можливість створення таких компонентів у найкоротші терміни. Розвиток відкритої електроніки дозволяє забезпечити такі темпи, тому освоєння нових підходів до швидкого контролю виробів у цій сфері дуже важливе для приладобудування [2, 3].

Проблема дослідження. Використання нових технологій виробництва дозволяє підвищити якість продукції, що випускається, однак, збільшення темпів виробництва вимагає більшої швидкості роботи існуючих технологій контролю виробу або застосування нових ефективних підходів.

Процес формування тривимірних моделей майбутніх виробів, що є центральними елементами сучасного виробництва, також повинен прискорюватися під час переходу до нових етапів розвитку виробництва. Тому, важливо освоювати сучасні технології швидкого моделювання, включаючи ключову технологію для вирішення цього завдання – тривимірне сканування. Вивчення та використання технології тривимірного сканування має велике значення для побудови нових видів виробництва.

В результаті ключовим напрямком розвитку сучасних підприємств є впровадження технологій швидкого моделювання, контролю та виробництва приладів на основі використання передових технологій та реалізації підходів Індустрія 4.0 [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якби зміни не відбувалися у виробництві, контроль виробів залишається ключовим поняттям, що забезпечує випуск якісних виробів. В умовах швидкого виробництва потреба у ефективному контролі не тільки знижується, а й стає більш затребуваною, що пов'язано з особливостями такого виробництва. Сам принцип швидкого виробництва визначає скорочення термінів на розробку та випуск продукції, тому до засобів контролю пред'являються ще більш жорсткі вимоги щодо продуктивності та якості контролю, що призводить до необхідності використовувати передові технології та підходи [5].

Точність геометричних параметрів виробів адитивного виробництва є комплексним поняттям, що включає точність розмірів елементів виробів, їх геометричних форм і взаємного розташування елементів. Існує досить великий діапазон точності виробів, отримуваних різними технологіями адитивного вирощування. Допуски можуть змінюватися від мікрметрів (і навіть часток мікрметра) до декількох часток міліметра [6].

Мета роботи полягає у проведенні аналізу сучасних технологій контролю виробів адитивного виробництва для забезпечення якості виробів та визначення конкурентоспроможності продукції за її затребуваністю на ринку.

Викладення основного матеріалу. Для вирішення завдань контролю параметрів геометричної точності виробів адитивного виробництва використовують цілий ряд засобів вимірювання, що випускаються серійно. Застосування контактних засобів вимірювання контролю макро- і мікрогеометричних показників точності виготовлення поверхонь виробів часто є неможливим. Це зумовлено складністю форми більшості виробів, характером та величиною нерівностей на поверхнях об'єктів. Розміри вимірювальних наконечників, що застосовуються в контактних інформаційно-вимірювальних системах, як правило, співставні з характерними параметрами мікрорельєфу, що вносить додаткову похибку до результатів координатних вимірювань.

Тому для вирішення поставленої задачі застосовують фотограметричні інформаційно-вимірювальні системи, лазерні триангуляційні сканери або модифікації зазначених приладів, основними перевагами яких є висока точність, висока швидкість сканування та значний обсяг вимірювальної інформації. Одним із провідних розробників та постачальників вимірювального обладнання є компанія Werth. Серед нових типів обладнання цієї компанії виділяється серія Tomoscore (рис. 1, а), що реалізує принцип комп'ютерної томографії для детального контролю різних об'єктів (рис. 1, б, в).

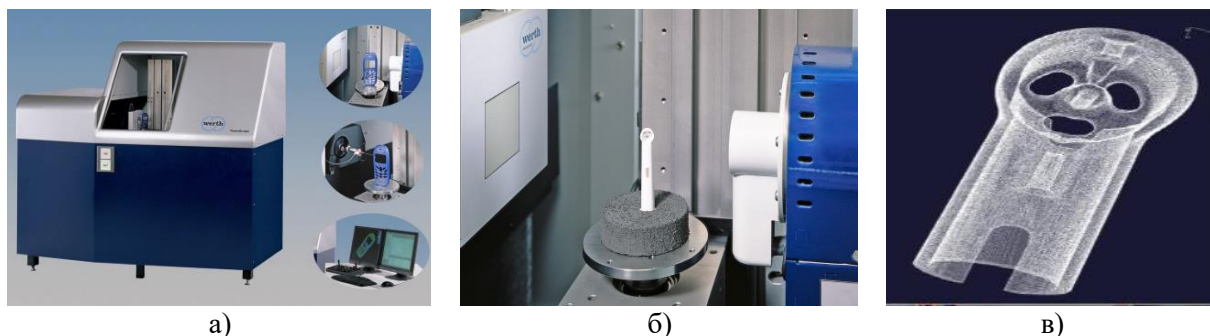


Рисунок 1 – Комп'ютерна томографія серії Tomoscore (а), процес зйомки головки зубної щітки (б) та модель, що отримана в результаті (в)

У процесі роботи рентген-випромінювання, що проектується на об'єкт, фіксується на спеціалізованому детекторі, тим самим створюючи знімок перерізу моделі (рис. 2, а). При цьому деталь поетапно повертається, що дозволяє отримати повну картину об'єкта як тривимірної моделі. Особливості процесу отримання знімків дозволяють вільно переміщати об'єкт між детектором та джерелом випромінювання. При цьому змінюється область, що захоплюється випромінюванням, і фіксується повний об'єкт або його частина. В результаті будь-яка область об'єкта може бути вивчена більш детально без втрати загальної роздільної здатності знімка (рис. 2, б).

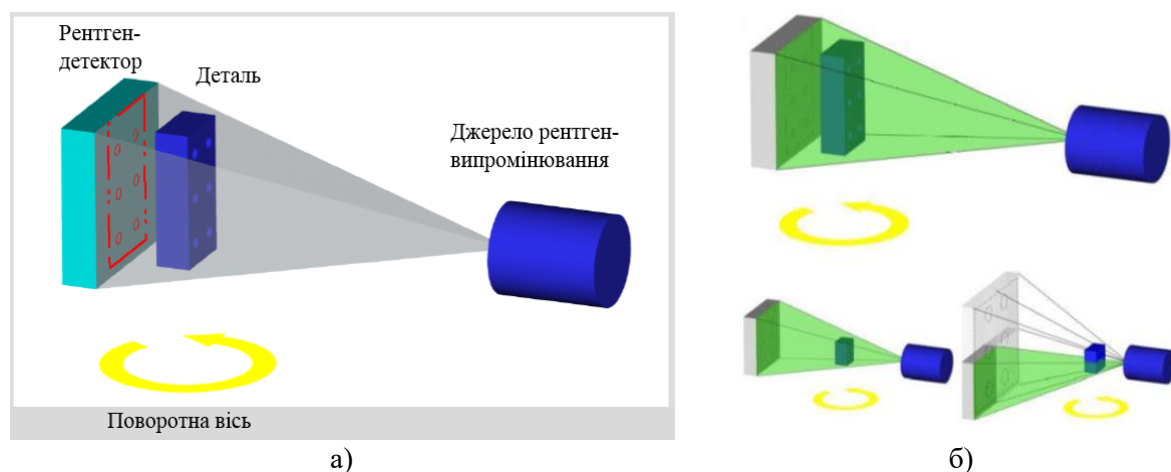


Рисунок 2 – Загальний принцип роботи томографа серії Tomoscore (а) та схематичне зображення особливостей масштабування областей (б)

Ключові переваги такого способу аналізу об'єкта впливають із його унікальності:

- повне 3D-вимірювання;
- повне, не деструктивне розпізнавання внутрішніх та зовнішніх форм за короткий період часу та з точністю контрольно-виміральної машини;
- точне вимірювання функціональних розмірів з обробкою зображення, лазером та щупом;
- результати відстежуються через калібрування безпосередньо на об'єкті, що вимірюється (штучна корекція);
- значне скорочення часу під час першої перевірки.

Відомо, що різні матеріали мають свої особливості поглинання рентген-випромінювання. На цій особливості базується спеціалізована функція аналізу об'єктів у системах Tomoscore – автоматичний поділ мультиматеріальних збірних виробів. Суть методу представлена на рисунку 3, на якому видно, що частина об'єкта не поглинає рентген-випромінювання. У цих областях знаходиться повітря. Інші області мають різний ступінь поглинання. Ті, що поглинають повністю, будуть мати білий колір і відмінно можуть бути розрізнені з сірими та чорними ділянками.

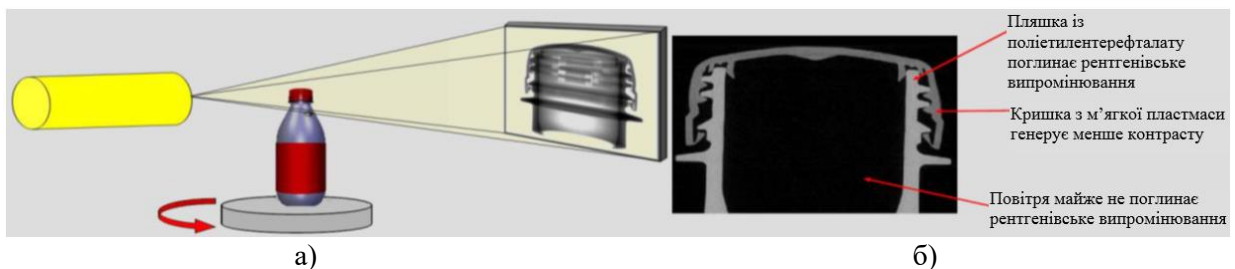


Рисунок 3 – Схема сканування збірних виробів (а) та подальшого розпізнавання компонентів (б)

В результаті ми не тільки отримуємо тривимірне складання (рис. 4, а, б), а й докладну гістограму матеріалів (рис. 4, в), що дозволяє проводити більш детальний аналіз і, у деяких випадках, точно визначати склад матеріалів виробу.



Рисунок 4 – Результат сканування складання (а) з наступним поділом на компоненти (б) та аналізом особливостей їх матеріалу (в)

Наступний рівень аналізу, унікальний для даного типу пристроїв, це внутрішній аналіз. Пошарове вивчення виробу дозволяє проаналізувати внутрішню структуру та визначити ті особливості, які недоступні іншим технологіям. Наприклад, при литті пластикових виробів усередину може потрапити повітря (рис. 5), що в майбутньому може порушити його працездатність або призвести до повного руйнування.

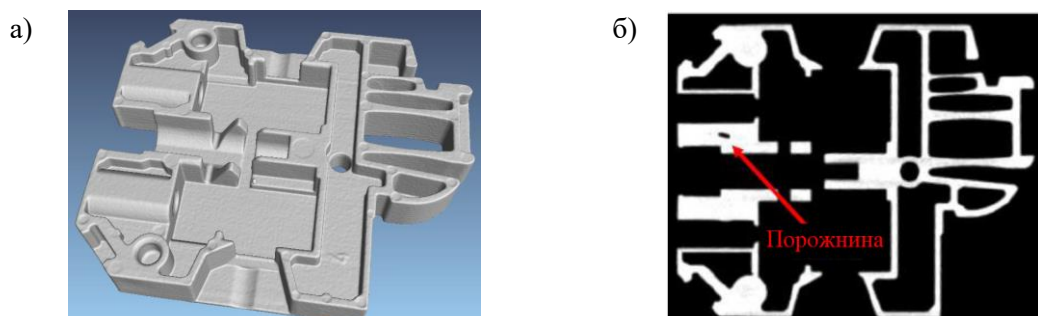


Рисунок 5 – Множина точок виробу (а) та 2D-переріз з візуалізацією внутрішніх порожнин, викликаних захопленням повітря (б)

Автоматичний аналіз порожнини за набором перерізів дозволяє створити карту розташування та розмірів порожнин (рис. 6, а). Аналіз властивостей таких порожнин дозволяє легко визначити пористість виробу (рис. 6, б).

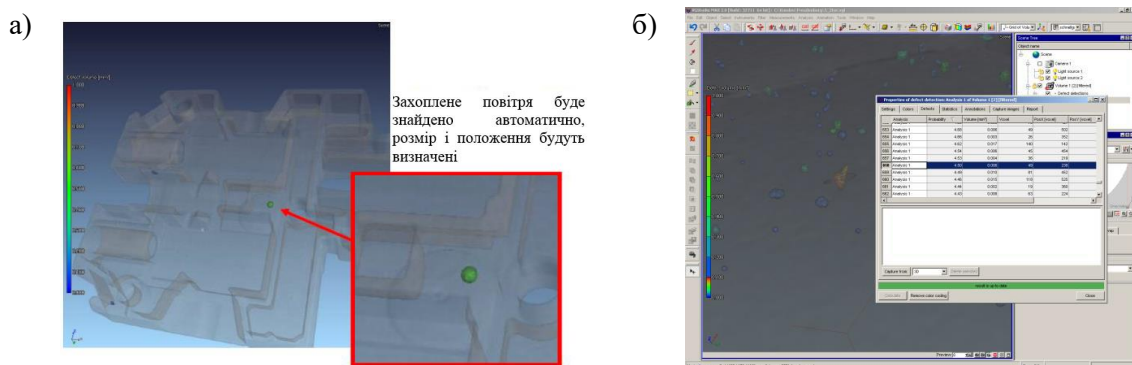


Рисунок 6 – Карта порожнин (а), виявлених у тривимірній моделі об'єкта, та результати її аналізу (б)

Аналогічно можуть бути проаналізовані тріщини (рис. 7), які або повністю розташовуються всередині моделі, або просто не можуть бути докладно вивчені за їх зовнішнім проявом.

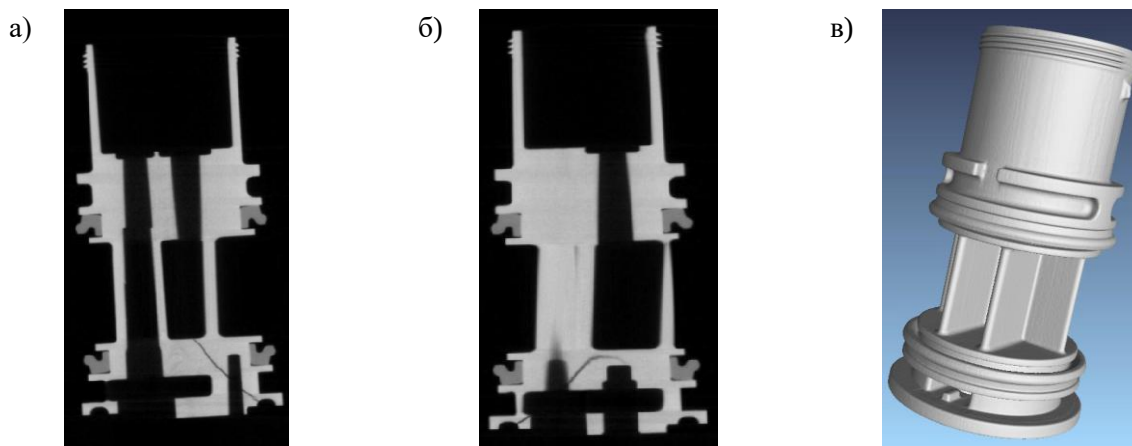


Рисунок 7 – Тріщини, які не видно зовні, але ясно помітні у поперечному перерізі

Якщо аналіз пористості або внутрішніх тріщин ще можливий при деструктивному аналізі, то функціональний аналіз складених виробів може бути зроблений лише з використанням представленої технології. Наприклад, процес деформації компонентів механічної ручки, залежно від її стану, аналізується тільки на основі рентген-перерізів. Так, викривлення пружини всередині ручки (рис. 8) може характеризувати рівномірність розподілу навантажень, що визначає довговічність виробу і вказує на потенційні проблеми при виробництві або складанні компонентів. Для виготовлення функціональних виробів підвищеної надійності такий аналіз має велике значення.

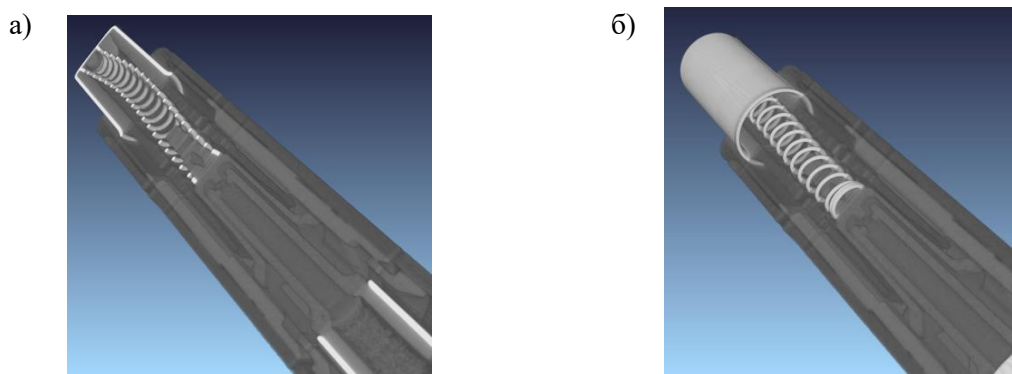


Рисунок 8 – Аналіз деформацій компонентів виробу на різних етапах функціонування

Не всі об'єкти вимагають об'ємного контролю. Частина об'єктів достатньо проаналізувати у двовимірному вигляді (рис. 9, а), щоб отримати більшу частину необхідних розмірів. Для вирішення таких завдань використовують спеціалізовані оптичні сенсори (рис. 9, б).

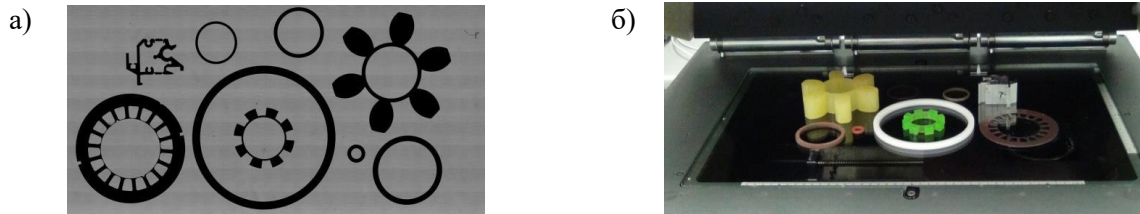


Рисунок 9 – Аналіз деталей простої геометрії (а) з використанням оптичних сенсорів (б)

Система автоматично фокусує сенсор перед об'єктом і здійснює його освітлення оптимальним способом для отримання чітких граней та якісного вимірювання (рис. 10, а). Отриманий знімок об'єкта аналізується та оперативно розбивається системою на примітиви (рис. 10, б), які вимірюються та автоматично контролюються при наявності еталонної моделі.

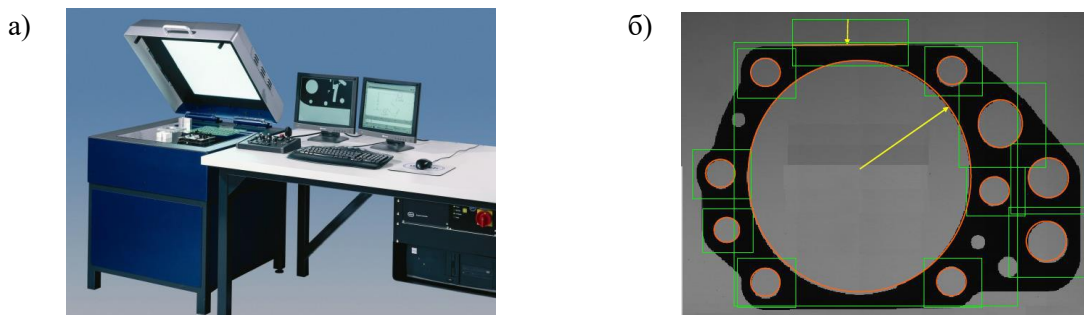


Рисунок 10 – Оптичний сенсор Score Check (а) та результати розпізнавання елементів на об'єкті (б)

Точність вимірювання такого пристрою становить $(2,5+L/120)$ мкм, при цьому роздільна здатність зображення може досягати 0,1 мкм. При контролі пошкоджених або засмічених виробів (рис. 11, а) технологія фільтрації дозволяє точно визначити контур та коректно проаналізувати виріб (рис. 11, б).

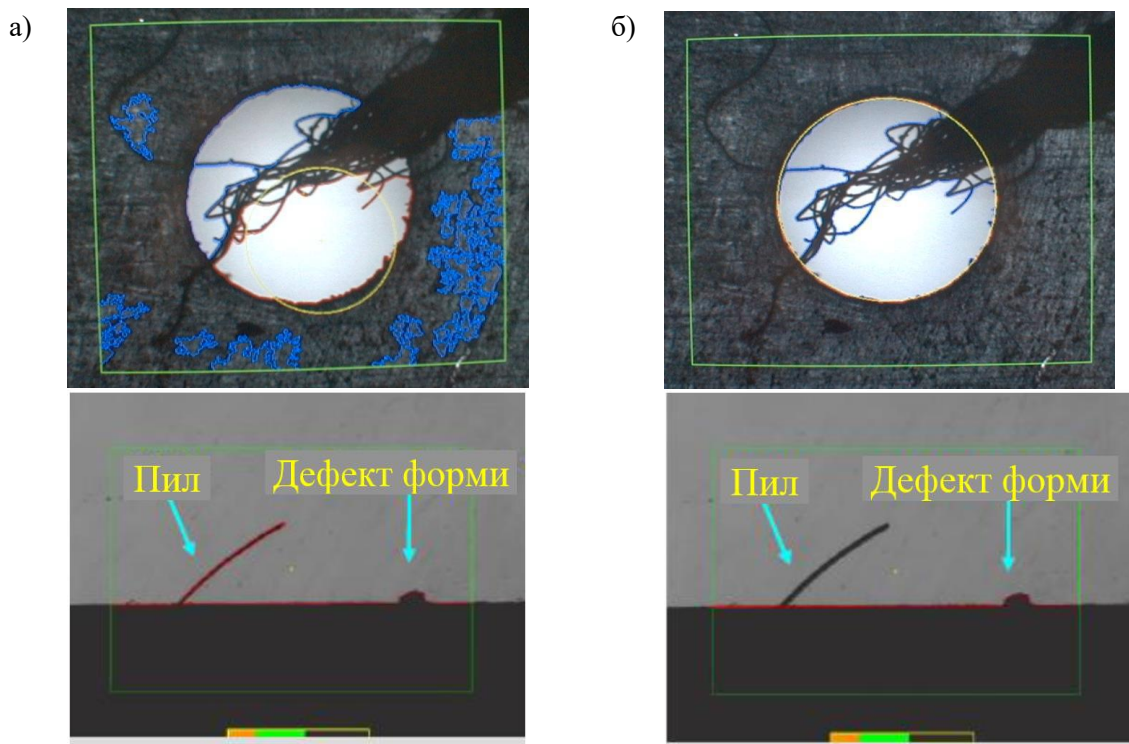


Рисунок 11 – Контроль розмірів без фільтрів (а) та з їх використанням (б)

Процес контролю може проводитися як у прохідному (рис. 12, а), так і у відбитому світлі (рис. 12, б), що дозволяє аналізувати об'єкт з двох сторін, істотно прискорити контроль і зробити його повністю автоматизованим.

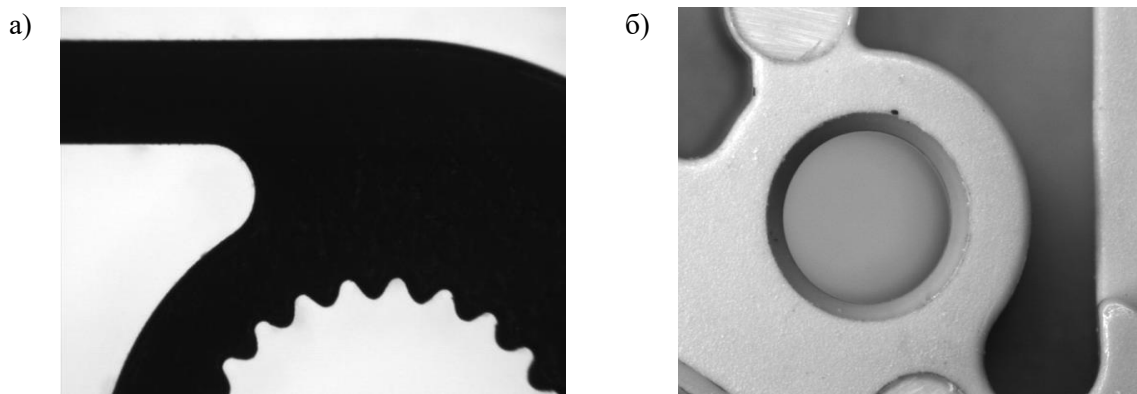


Рисунок 12 – Контроль розмірів у прохідному (а) і у відбитому (б) світлі

Рівень автоматизації також підвищується за рахунок використання системи автоматичного поєднання еталонної моделі із знімком виробу. При цьому об'єкт може автоматично повертатися або відображатися відносно осі симетрії (рис. 13).

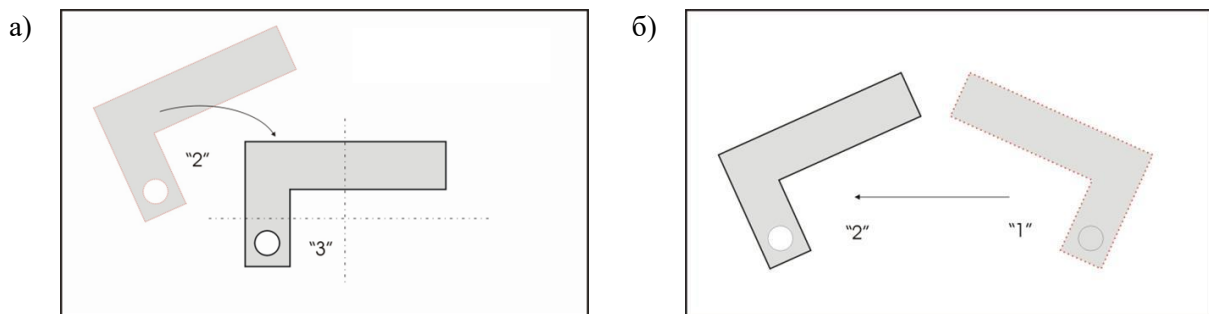


Рисунок 13 – Поворот еталонного об'єкта (а) або формування його дзеркального відображення (б)

За рахунок такої автоматизації суттєво спрощується робота оператора, що дозволяє працювати на обладнанні навіть із низькою кваліфікацією. Також забезпечується багатопозиційний контроль партії виробів невеликого розміру (рис. 14).

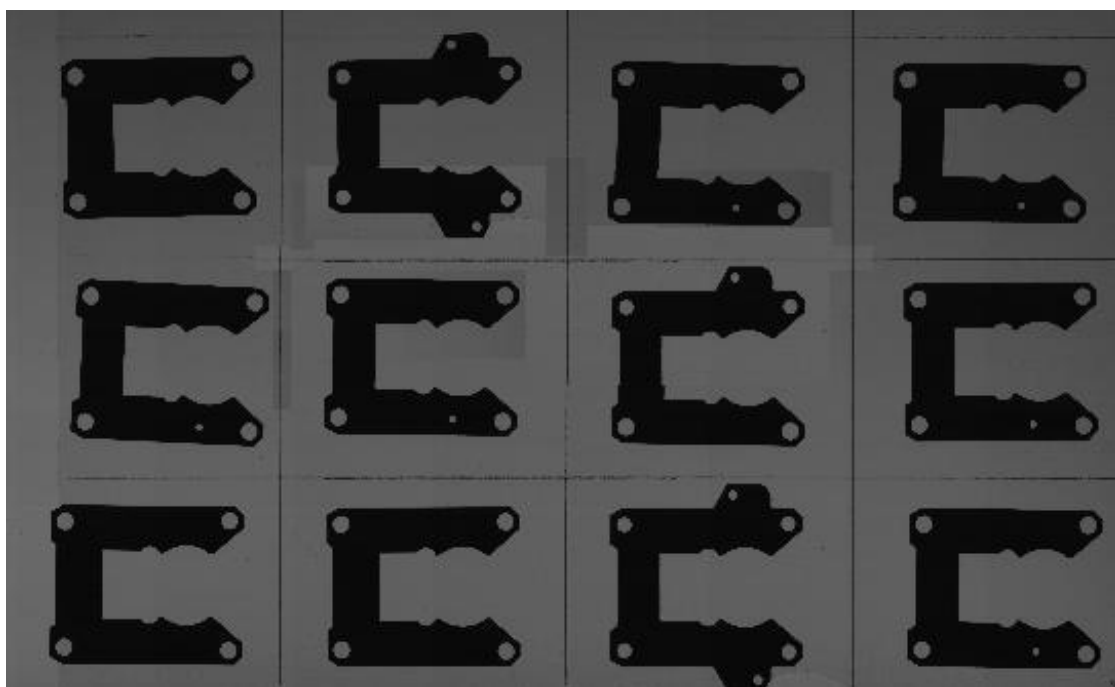


Рисунок 14 – Вимірювання набору однотипних виробів на палетах оптичного сенсора

При використанні додаткового пристрою у вигляді поворотної осі (рис. 15, а) на пристрої стає можливим проводити контроль осесиметричних виробів (рис. 15, б).

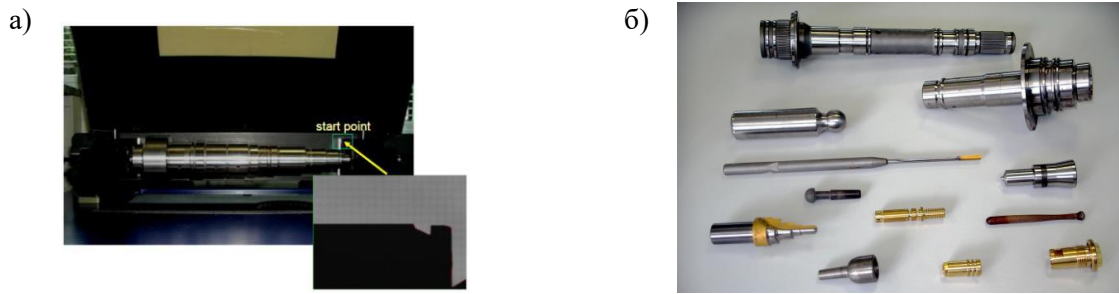


Рисунок 15 – Контроль осесиметричних виробів з використанням поворотної осі (а) та приклади таких виробів (б)

При цьому система автоматично визначає основні параметри таких виробів (рис. 16, а, б) та формує ескіз виробу (рис. 16, в).

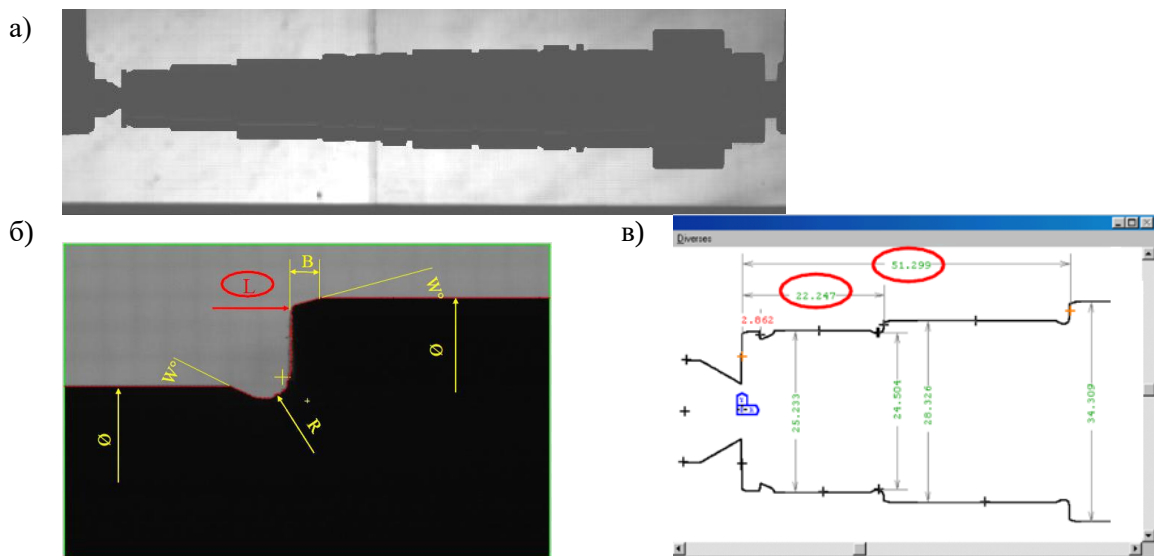


Рисунок 16 – Зображення осесиметричної деталі, отримане сенсором (а), результати його вимірювання (б) та контролю (в)

Серед обладнання, що застосовується для контролю виробів, продовжують домінувати координатно-вимірювальні пристрої, що забезпечують високий рівень автоматизації та точності вимірювання. Однак особливості застосовуваного інструменту часто обмежують і точність вимірювання та потенціальні можливості контролю складної геометрії.

Одним із способів підвищення якості контролю є застосування нових видів інструментів, що підвищують роздільну здатність при вимірюванні. Такому підходу відповідає оптоволоконний датчик Werth WFP. Розміри цього датчика настільки малі, що він без проблем може контролювати об'єкти дуже малого розміру (рис. 17, а). На рисунку 17 (б) представлено порівняння розміру звичайного щупа (праворуч вгорі) з розміром людського волосся (по центру) та розміром оптоволоконного щупа (зліва внизу).

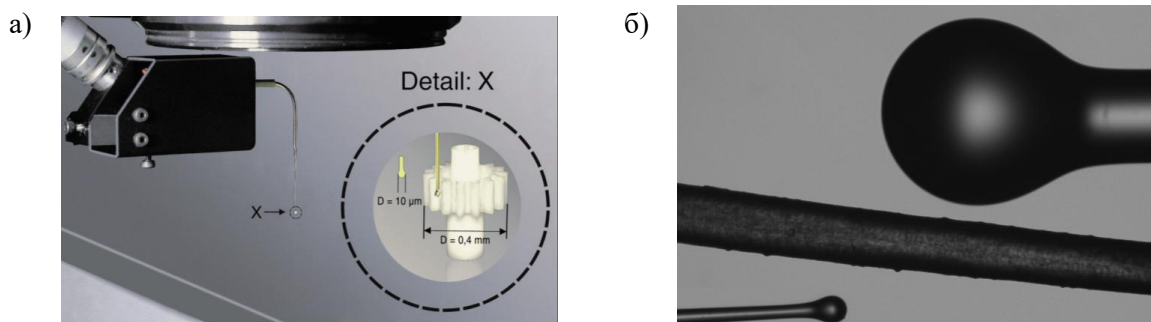


Рисунок 17 – Контроль мікрометрових розмірів (а) з використанням щупа малого діаметра (б)

Через малі розміри датчика його неможливо візуально розрізнити, тим самим не зафіксувати момент і положення його торкання поверхні об'єкта. В результаті необхідно використовувати спеціальний підхід до контролю, представлений на схемі (рис. 18).

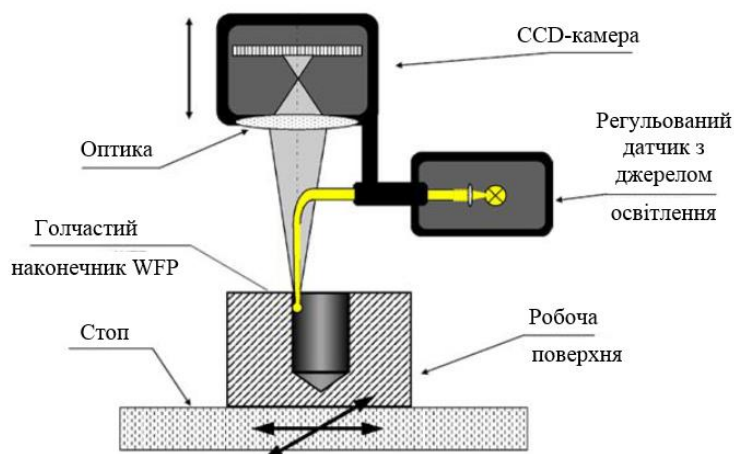


Рисунок 18 – Схема контролю виробів із використанням оптоволоконного щупа

Як видно із зображення, традиційна схема доповнюється джерелом освітлення та камерою для відстеження процесу. Особливість датчика дозволяє проводити через нього світло та формувати самоосвітлення на поверхні наконечника. У процесі контролю це самоосвітлення фіксується камерою зі збільшувальною оптикою, що дозволяє відстежувати як його переміщення поруч із деталлю (рис. 19, а), і момент торкання (рис. 19, б, в).

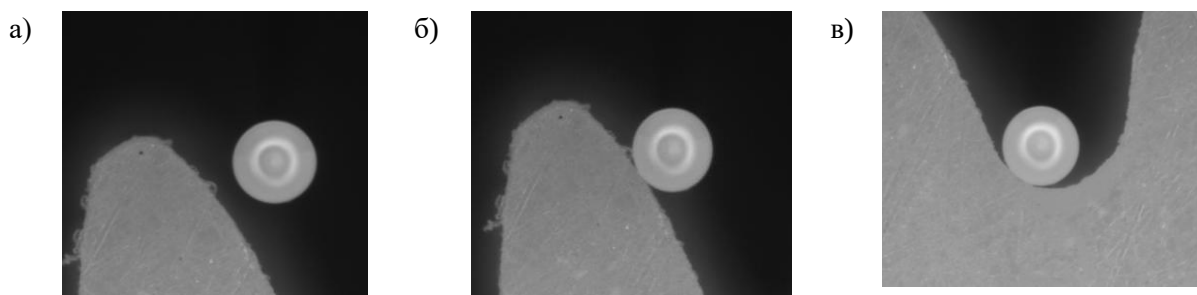


Рисунок 19 – Вимірювання профілю шестерні з використанням Werth Fiber Probe WFP у режимі самоосвітлення

Різні модифікації конструкції вимірювальної системи (рис. 20) дозволяють застосовувати такий засіб контролю для широкої номенклатури виробів. Особливості такої конструкції забезпечують низку переваг:

- можна виміряти найменші 3D-параметри (сфери від 20 мкм до 500 мкм);
- незначне вимірювальне зусилля («майже безконтактне»);
- найточніше вимірювання серед усіх існуючих щупів;
- відсутній вплив довжини щупа на результати контролю;
- можливий контроль шорсткості поверхні.

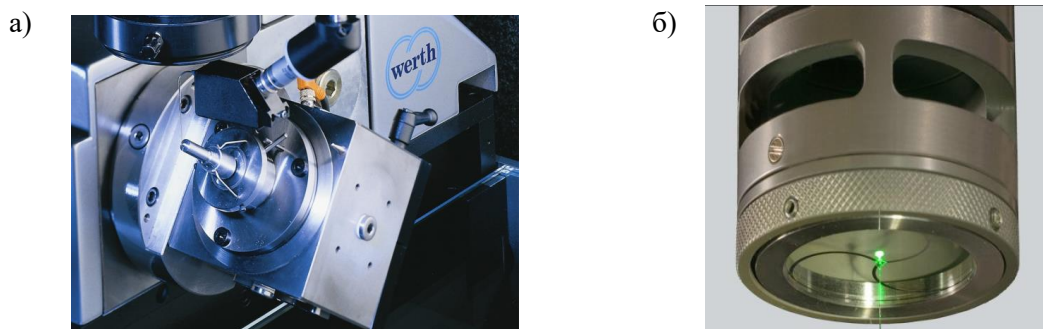


Рисунок 20 – Використання датчика у конструкції з поворотним столом (а) та у вигляді 3D мікро щупа (б)

Висновки. При побудові системи контролю якості в адитивному виробництві необхідно застосування методів контролю якості використовуваних матеріалів, поопераційних методів технологічного контролю, що забезпечують якість та повторюваність технологічних етапів процесу, методів вихідного контролю виробів. Комплексний контроль якості та його детальне документування особливо актуальні у зв'язку із серійним (дрібносерійним) виробництвом виробів пошарового вирощування, безпека експлуатації яких дуже важлива в автомобільній, авіаційній промисловості, медицині та інших сферах. Підвищення точності в адитивному виробництві пов'язане з використанням автоматичних стратегій управління параметрами процесу в реальному часі. Ефективним методом підвищення точності процесів адитивного виробництва та отримуваних виробів є інтеграція адитивної та традиційної обробки отримуваних виробів.

Інформаційні джерела

1. Білоусов Є. М., Борисов І. В. Концепція «Індустрія 4.0»: проблеми впровадження і окремі правові аспекти її реалізації в Україні: монографія. Харків: НДІ прав. забезп. інновац. розвитку НАПрН України, 2021. 200 с.
2. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 16. С. 38-47.
3. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 17. С. 33-41.
4. Пальчевський Б. О., Валецький, Б. П., Вараніцький Т. Л. Системи 3D моделювання: навч. посіб. Луцьк: ЛНТУ, 2016. 176 с.
5. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2023. 91 с.
6. Ступницький В. В. Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу: дис ... докт. техн. наук : 05.02.08. Львів, 2015. 423 с.

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR CONTROL OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

The use of new production technologies allows to improve the quality of products, however, increasing the production rate requires a higher speed of operation of existing product control technologies or the use of new effective approaches. The article describes modern technologies for product quality control to ensure the competitiveness of products and their demand in the market, taking into account the specifics of product formation. The most promising methods of modern product control technologies are computed tomography, which is used for detailed control and analysis of various products and objects; the use of optical sensors for two-dimensional analysis of products; the use of fiber-optic instruments in coordinate measuring machines.

Keywords: control, computed tomography, model, part, object, measurement, product, analysis, sensor, accuracy, defect, quality.