

УДК 681.5:[531.7+62-4]:[672+673]:[616.31::616.77] <https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.149>

© О.Л. Шульгін¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ ДЕНТАЛЬНОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО ЗОРУ

© O. Shulhin¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

AUTOMATION OF THE QUALITY CONTROL PROCESS OF DENTAL IMPLANTATION PRODUCTS USING MACHINE VISION

Мета. Розробка автоматизованої системи контролю якості продукції дентальної імплантації для усунення недоліків ручного контролю якості, серед яких можна виділити: необхідність залучення більшої кількості персоналу, високі витрати часу, можливість помилок, пов'язаних з наявністю людського фактору і складність своєчасного виявлення дефектів.

Методика. Дослідження виконувалось шляхом аналізу процесу виробництва дентальних імплантатів, зокрема, процесу контролю якості продукції. При цьому було розглянуто основні проблеми традиційного підходу до контролю якості дентальних імплантатів. Виконано збір статистичних даних та проведено аналіз існуючих дефектів продукції, запропоновано їх класифікацію. Також в рамках дослідження було проведено огляд існуючих рішень на основі машинного зору, що можуть бути застосовані у галузі дефектоскопії.

Результати. Дослідження пропонує застосування технологій машинного зору для автоматизованого розпізнавання дефектів на поверхні дентальних імплантатів. Запропоноване рішення дозволяє ефективно розпізнавати дефекти дентальних імплантатів, включаючи ті, що наразі можуть бути виявлені тільки методом візуального огляду. Також в рамках дослідження визначено недоліки ручного контролю якості, проведено аналіз та запропоновано класифікацію дефектів продукції дентальної імплантації, сформовано статистику виникнення цих дефектів у виробництві.

Наукова новизна. У межах дослідження запропоновано класифікацію дефектів продукції дентальної імплантації, що дає змогу визначити цільові категорії для системи машинного зору. На основі статистичного аналізу встановлено переважання візуальних дефектів, що підтверджує доцільність впровадження автоматизованого контролю якості із застосуванням технологій машинного зору на базі ШІ. Подальшого розвитку набули підходи до адаптації таких технологій до специфіки виробництва дентальних імплантатів.

Практична значимість. Автоматизована система контролю якості дентальних імплантатів може бути застосована у виробництві з метою підвищення якості продукції. Впровадження запропонованої системи дозволить прискорити процес контролю якості, підвищити його точність, виключити помилки, пов'язані з наявністю людського фактору, забезпечити своєчасне реагування та усунення причин виникнення дефектів.

Ключові слова: автоматизація, контроль якості, машинний зір, дентальна імплантація.

Вступ. Дентальна імплантація є однією з найбільш прогресивних методик у сучасній стоматології, що постійно вдосконалюється завдяки новітнім технологіям і матеріалам. Сучасні імплантати вирізняються високою біосумісністю, міцністю та здатністю до остеointegraції – процесу надійного з'єднання з

кістковою тканиною. Це забезпечує стабільність та довговічність виробів, необхідні для повноцінного функціонування імплантатів.

Для виготовлення дентальних імплантатів використовують два основні підходи: механічну обробку титану та адитивне виробництво. Основна різниця між ними полягає у способі формування імплантатів: у першому випадку використовуються токарно-фрезерні верстати, у другому – формування відбувається шляхом плавлення металу.

Механічна обробка виконується на високоточних верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), які забезпечують повний цикл металообробки (токарні, фрезерні, свердлильні роботи тощо) з точністю до мікронів і мінімальною кількістю відходів завдяки автоматизованому управлінню [1].

Адитивне виробництво передбачає пошарове створення деталей з металевого порошку. До основних методів належать: селективне лазерне плавлення (SLM), електронно-променеве плавлення (EBM) та пряме лазерне спікання металу (DMLS) [2, 3]. Вони дозволяють швидко створювати прототипи, забезпечують гнучкість дизайну і зменшують обсяг матеріальних витрат. Однак, зокрема при SLM, виникає проблема нерівномірної шорсткості поверхні, що може впливати на остеоінтеграцію [2].

Незалежно від методу виготовлення, виробничий процес має спільну структуру [1]:

1. Дизайн і розробка. Створюються креслення та 3D-моделі з урахуванням вимог до міцності, біосумісності та інших вимог.

2. Механічна обробка. Реалізується за допомогою ЧПК-верстатів або методів 3D-друку. У випадку токарної обробки здійснюється знімання металу з обертової заготовки для формування заданої геометрії. Адитивне виробництво здійснюється шляхом лазерного чи електронного плавлення порошкових металів [1–3].

3. Обробка поверхні. Включає піскоструминну та кислотну обробку, галтування, анодування.

4. Очищення. Після основних операцій проводиться багаторівневе ультразвукове очищення, що забезпечує видалення мікрочастинок і залишкових забруднень навіть у важкодоступних структурах.

5. Стерилізація. Знищення мікроорганізмів на поверхні виробів для забезпечення їхньої безпеки під час транспортування і зберігання.

6. Упаковка. Вироби герметично пакуються в умовах чистої кімнати та маркуються відповідно до вимог.

7. Контроль якості. Проводиться на всіх етапах виробництва і включає візуальну та мікроскопічну перевірку, інструментальний контроль геометрії, а також перевірку сировини. Використовуються мікрометри, калібри, оптичні системи, мікроскопи тощо.

До виробництва та якості продукції дентальної імплантації висуваються вимоги, зумовлені як біологічними факторами, так і технологічними особливостями самого процесу. Однією з ключових умов є забезпечення біосумісності та здатності імплантату до остеоінтеграції, що досягається використанням матеріалів, які не викликають відторгнення, таких як титанові сплави або біокераміка, а

також формуванням спеціальної поверхневої структури для сприяння росту кісткової тканини. Важливе значення має дотримання стерильності на всіх етапах виготовлення й пакування імплантатів для уникнення інфекційних ускладнень. Не менш суттєвими є вимоги до механічної міцності та довговічності: імплантат повинен витримувати значні жувальні навантаження, бути стійким до зносу, корозії та дії біологічного середовища. Вироби мають виготовлятися з високою точністю відповідно до анатомічних особливостей пацієнта, що реалізується завдяки застосуванню CAD/CAM-систем, 3D-друку й автоматизованих виробничих технологій. Індивідуалізація конструкцій на основі цифрових моделей дозволяє ефективно враховувати специфіку кожного клінічного випадку, особливо при складних анатомічних умовах. Крім того, ефективність виробництва визначається ступенем його автоматизації, швидкістю виготовлення продукції, економічним використанням ресурсів та стабільністю якості. Надійна система контролю на всіх етапах – від вибору сировини до остаточної стерилізації – є необхідною умовою для забезпечення безпечності та відповідності готової продукції сучасним медичним стандартам.

Контроль якості продукції дентальної імплантації є складним багатоступеневим процесом, що потребує точності та уваги до деталей. Незважаючи на значну автоматизацію виробництва, більшість контрольних процедур сьогодні виконуються вручну операторами верстатів та фахівцями відділу технічного контролю. Через великі обсяги продукції та обмежений час перевірка здійснюється вибірково – переважно для останнього виробу з партії або з фіксованим інтервалом. У разі виявлення дефекту перевірці підлягає вся партія. Якщо встановлюються невідповідності, проводиться додатковий аналіз параметрів виробів та стану обладнання, оскільки дефекти часто пов'язані зі зносом інструменту або механічних частин верстата.

Першим етапом контролю якості є очищення зразка, підготовленого до перевірки. Виріб очищується від мастила й стружки за допомогою стисненого повітря та протирається, щоб забезпечити точність подальших вимірювань.

На другому етапі здійснюється вимірювання основних геометричних параметрів за допомогою штангенциркулів, мікрометрів, пасаметрів, глибиномірів. Деякі параметри перевіряються оптично за допомогою тіньового оптичного вимірювача, що дозволяє оцінити відповідність розмірів допускам.

Третій етап передбачає перевірку внутрішніх елементів, таких як різьби й шестигранники. Для цього використовуються калібри типу «прохід/непрохід», а також піни відповідного діаметру для оцінки точності виготовлення отворів.

На четвертому етапі проводиться візуальний огляд під мікроскопом, який дозволяє виявити дефекти поверхні, співвісності, наявність задирок або інших порушень обробки. За потреби виріб направляють на додаткову перевірку за допомогою комп'ютеризованого оптичного вимірювача.

П'ятий етап – це застосування комп'ютеризованих оптичних вимірювачів з камерами високої роздільності, що підключені до промислових мікроскопів. Вони дозволяють точно оцінити розміри та візуальні характеристики виробу.

При цьому особлива увага приділяється зонам, де потенційно можуть бути виявлені дефекти.

Після завершення перевірок виробу очищуються в ультразвукових ваннах та проходять галтування з використанням абразивних елементів. При цьому важливо враховувати матеріал: наприклад, обробка «голками» не підходить для магнітних сплавів.

Уся інформація про результати контролю фіксується в маршрутній карті виробу. У разі виявлення дефекту оператор верстата отримує повідомлення для коригування параметрів обробки, щоб своєчасно запобігти повторенню проблем у наступних зразках.

Загалом такий підхід до контролю якості має ряд суттєвих недоліків, серед яких можна виділити наступні: високі витрати часу виробничого персоналу, складність своєчасного виявлення дефектів, можливість помилок, пов'язаних з наявністю людського фактору.

Основна частина. Для вирішення проблем, притаманних ручному контролю якості, пропонується розробка автоматизованої системи, що використовує засоби машинного зору. Для цього також важливо дослідити існуючі дефекти, виконати їх класифікацію та дослідити статистичні дані щодо їх виникнення у процесі виробництва.

Дефекти продукції дентальної імплантації є однією з найбільших проблем, що впливає на її якість та безпеку для пацієнтів. Своєчасне виявлення дефектів на різних етапах виробництва імплантатів є критично важливим, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до серйозних наслідків, таких як відторгнення імплантату або розвиток ускладнень у пацієнтів. Імплантати з титану, завдяки своїй біосумісності та механічним властивостям, є основним вибором у стоматології і якість їх виготовлення повинна відповідати стандартам. Проте, на сьогоднішній день відсутня чітка і єдина класифікація дефектів для титанових дентальних імплантів. Це ускладнює процес стандартизації контролю якості, адже дефекти можуть проявлятися на різних етапах виготовлення та мати різні наслідки для пацієнта. У зв'язку з цим, розробка чіткої класифікації дефектів є важливою складовою для покращення процесів виробництва та забезпечення належної якості продукції. Цю задачу можливо виконати, розглянувши інформацію про відомі дефекти металевих виробів та проаналізувавши результати контролю якості, отримані на виробництві продукції дентальної імплантації.

Класифікація дефектів відіграє важливу роль в рамках розробки системи контролю якості, що використовує технології машинного зору, оскільки розпізнавання образів є задачею класифікації. Для створення класифікації дефектів було проаналізовано інформацію про технічний контроль виробів, надану підприємством АВМ Technology. Водночас із класифікацією доцільно розглядати і статистику виявлення кожного типу дефектів. В рамках дослідження було виділено 10 виробів, які виготовляються підприємством у найбільшій кількості, та проаналізовано архівні записи про кожну виготовлену партію. Випадок появи дефекту в партії означає, що певна кількість виробів могла містити цей дефект, при цьому

кількість таких виробів завжди залежить від своєчасності виявлення дефекту та усунення причини його виникнення.

Усі дефекти, що зустрічаються під час виробництва дентальних імплантатів можна умовно розділити на геометричні та візуальні. Перші можуть бути виміряні або перевірені механічно, другі – визначаються виключно візуальними методами контролю. При цьому на виробництві використовується певний перелік термінів, на основі якого пропонується розробити таку класифікацію:

1. Невідповідність розміру – відхилення певного розміру від заданого допуску. Згідно зі статистикою, дефект зустрічається у 0,96% партій.

2. Неспіввісність – невідповідність осей симетрії у різних частинах деталі, може проявлятися у непаралельності граней, їхньому частковому скругленні. Такий дефект зустрічається рідше, ніж у 0,3% партій.

3. Дефект позиціонування – впадина або виступ на одній зі сторін виробу. Зустрічається рідше, ніж у 0,3% партій.

4. Непрохід калібру – невідповідність геометричної форми внутрішньої шестигранної або циліндричної частини імплантату. Може проявлятися у «сходинках» або інших дефектах на гранях внутрішнього шестигранника або циліндра. Дефект зустрічається у 1,61% партій.

5. Непрохід різьби – зменшений розмір різьби, що ускладнює або унеможливує вкручування гвинта у виріб. Зустрічається рідше, ніж у 0,3% партій.

6. Прохід непроходу – збільшений розмір різьби, що призводить до можливості вкручування «непроходу» у виріб. Зустрічається у 0,32% партій.

7. Сліди від перехвату – сліди, що залишає цанга верстату, яка тримає деталь під час обробки. Найбільш розповсюджений дефект – зустрічається у 15,43% партій.

8. Подряпини – невеликі поздовжні заглиблення на поверхні виробу. Дефект зустрічається рідше, ніж у 0,3% партій.

9. Зарізи – дефекти на поверхні, що утворюються внаслідок механічних пошкоджень, які призводять до появи виступів або волокнистих ушкоджень на матеріалі. Зарізи зустрічаються у 0,96% партій.

10. Шорсткість поверхні – невідповідність шорсткості показникам, визначеним технологічною документацією. Дефекти шорсткості зустрічаються рідше, ніж у 0,3% партій.

11. Вм'ятини – поглиблення на поверхні виробу, що утворюються під впливом зовнішнього механічного навантаження, без порушення цілісності матеріалу. Дефект зустрічається у 4,5% партій.

12. Налипання – утворення частинок матеріалу, що залишаються на поверхні виробу внаслідок неправильного процесу обробки або забруднення інструментів. Зустрічається у 0,64% партій.

13. Задирки – дрібні частинки матеріалу, що піднялися з поверхні виробу під час обробки, часто спричиняючи мікроскопічні тріщини або пошкодження на матеріалі. Другий за розповсюдженістю дефект – зустрічається у 12,22% партій.

14. Сходинки – дефекти на поверхні виробу у вигляді схоподібних перехідних виступів, які виникають внаслідок нерівномірного зняття матеріалу під

час обробки, зазвичай через неправильні налаштування обладнання або неякісне його використання. Зустрічаються рідше, ніж у 0,3% партій.

15. Техприбуток – дефект, що виникає внаслідок неправильного використання інструментів чи обладнання, який призводить до утворення надмірних або непотрібних виступів на поверхні (найчастіше на торцях) виробу, що заважають нормальному функціонуванню чи експлуатації імплантату. Дефект зустрічається рідше, ніж у 0,3% партій.

16. Підпал – зміна кольору металу через підвищену температуру під час обробки металу, наприклад, від високих обертів. Виникає дуже рідко. Зустрічається у 0,32% перевірених партій.

Отже, після визначення класифікації дефектів, доцільно детальніше розглянути статистику їх виявлення у виробництві та зробити висновки щодо їх розповсюдженості. Шляхом аналізу архівних записів було визначено, що найчастіше зустрічаються дефекти, які можливо виявити виключно методом візуального огляду виробів під мікроскопом. Найрозповсюдженішим дефектом виявився слід від перехвату, що обумовлено однаковою фіксацією деталей у верстатах за допомогою цанги. На другому місці – задирки, які з'являються під час обробки металу верстатом, найчастіше зустрічаються на виробах, що мають різьбу. Третім найрозповсюдженішим дефектом є вм'ятина, що може з'являтися як в процесі обробки, так і після неї.

У сучасному виробництві процес контролю якості продукції дентальної імплантації можна вважати частково автоматизованим. Тобто, окремі етапи контролю якості передбачають застосування сучасних вимірювальних засобів, оснащених електронними вимірювальними перетворювачами, мікропроцесорними системами тощо. Наприклад, під час вимірювань деяких геометричних параметрів застосовуються тіньові оптичні проєктори, а у випадках необхідності більш детального огляду виробів, можуть бути застосовані також комп'ютеризовані оптичні вимірювачі двовимірних зображень. Перші використовують проєкцію тіні виробу для вимірювання його розмірів, проте вони не дозволяють оглянути поверхню виробу, а їхня точність є доволі обмеженою [4]. Другі оснащені промисловими мікроскопами з телецентричними лінзами та камерами високої роздільної здатності, що в режимі реального часу передають зображення на комп'ютер, і дозволяють виконувати точні вимірювання та оглядати поверхню, використовуючи спеціальне програмне забезпечення, але вони також вимагають значної участі оператора під час виконання налаштувань та управління процесом вимірювань, зокрема, позиціонування виробу та фокусування мікроскопу [5].

Для автоматизації процесів контролю якості одним з найефективніших рішень можна вважати розробку систем на основі машинного зору. Вони дозволяють автоматично розпізнавати візуальні дефекти виробів за мінімальної участі людини. Всі системи машинного зору можна умовно розділити на універсальні та спеціалізовані. Універсальні забезпечують точне і швидке розпізнавання дефектів, використовуючи камери з високою роздільною здатністю, проте вони не мають можливостей для достатнього оптичного збільшення зображення, а також

порівняно низьку точність вимірювань розмірів малих об'єктів складної форми, що є необхідними умовами для ефективного контролю якості дентальних імплантатів. Спеціалізовані системи машинного зору є більш складними і будуються на основі камер з високою роздільною здатністю та спеціалізованих мікропроцесорних контролерів або комп'ютерів для обробки отриманих зображень. У випадку аналізу малих об'єктів зі складними геометричними характеристиками доцільно разом з камерою використовувати також мікроскоп, оснащений телецентричною лінзою, яка дозволяє отримувати чітке зображення без оптичних спотворень під час збільшення. Спеціалізовані системи машинного зору можуть бути застосовані у багатьох галузях, дозволяючи вирішувати різноманітні задачі розпізнавання [6, 7]. У галузі дефектоскопії відомі рішення, що передбачають використання цифрових мікроскопів з великою роздільною здатністю для виявлення дефектів на об'єктах під час обертання в режимі реального часу, що дозволяє одночасно проводити вимірювання та розпізнавати дефекти на різних поверхнях виробів [8]. Проте жодна з існуючих систем не дозволяє забезпечити достатню автоматизацію процесу контролю якості та високу точність всебічного аналізу дентальних імплантатів, що мають малі розміри та складні геометричні характеристики.

Отже, можна зробити висновок про доцільність розробки автоматизованої системи контролю якості продукції дентальної імплантації на основі машинного зору. Для аналізу зразків система використовує цифровий мікроскоп з телецентричною лінзою та камерою високої роздільної здатності, що дозволяє отримувати чітке збільшене зображення без спотворень. Для обробки отриманих зображень пропонується використовувати мікрокомп'ютер, що має достатню обчислювальну потужність для одночасної обробки зображень та автоматичного керування системою в режимі реального часу. Для автоматизації наведення фокусу мікроскопа на контури або поверхні зразків необхідно автоматично регулювати відстань між об'єктивом мікроскопа та зразком. Тому в системі використовується привід, що приводить мікроскоп до руху у вертикальній площині та дозволяє автоматично адаптувати систему для роботи з виробами різних типів та розмірів. Необхідно також забезпечувати повний огляд зразка. Для цього система використовує другий привід, що обертає зразок перед об'єктивом мікроскопа у горизонтальній площині. Для регулювання фокусної відстані може бути застосований кроковий двигун, що дозволяє забезпечити достатньо точне позиціонування мікроскопу, а для повного обертання зразку можна застосувати сервопривод. Для зручного відображення даних та контролю процесу в реальному часі система оснащена графічним інтерфейсом та підключеними до мікрокомп'ютера пристроями введення/виведення. Така структура системи дозволяє в режимі реального часу аналізувати бічну поверхню дентального імплантату, виконувати вимірювання розмірів, розпізнавати візуальні дефекти та оцінювати відповідність виробу встановленим на виробництві вимогам щодо якості продукції. Структурна схема системи наведена на рисунку.

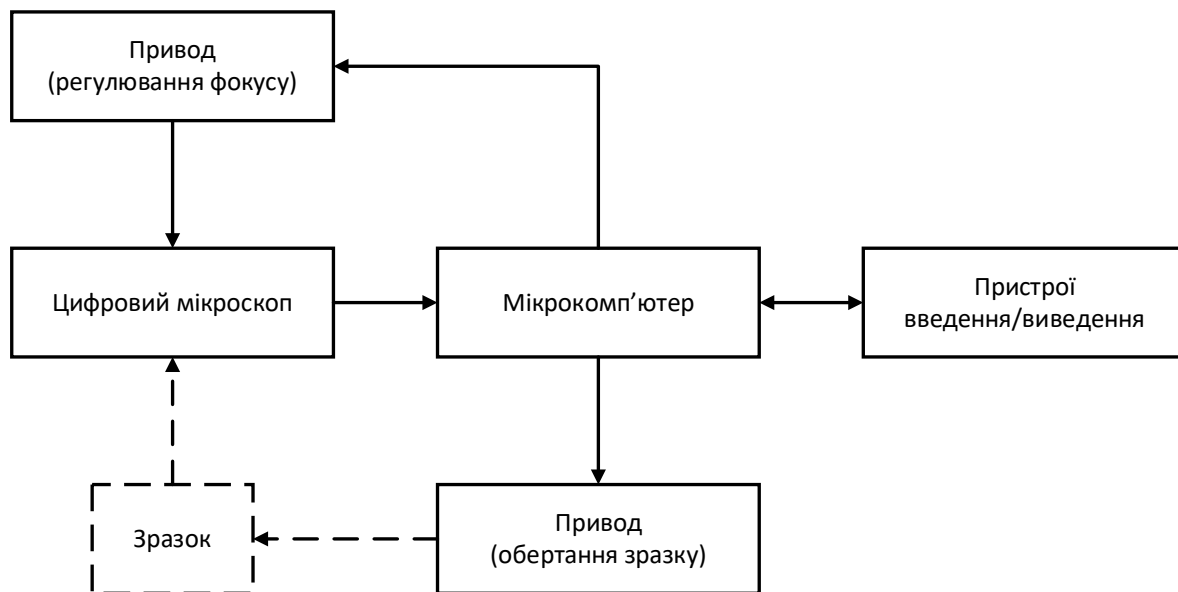


Рис. Структурна схема системи

Алгоритм роботи автоматизованої системи контролю якості продукції дентальної імплантації, так само, як і у випадку ручного контролю якості, є багатоетапним. Для початку контролю якості оператор має встановити зразок у горизонтальному затискачі, потім необхідно вибрати тип виробу у графічному інтерфейсі, після чого система завантажує всі необхідні дані про контрольований виріб (геометричні параметри, контрольовані розміри, допуски тощо) і починає сканування. Цей процес включає два основних етапи: вимірювання розмірів та розпізнавання візуальних дефектів. Для цього система спочатку визначає поточну чіткість зображення, після чого починає переміщувати об'єктив мікроскопа ближче до зразку або далі від нього. Коли значення чіткості зображення досягає максимуму, переміщення об'єктива припиняється, система розпізнає контури зразку та відносно них вимірює всі необхідні розміри. Після вимірювання розмірів, система машинного зору починає аналіз поверхні виробу на наявність візуальних дефектів. Для цього у системі використовуються технології машинного зору на базі штучного інтелекту. Після пошуку дефектів на поверхні виробу, зразок обертається на заданий кут і весь процес сканування повторюється, поки виріб не буде відскановано з усіх сторін. Для огляду бокових частин зразку, його необхідно перевстановити у затискачі вертикально, після чого система продовжить сканування поверхонь виробу, які до цього були невидимими. Результати контролю якості, зокрема зображення, фактичні розміри виробу, перелік знайдених дефектів, їх розташування та опис, виводяться на екран та автоматичну заносяться у маршрутну карту. Таким чином, застосування системи дозволяє мінімізувати участь людини у процесі контролю якості, забезпечити високу точність та швидкість процесу контролю якості.

Висновки. В рамках дослідження було проаналізовано процес контролю якості дентальних імплантатів, визначено його основні проблеми, запропоновано класифікацію дефектів дентальних імплантатів, визначено статистику їх виникнення під час виробництва та запропоновано спосіб автоматизації процесу

контролю якості з використанням технологій машинного зору для усунення недоліків ручного контролю якості.

Запропонована класифікація дефектів може бути застосована для навчання системи машинного зору на базі штучного інтелекту, а отримана статистика демонструє, що найбільш поширеними є саме візуальні дефекти, наявність яких наразі можливо перевірити лише візуальними методами, підтверджуючи необхідність застосування засобів машинного зору для автоматизації процесу.

Автоматизована система контролю якості продукції дентальної імплантації на основі машинного зору дозволить ефективно розпізнавати дефекти, виконуючи як автоматичне вимірювання розмірів, так і аналіз поверхні виробів на наявність візуальних дефектів. Система відрізняється від існуючих своєю високою точністю та адаптацією до специфіки виробництва дентальних імплантатів. Завдяки застосуванню цифрового мікроскопа у поєднанні з технологіями машинного зору на базі штучного інтелекту, система дозволяє розпізнавати не лише геометричні, але і візуальні дефекти, які наразі можуть бути виявлені лише вручну. Впровадження системи дозволить прискорити процес контролю якості, підвищити його точність, виключити помилки, пов'язані з наявністю людського фактору, забезпечити своєчасне реагування та усунення причин виникнення дефектів, що дозволить значно підвищити ефективність виробництва та якість продукції.

Перелік посилань

1. ABM Technology. (n.d.). *Виробництво*. <https://abmt.com.ua/ua/tehnologichni-proczeni/>.
2. Гончаренко, М., Шемена, Е., & Мотроненко, В. (2022, травень 25–27). Методи виготовлення стоматологічних імплантів. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні технології біомедичної інженерії»* (с. 165–167). Одеса.
3. Аджамський, С. В., Кононенко, Г. А., & Подольський, Р. В. (2021). Застосування SLM-технології для виготовлення дентальних імплантів зі сплаву Ti–6Al–4V. *Автоматичне зварювання*, (11), 21–27.
4. Ningbo Easson Photoelectric Technology Co., Ltd. (n.d.). *EP-1 2515 (reverse) optical projector*. <http://en.easson.net.cn/product/72.html>.
5. Ningbo Easson Photoelectric Technology Co., Ltd. (n.d.). *ATM-3020VT Automatic high-precision two-dimensional image measuring instrument*. <http://en.easson.net.cn/product/24.html>.
6. Квашук, Д. М., Густера, О. М., & Юнашов, І. О. (2020). Ідентифікація хвороб рослин в сільському господарстві з використанням машинного зору. *Інвестиції: практика та досвід*, (4), 60–64. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2020.4.60>.
7. Цвіркун, Л. О., Омельченко, О. В., Цвіркун, С. Л., Шкільна, Ю. С., & Шилін, А. С. (2023). Автоматизоване управління процесом сортування картоплі з використанням системи машинного зору на основі аналізу характеристик механічного руху сировини. *Обладнання та технології харчових виробництв*, 46(1), 53–60.
8. Пуйда, В. Я. (2022). Система технічного зору для досліджень в області дефектоскопії матеріалів та виробів. *Computer Systems and Networks*, 4(1), 122–130.

ABSTRACT

Purpose. The development of an automated quality control system for dental implantation products to eliminate the shortcomings of manual quality control, which include the need for increased personnel, high time consumption, the possibility of errors due to the human factor, and the difficulty of timely defect detection.

The methods. The study was carried out through an analysis of the dental implant manufacturing process, with particular attention to the quality control procedures. The main issues associated with the traditional approach to quality control of dental implants were examined. Statistical data were collected and an analysis of existing product defects was conducted, followed by a proposed classification of these defects. Additionally, the study included a review of existing machine vision solutions that can be applied in the field of defectoscopy.

Findings. The study proposes the use of machine vision technologies for the automated detection of surface defects in dental implants. The suggested solution enables effective identification of defects, including those currently detectable only through visual inspection. The study also identifies the shortcomings of manual quality control, analyzes and proposes a classification of dental implantation product defects, and compiles statistics on their occurrence in the manufacturing process.

The originality. Within the scope of this study, a classification of defects in dental implant products was proposed, which enables the identification of target categories for a machine vision system. Based on statistical analysis, a predominance of visual defects was established, confirming the feasibility of implementing automated quality control using machine vision technologies based on artificial intelligence. Approaches to adapting such technologies to the specifics of dental implant production have been further developed.

Practical implementation. The automated quality control system for dental implants may be implemented in manufacturing to enhance product quality. The introduction of the proposed system will accelerate the quality control process, improve its accuracy, eliminate errors related to the human factor, and ensure timely response and elimination of defect causes.

Keywords: *automation, quality control, machine vision, dental implantation.*