

Топчій Н.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Проведено аналітичний огляд сучасних оптичних систем, визначено їх переваги та недоліки. Запропоновано схеми оптичних систем, які працюють на базі різних методів (відповідно до завдання, яке покладено на оптичний пристрій). Описано схему оптичного пристрою для тривимірного контролю розмірів деталей тінювим методом, методом структурованого світла та телевізійним методом. Підкреслено, що принципи реалізації цих методів засновані на тому, що освітлювач формує випромінювання у сфері вимірювання положення з високим ступенем однорідності, поверхневий дефект розташовується під кутом до торцевої поверхні, у цьому разі відбувається розсіювання світла, що призводить до формування контрастного зображення дефекту. Наголошено, що для обробки інформації використовуються локальні дисперсійні характеристики інтенсивності зображення, алгоритми навчання та логічні правила ухвалення рішень. Наведено схему оптичної системи, яка використовує метод триангуляції. Обґрунтовано ефективність застосування портативного пристрою стандартного виду, який представлено жорстко закріпленою балкою, на краях якої встановлені камери високої роздільної здатності. Зазначено, що підсвічування об'єкта здійснюється за рахунок інфрачервоного випромінювання (для цього встановлений ІК-генератор). Запропоновано оптичну систему, що використовує метод триангуляції для вимірювання геометричних параметрів рухомих об'єктів, технічне рішення завдання контролю засноване на принципі самосканування з використанням набору датчиків вимірювання активного триангуляційного типу, де кожна частина деталі сканується паралельно і незалежно двома (внутрішнім і зовнішнім) вимірювальними датчиками. Розкрито принцип дії оптичної системи, що заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла. Для наведених систем сформовано перелік переваг та недоліків, визначено принципи підвищення швидкодії та ефективності.

Ключові слова: оптична система, вимірювальна техніка, контроль, точність, геометричні розміри, безконтактний метод.

Постановка проблеми. Досягнення високого рівня якості виробництва в сучасній промисловості тісно пов'язане з проблемою застосування засобів вимірювальної техніки певної точності і швидкістю виконання вимірювань та контролю. Нині розроблено та успішно працює низка відомих методів і способів неконтактного (дистанційного) визначення лінійних розмірів і форми поверхні досліджуваних об'єктів, які реалізовані на базі відомих оптичних систем. Сучасні методи визначення орієнтацій поверхні і глибини (форми) за зображенням, як правило, розглядають відображену інтенсивність на непрозорих матеріалах. Крім того, під час виробництва складних деталей є безліч важкодоступних місць, для вимірювання яких доводиться застосовувати велику кількість нестандартних засобів вимірювань, як-от штангенінструмент. Для розширення можливостей і підвищення точності вимірювань необхідно розширювати інформативність оптичних систем, які отримують інформацію про об'єкт за рахунок різних властивостей оптичного

випромінювання, тобто отримати більше інформації про об'єкт, не вдаючись до додаткових засобів, наприклад за рахунок поляризації випромінювання. Вирішення цих проблем вимагає від метрологічної служби підприємства пошуку способів ефективного застосування 3D-вимірювальних оптичних систем для порівняння результатів вимірювань із заданою ідеальною 3D-моделлю еталона.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Генезис наукової думки стосовно оптичних систем припадає на початок ХХ століття. Учені різних наукових течій формували власне бачення структурного складника сучасної оптичної системи.

В.О. Чадюк [1] розглянув фізичні процеси та засоби передавання випромінювання (оптичні лінії зв'язку), перетворення випромінювання (помноження його частоти, фотоприймання), використання випромінювання для запису та оброблення інформації, а також для вимірювання різних величин. Особливу увагу приділено новому напрямку оптоелектроніки – нанофотоніці.

Дзеркальні панкреатичні об'єктиви дослідили І.Г. Чиж та О.В. Шкарбан [2]. Науковці розглянули оптичні системи дзеркальних об'єктивів зі змінною фокусною відстанню. У статті вказані переваги та недоліки систем з одним та декількома рухомими дзеркалами.

І.О. Брагинець, О.Г. Кононенко, Ю.О. Масюренко [3] розкрили питання аналітичного огляду та здійснили вибір оптичних лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів у потужних гідрогенераторах. Авторами проведено аналіз відомих оптичних лазерних систем (далі – ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів із метою їх застосування для визначення повітряних зазорів потужних гідрогенераторів. Установлено фактори, які брались до уваги під час розгляду вказаних ОЛС. Указано на властивості конструкції гідрогенераторів і вимоги до точності та часу однократного вимірювання повітряного зазору. Розглянуто основні методи вимірювання відстані, на яких базуються ОЛС, і визначено переваги та недоліки кожного з них.

Оптико-електронний метод визначення геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій розкрили В. В. Кухарчук та В. Й. Білинський [4]. У статті запропоновано метод контролю геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій і оптико-електронний прилад, який дозволяє вимірювати розміри дефектів досліджуваних об'єктів, зокрема тріщин стін із субпіксельною точністю.

Із зарубіжних праць варто вказати на роботи таких авторів, як Schubnell J., Jung M., Le C.H. [5], C. K. Toh, A. N. Le, and Y. Z. Cho [6], Schork B. [7], Stenberg T, Lindgren E, and Barsoum Z [8], Harati E., Svensson L-E, and Karlsson L. [9], Babicz, S., Stawarz-Graczyk, B., Wierzba, P. [10], Kosarac, A., Sikuljak, L., Salipurevic M., Mladenovic C., Zeljkovic M. [11], Pawlus P., Reizer R., Wiczorowski M. [12] та ін.

Ураховуючи описані наукові напрацювання з теми, питання структурованого аналітичного огляду сучасних оптичних систем залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Мета статті – розглянути дійсні сучасні оптичні системи, що створюють виміряні 3D-моделі і порівнюють їх з еталонами, що дозволить вирішити проблему швидкості і точності вимірювань.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оптична система 3D-вимірювань становить мобільну координатно-вимірювальну машину, яка використовує в основі методи вимірювання.

Однією з найбільш застосовуваних на сучасних промислових підприємствах є автоматична оптична система для безконтактного 3D-контролю всіх геометричних розмірів виробів. Принцип вимірювання пояснюється оптичною схемою, зображеною на рис. 1. Для контролю розмірів деталей використовуються три методи: тіньовий метод вимірювання внутрішнього і зовнішнього діаметрів і співвісності цих діаметрів, метод структурованого світла для вимірювання висоти, площинності і паралельності їх лицьових поверхонь, а також телевізійний метод для виявлення дефектів на лицьових поверхнях.

Тіньовий канал складається зі світлодіода 1, лазерних діодних колімувальних лінз 2, телецентричного об'єктива 3 і приймальної цифрової камери 5. Деталь 6 розміщується на столі 7. Структурований світловий канал включає напівпровідниковий лазер 8, колімувальний об'єктив 9 і дифракційний оптичний елемент 10, утворюючи N світлових смуг. Реєстрація зображення смужок здійснюється камерою 5 через об'єктив 3. Канал передання включає кільцевий освітлювач 11, об'єктив 3 і камеру 5. Таким чином, для всіх геометричних вимірів використовується один і той же блок фотоприймача кільцевого контролю параметрів різними методами, що забезпечує компактність і спрощує конструкцію пристрою.

Принциповою проблемою в контролі тривимірних об'єктів тіньовим методом є облік впливу товщини d цих частин, а також параметрів оптичної системи (кутового розміру джерела й апертурної діафрагми) У цьому разі теорія формування зображення Кірхгофа-Френеля не працює [2].

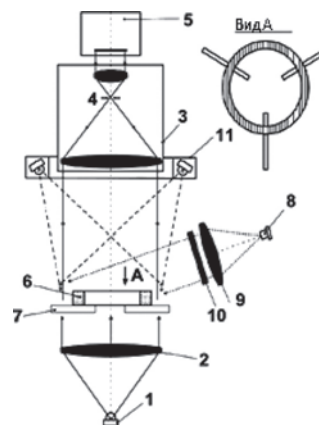


Рис. 1. Схема оптичного пристрою для тривимірного контролю розмірів деталей тіньовим методом, методом структурованого світла та телевізійним методом: 1 – світлодіод, 2 – колімувальна лінза, 3 – телецентричний об'єктив, 4 – апертурна діафрагма, 5 – цифрова камера, 6 – деталь, 7 – стіл, 8 – напівпровідниковий лазер, 9 – колімувальний об'єктив, 10 – дифракційний оптичний елемент, 11 – освітлювач

Виявлення тріщин і дефектів металізації на торцях деяких деталей (як-от кілець) – дуже важлива проблема для замовників. Для цього використовується кільцевий освітлювач на базі 6 світлодіодів (розташований поруч з об’єктивом). Освітлювач формує випромінювання у сфері вимірювання положення з високим ступенем однорідності. Як правило, поверхневий дефект розташовується під кутом до торцевої поверхні. У цьому разі відбувається розсіювання світла, що призводить до формування контрастного зображення дефекту. Для обробки інформації використовуються локальні дисперсійні характеристики інтенсивності зображення, алгоритми навчання та логічні правила ухвалення рішень.

$$I_{\text{пр.рівень}} = I(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_s^2}{\theta_{ap}^2} - \frac{\theta_{ap}}{\sqrt{2}\pi\theta_{cr}} \quad (1)$$

де $I_{\text{пр.рівень}}$ – пороговий рівень;
 $\theta_{cr} = \sqrt{\lambda/d}$ – критичний дифракційний кут, під яким тривимірні ефекти максимальні;
 θ_s – кутовий розмір джерела;
 θ_{ap} – отвір.

Оптична система, яка використовує метод триангуляції, наведена на рис. 2. Портативний пристрій стандартного виду представлено жорстко закріпленою балкою, на краях якої встановлені камери високої роздільної здатності. Підсвічування об’єкта здійснюється за рахунок інфрачервоного випромінювання, адже для цього встановлений ІК-генератор. Така система працює безконтактно. Завдання створення 3D-вимірювальних систем пов’язане зі спробами розробки та використання машинного зору. Можна сказати, що загальний

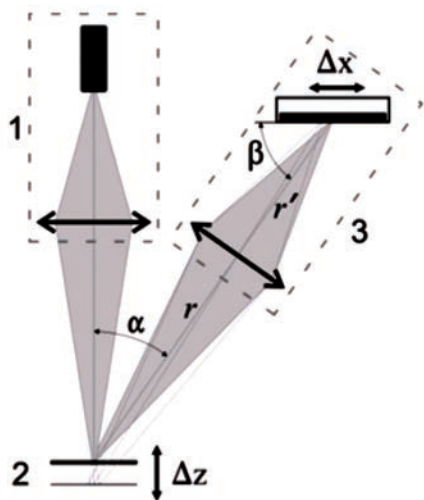


Рис. 2. Оптична система, що використовує метод триангуляції:
 1 – випромінювач, 2 – вимірюваний об’єкт, 3 – приймач

принцип роботи систем машинного зору полягає в тому, що сигнал, отриманий від аналогової відеокамери, перекладається у цифрову форму, яка становить набір пікселів (точок) відповідно до перепадів яскравості, на базі яких комп’ютер обчислює кордон вимірюваного об’єкта на площині. Набагато важче визначати висоту, а також координати перебування кожної точки в тривимірному просторі, що моделюється. Для визначення висоти, а також інших розмірів у більшості оптичних приладів використовується метод оптичної триангуляції. Застосування методу триангуляції дозволяє досягати точності в 0,001 частки вимірюваної відстані [1; 2].

Оптична система, що використовує метод триангуляції, складається з трьох частин: випромінювач 1, вимірюваний об’єкт 2 і приймач 3.

Випромінювач 1 формує зображення світлової плями на вимірюваному об’єкті 2. Потім розсіяний вимірюваним об’єктом світловий промінь потрапляє у фотоприймач 3. Фотоприймач фіксує зображення розсіяного світлового променя. Переміщення вимірюваного об’єкта Δz створює зсув світлового променя у фотоприймачі Δx . Залежність переміщення вимірюваного об’єкта Δz від зсуву світлового променя Δx має такий вигляд:

$$\Delta z = r \cdot \sin\varphi / \sin(\alpha - \varphi), \quad (2)$$

де $\varphi = \arctg(A \cdot \Delta x / (1 + B \cdot \Delta x))$,

$$A = \sin\beta / r',$$

$$B = -\cos\beta / r',$$

r і r' – відстань від вимірюваного об’єкта 2 відповідно до об’єктива фотоприймача 3 і від об’єктива до фотоприймача [3].

Оптична система для вимірювання геометричних параметрів рухомих об’єктів наведена на рис. 3. Технічне рішення завдання контролю засноване на принципі самосканування з використанням набору датчиків вимірювання активного триангуляційного типу, де кожна частина деталі сканується паралельно і незалежно двома (внутрішнім і зовнішнім) вимірювальними датчиками. Подальша комбінована обробка дозволяє визначити профіль поверхні руху і розрахувати необхідні геометричні параметри.

Наведена оптична система вимірює такі параметри рухомих об’єктів:

- ширину (A);
- товщину обода (B);
- товщину фланця (C);
- діаметр поверхні руху (D);
- відстань між внутрішніми гранями (E);

- рівномірну прокатку (F);
- різницю діаметрів у парних об'єктах.

Описана оптична система дозволяє зменшити кількість осей із некоректно реконструйованим профілем в умовах зовнішнього впливу, чим може підвищити достовірність результатів вимірювань. Похибка вимірювання становить близько 0,5 мм.

Вимірювання локального профілю металевої поверхні є актуальним завданням у багатьох галузях промисловості, особливо для профільного контролю 3D-деталей і їх поверхневих дефектів із мікрометровим/нанометровим дозволом. Оптична система нового покоління із застосуванням методу інтерферометрії білого світла наведена на рис. 4.

Принцип вимірювання профілю поверхні об'єкта заснований на явищі інтерференції частково когерентних (в часі) світлових хвиль, випромінюваних поліхроматичним джерелом світла (як-от лампою розжарювання).

Положення і поперечна конфігурація інтерференційної зони на ПЗЗ-матриці визначається перетином еталонної поверхні і поверхні під виміром. Цей перетин визначає ізолінію, яка відповідає заданій глибині на осі Z в напрямку променя світла, що падає на об'єкт. Реєстрація цих ділянок ПЗЗ-камерою дозволяє відновити цю ізолінію. Для отримання тривимірної моделі досліджуваних об'єктів використовується високоточна процедура сканування на глибині Z шляхом зміни умовного положення вимірюваної поверхні і блоку інтерферометра.

Діапазон сканування залежить від довжини когерентності джерела світла і може досягати десятків мікрон.

Використовуючи атомне гладке дзеркало, а також програмно-алгоритмічне забезпечення в опорному плечі інтерферометра, можна досягти підвищення якості вимірювання до 20 пм.

Застосування оптичної системи, заснованої на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла, дуже ефективно для науки, включаючи вивчення наноструктур і наноматеріалів, вимірювання товщини плівки, перевірки поверхні різних полімерів, виявлення мікротріщин і нанометрології.

Генератор лазерного зображення працює в полярних координатах. Принцип

його роботи заснований на формуванні візерунків на поверхневій підкладці з покриттям фоторезистом, сфокусованим лазерним променем у режимі кругового реєстрового сканування (рис. 5).

Основа розміщується на високоточному шпинделі, який обертається мотором і управляється модулем обертання. Лазерний промінь фокусується на підкладку записувальною головкою мікроскопа, а його потужність змінюється оптичним модулятором під керуванням приводу. Переміщення f_i здійснюється високоточною кареткою, на якій розміщені лазерний модулятор і друкарська головка мікроскопа. Зсув f_i вимірюється лазерним інтерферометром. Запис інформації на криволінійній поверхні здійснюється рухомою записувальною головкою мікроскопа (у вертикальному напрямку Z) з використанням модуля автофокусування.

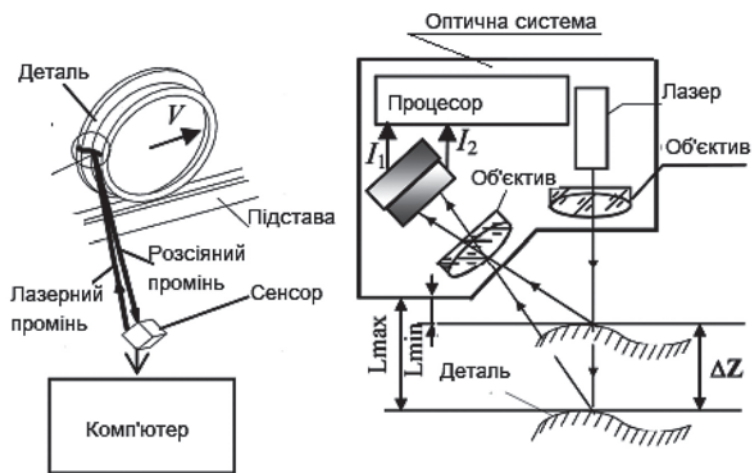


Рис. 3. Оптична система, що використовує метод триангуляції для вимірювання геометричних параметрів рухомих об'єктів

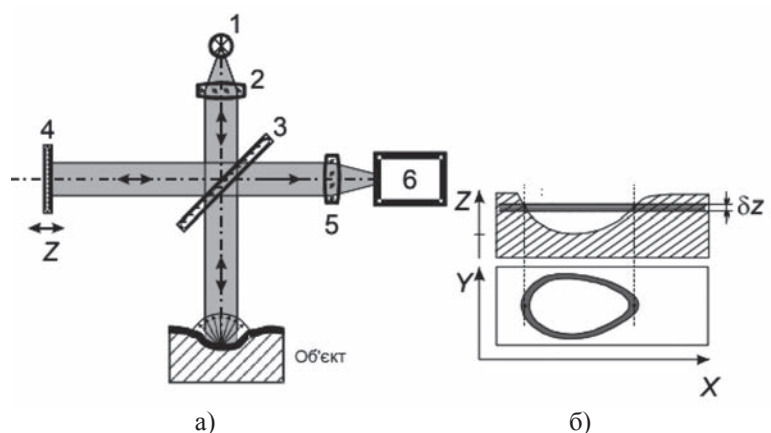


Рис. 4. Оптична система, заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла: інтерферометр Майкельсона (а), формування ізолінії (б): 1 – джерело білого світла, 2 – коліматор, 3 – розділене дзеркало, 4 – опорне дзеркало, 5 – ціль, 6 – ПЗЗ-матриця камери, $I(z)$ – інтенсивність корелограми

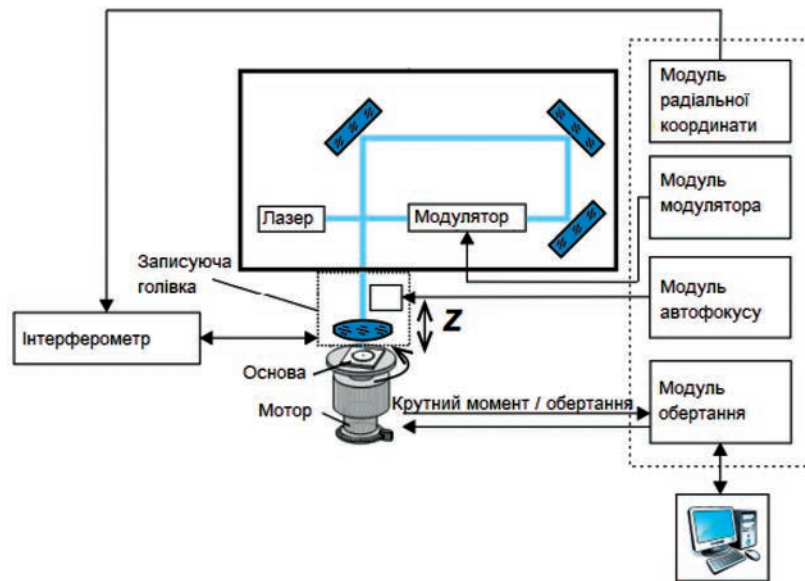


Рис. 5. Оптична система, заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла

Багатоканальна модуляція, що поєднує аналогову і цифрову пряму модуляцію лазерного струму й акустооптичну модуляцію, розширює динамічний діапазон інтенсивності лазерного променя, який потрібен у процесі растрового сканування, враховуючи великий діапазон лінійної швидкості.

Переваги застосування оптичних систем 3D-вимірювань:

Портативність. Загалом, оптичні системи мають компактні розміри і можуть використовуватися в будь-яких стандартних приміщеннях.

Незалежність. Оптичні системи не залежать від освітленості об'єкта, оскільки на їх базі користуються інфрачервоне випромінювання.

Широкі можливості. Дослідження статичного стану, порівняння з САD-моделлю, виявлення браку; виміри об'єкта в динаміці, визначення навантажень та деформаційних змін.

Простота калібрування. Більшу частину налаштувань оптична система виконує автоматично і не збивається з часом.

Компенсація. Виробничі вимірювання завжди пов'язані з роботою у важких умовах (вібрації, сильні шуми, переміщення об'єкта). Автоматизо-

вана оптична система вміє розпізнавати похибки й ефективно компенсувати їх.

Окупність. Ураховуючи високу швидкість роботи, підвищену ефективність та корисність, сучасна оптична система здатна з успіхом замінити будь-які сучасні способи вимірів і швидко окупитися.

До недоліків розглянутих систем належать:

Вартість. Оптичні системи сучасного покоління є дорогими.

Сферична аберация. Виникає через розбіжності фокусів для променів світла, які проходять на різних відстанях від оптичної осі.

Хроматична аберация. Виникає через заломлення світла під час фокусування.

Дисторсія. Виникає під час аберация оптичної системи, коли порушується подібність між об'єктами.

Однак зазначені недоліки можна виправити за рахунок автоматизації оптичних систем та застосування елементів підвищеної якості.

Висновки. У роботі розглянуто дійсні сучасні оптичні системи, що створюють виміряні 3D-моделі і порівнюють їх з еталонами, що дозволило вирішити проблему швидкості і точності вимірювань. Нині є безліч оптичних систем, що дозволяють вирішити значний спектр завдань, пов'язаних із точністю вимірювань. Кожна із них базується на методах вимірювання та на відповідних алгоритмах розпізнавання у 3D-вимірах. Сучасні оптичні системи забезпечують швидкість і зручність за умов масового контролю деталей у промисловому виробництві, що дозволяє вирішити безліч інших завдань на основі вдосконалення засобів і алгоритмів.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні сучасних оптичних систем за рахунок упровадження автоматизованого модуля для мінімізації розглянутих недоліків та підвищення якості вимірів на промисловому підприємстві.

Список літератури:

1. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. Кн. 2. 336 с.
2. Шкарбан О.В., Чиж І.Г. Дзеркальні панкратичні об'єктиви. «Погляд у майбутнє приладобудування»: матеріали XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів (15–16 травня 2018 р., м. Київ, Україна): збірник статей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПФФ. Київ : Центр учбової літератури, 2018. С. 184–186.

3. Брагинець І.О., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О. Аналітичний огляд та вибір оптичних лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів у потужних гідрогенераторах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 49. С. 103–110.
4. Кухарчук В.В., Білінський В.Й. Оптико-електронний метод визначення геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2008. Вип. 4. (51). Ч. 2. С. 125–127.
5. Schubnell J., Jung M., Le C.H. *et al.* Influence of the optical measurement technique and evaluation approach on the determination of local weld geometry parameters for different weld types. *Weld World*. 2020. Vol. 64. P. 301–316.
6. Jonsson B., Samuelsson J., Marquis G.B. Development of weld quality criteria based on fatigue performance. *Weld World*. 2011. Vol. 55(11–12). P. 79–88.
7. The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength / B.Schork, *et al.* *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. Vol. 198. P. 103–122.
8. Stenberg T., Lindgren E., & Barsoum Z. Development of an algorithm for quality inspection of welded structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2012. Vol. 226.6. P. 1033–1041.
9. Harati E., Svensson L. E., & Karlsson L. The measurement of weld toe radius using three non-destructive techniques. In *6th International Swedish Production Symposium 2014*. 2014. P. 1–8.
10. Babicz S., Stawarz-Graczyk B., Wierzba P. Phase object observation system based on diffraction phase microscopy. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. 25(1), 213–221.
11. Košarac, A., Šikuljak, L., Šalipurević, M., Mladenović, C., & Zeljković, M. Prediction of self-excited vibrations occurrence during aluminium alloy AL 7075 milling. In *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) IEEE*. 2019. P. 1–6.
12. Pawlus, P., Reizer, R., & Wiczorowski, M. Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. Vol. 25(3). P. 589–602.

Topchii N.V. ANALYTICAL REVIEW OF MODERN OPTICAL SYSTEMS: ADVANTAGES AND DEFECTS

An analytical review of modern optical systems, identified the advantages and disadvantages of these systems. Schemes of optical systems that work on the basis of different methods in accordance with the task assigned to the optical device are proposed. The scheme of the optical device for three-dimensional control of the sizes of details by a shadow method, a method of structured light and a television method is described. It is emphasized that the principle of implementation of this method is based on the fact that the illuminator generates radiation in the measurement area with a high degree of homogeneity, the surface defect is at an angle to the end surface, in this case light scattering, which leads to a contrasting image of the defect. It is emphasized that local dispersion characteristics of image intensity, learning algorithms and logical decision-making rules are used for information processing. The scheme of the optical system, which uses the method of triangulation, is given. The efficiency of application of a portable device of standard type, which is represented by a rigidly fixed beam, on the edges of which high-resolution cameras are installed, is substantiated. It is noted that the illumination of the object is carried out by infrared radiation – for this purpose an IR generator is installed. An optical system using the triangulation method to measure the geometric parameters of moving objects is proposed, the technical solution of the control problem is based on the principle of self-scanning using a set of sensors of active triangulation type, where each part is scanned in parallel and independently by two (internal and external) measuring sensors. The principle of operation of the optical system based on the principle of measuring the surface profile by the method of white light interferometry is revealed. The list of advantages and disadvantages is formed for the given systems, the principles of increase of speed and efficiency are defined.

Key words: optical system, measuring equipment, control, accuracy, geometric dimensions, non-contact method.