
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.056>
УДК 004.896+621.791.927.5+681.5.015

В.В. Долиненко, канд. техн. наук, **Є.В. Шаповалов**, канд. техн. наук,
В.О. Коляда, канд. техн. наук, **Т.Г. Скуба**
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Україна, 03680, ГСП, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11,
тел. (044) 2004711, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua

Адаптивна робототехнічна система електродугового наплавлення для відновлення деталей складних просторових форм

Запропоновано концепцію створення адаптивної робототехнічної системи відновлення деталей складних просторових форм, яка орієнтована на технологію електродугового наплавлення. Реалізація дугового наплавлення на основі промислових роботів, оснащених засобами адаптації дозволяє суттєво підвищити якість і продуктивність відновлення деталей з одночасним зменшенням витрат енергоресурсів і зварювальних матеріалів. Використано теоретичні методи дослідження — аналіз, ідеалізацію та формалізацію, а також імітаційне моделювання. Розглянуто задачу ідентифікації CAD (Computer-Aided Design) моделі відновлюваної деталі та реалізацію встановлювальної адаптації. Адаптивні можливості робототехнічної системи забезпечено за допомогою безконтактних засобів технічного зору — триангуляційного лазерно-телевізійного сенсора. Отримані результати можуть бути використані при створенні ділянок адаптивного роботизованого відновлення деталей способом електродугового наплавлення на підприємствах машинобудування, залізничної та енергетичної галузей.

К л ю ч о в і с л о в а: відновлення деталей складних просторових форм, електродугове наплавлення, робот-маніпулятор, триангуляційний лазерно-телевізійний сенсор, встановлювальна адаптація, CAD модель деталі.

У більшості випадків зношені деталі машин, що підлягають утилізації, зберігають значну частку початкової вартості. На запасні частини до механізмів і машин в середньому витрачається 40—50 % металу, що йде на виготовлення цих машин. Дослідженнями встановлено [1], що 85 % деталей машин стають непрацездатними при зносі поверхонь не більше 0,2—0,3 мм, а собівартість їх відновлення становить 50—60 % вартості нової деталі. Сучасні технології дозволяють відновити зношені деталі до номінальних параметрів. При цьому у порівнянні з виготовленням нової деталі витрати первинних матеріалів при відновленні знижуються в десятки разів.

© Долиненко В.В., Шаповалов Є.В., Коляда В.О., Скуба Т.Г., 2020

Одним з найпоширеніших способів відновлення металевих деталей відповідального призначення є електродугове наплавлення. Наразі ремонт таких деталей зазвичай здійснюється способом ручного електродугового зварювання або наплавлення, при якому якість і продуктивність процесу відновлення в значній мірі залежать від людського чинника. Автоматизація процесів електродугового наплавлення дозволяє звільнити зварника від безпосереднього виконання найбільш складних, трудомістких і шкідливих для здоров'я операцій, залишивши за ним лише функції загального управління і нагляду за процесом.

Впровадження адаптивних роботизованих систем, призначених для часткової або повної автоматизації процесів відновлення деталей способом електродугового наплавлення, має велику соціальну значимість і є актуальною задачею, вирішення якої може дати значний економічний ефект, оскільки дозволить підвищити одночасно якість і продуктивність наплавлення. Важливим результатом впровадження адаптивних технологій є суттєве зменшення впливу людського чинника, а також економія матеріалів та енергоресурсів.

Як відомо [2], зношення деталей можна поділити на три класи:

- 1) механічне (абразивне, гідророзійне, кавітаційне, утомне і фретингове);
- 2) адгезійне;
- 3) механо-хімічне (окиснювальне і фретинг-корозійне).

Приклади пошкоджень деталей, що піддалися впливу зносу, наведено на рис. 1.

Як відомо, наплавлення — це нанесення шару металу на поверхню деталі за допомогою зварювання плавленням [3]. При напавленні відбувається сплавлення шару покриття з основним металом, що забезпечує їхнє міцне зчеплення. Найменша товщина напавленого металу може бути близько 0,25 мм, найбільша — не обмежена. Серед відомих технологій відновлення деталей напавленням найбільше поширені такі: дугове напавлення в середовищі суміші ($80\%CO_2 + Ar$) та дугове напавлення з використанням самозахисної порошкової проволочки.

У загальному випадку відновлення починається на етапі дефектації, коли фахівець-дефектолог визначає стан деталі і ступінь її пошкодження. З огляду на впровадження роботизованих технологій можна вважати за необхідне використання штрих-коду (бар-коду) (рис. 2), що дозволяє запобігти виникненню помилок ідентифікації деталей при відновленні однотипних деталей. Тобто перед виконанням нарощування зношеної поверхні оператор повинен зчитати штрих-код деталі, який далі використовується для завантаження технологічного файлу даної деталі, де вказано результати її дефектації, а також виконані операції підготовки поверхні до напавлення.

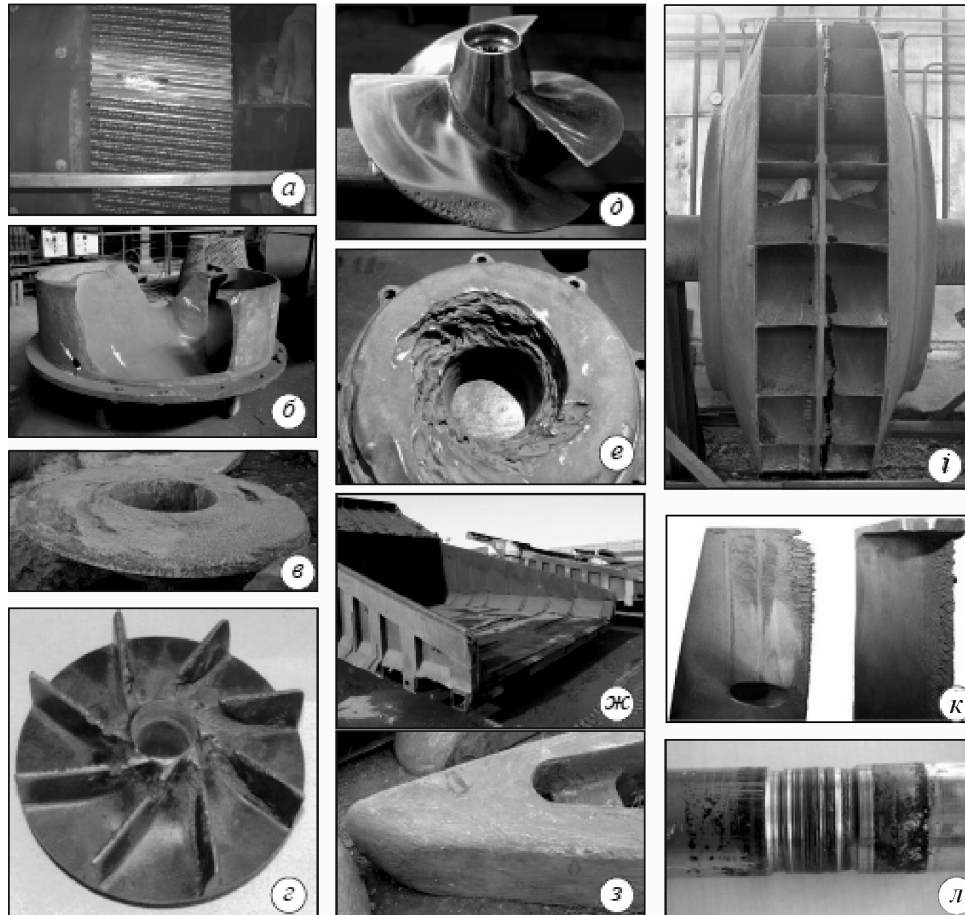
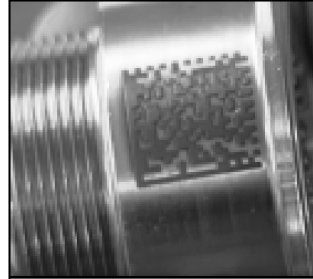


Рис. 1. Види зносу деталей важливого призначення: *a* — механічний знос вінцевої шестерні; *б* — абразивний знос деталей кульових млинів; *в* — знос бронедиска насоса (фірма «Warman»); *г* — знос лопаток насоса; *д* — кавітаційний знос гребного гвинта; *е* — гідроабразивний знос габаритної деталі насоса; *ж* — абразивний знос кузова великовантажних автомобілів; *з* — механічний знос зубів ковша екскаватора; *і* — гідроерозійний знос лопаток ротора вентилятора; *к* — ерозійний знос лопаток гвинта гелікоптера; *л* — абразивний знос вала турбіни.

Структурну схему перспективної автоматичної системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) відновлення деталей можна подати у вигляді дворівневої інформаційно-обчислювальної системи, в якій на верхньому рівні розташовано комп'ютер, що фіксує технологічний шлях деталей і зберігає бази даних (БД) CAD/CAM моделей деталей (рис. 3). Із рис. 3 видно, що рух зношеної деталі по технологічному ланцюгу процесу відновлення починається з нанесення на її очищену поверхню бар-коду. Далі виконується вхідний контроль і дефектація деталі, в

Рис. 2. Ідентифікація металевих деталей з використанням бар-коду (нанесено лазером)



якій бере участь досвідчений спеціаліст-дефектолог. Він формує оцінку пошкодженості поверхні деталі і визначає місця на її поверхні, що потребують відновлення. Для виконання цієї роботи спеціаліст-дефектолог може використовувати спеціальні технічні засоби, а саме контактний механічний сенсор з шарнірним маніпулятором, тому тут можна використовувати додатковий комп'ютер. Після цього деталь надходить до механічної ділянки, де виконується механічна обробка країв і дна пошкодженої ділянки, що забезпечує правильну форму заглиблення у поверхні деталі.

На наступному етапі відновлення виконується нарощування зношеної поверхні деталі з використанням технології роботизованого електродугового наплавлення, однак перед цим за допомогою засобів технічного зору здійснюється автоматична дефектація деталі для визначення точних розмірів і форми вибірки, яку потрібно заповнити металом. Спочатку на руці робота закріплюється лазерно-телевізійний сенсор (ЛТС) і виконується автоматична дефектація деталі. Потім ЛТС замінюється зварювальним пальником і виконується електродугове наплавлення, після чого зношена деталь набуває статусу «ремонтна заготовка» і надходить до ділянки механічної обробки, де знімаються припуски і формуються потрібні розміри деталі. Зрештою деталь повинна пройти перевірку у відділі технічного контролю, після чого вона набуває статусу «відновлена деталь» і готова до відправлення споживачу. Можна зазначити, що на кожному етапі процесу відновлення деталі формується інформація про відпрацювання технологічної операції з прив'язкою до бар-коду конкретної деталі.

Аналізуючи можливий вигляд роботизованої АСУ ТП відновлення деталей, слід звернути увагу на роботизовану ділянку наплавлення внутрішніх отворів у деталях складних форм (фірми POLYSOUDE) з використанням зварювального обладнання фірми FRONIUS (рис. 4).

На основі запропонованої концепції розроблено структурну і функціональну схеми робототехнічної системи відновлення деталей за принципом управління базою даних CAD/CAM-моделей деталей, що відновлюються. На рис. 5 наведено структурну схему робототехнічної системи відновлення деталей. На верхньому рівні структури системи розташовано комп'ютер, який управляє процесом наплавлення і БД CAD/CAM моделей деталей, а на нижньому рівні — підсистема технічного зору ЛТС, джерело живлення дуги, механізм подачі зварювального дроту, ручний

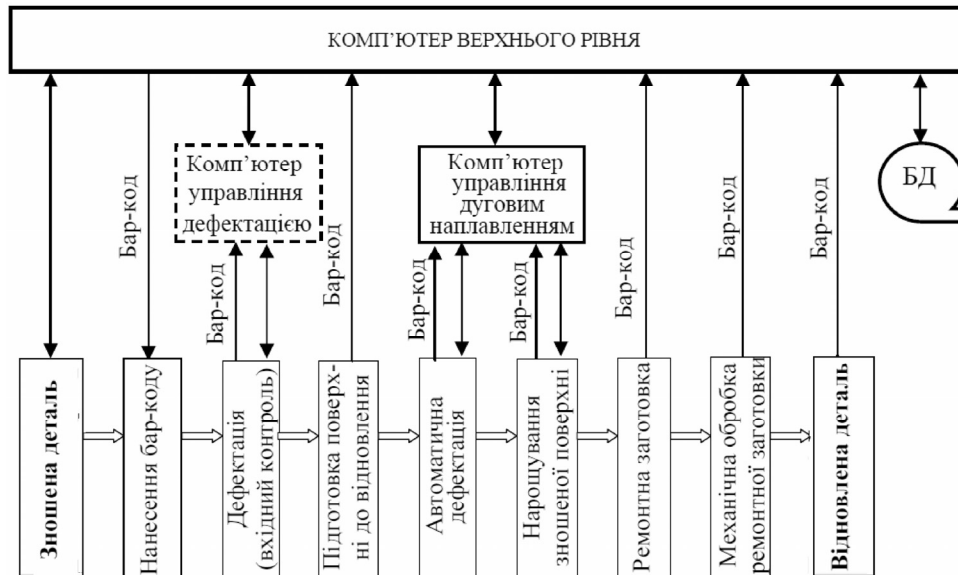


Рис. 3. Структурна схема перспективної АСУ ТП відновлення деталей дуговим наплавленням

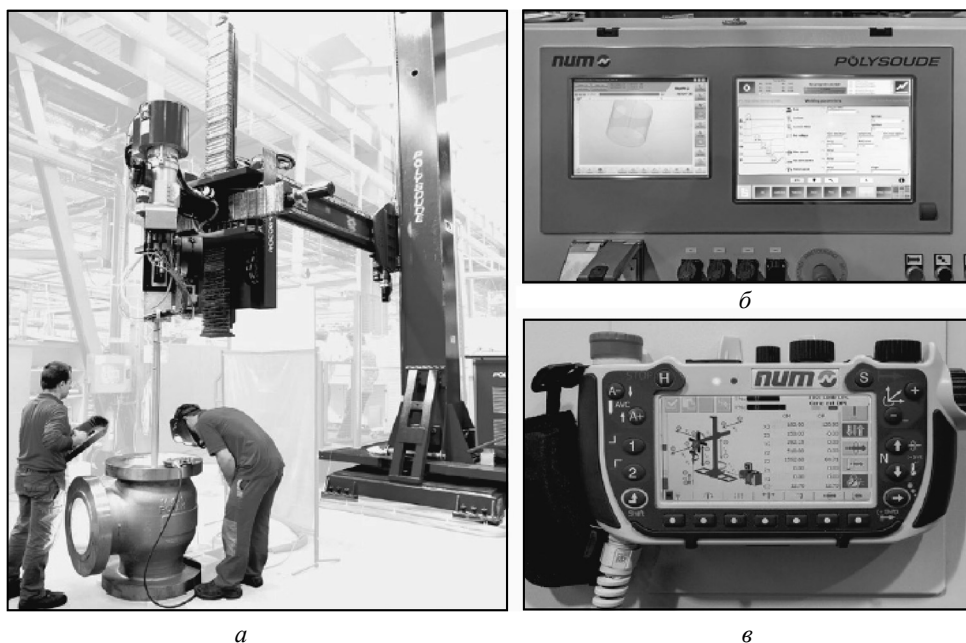


Рис. 4. Роботизована ділянка відновлення деталей дуговим наплавленням: а — маніпулятор пальника з чотирма степенями рухливості (три ступені призматичні і один обертальний); б — пульт для програмування рухів робота; в — монітор з двома екранами для програмування технології наплавлення

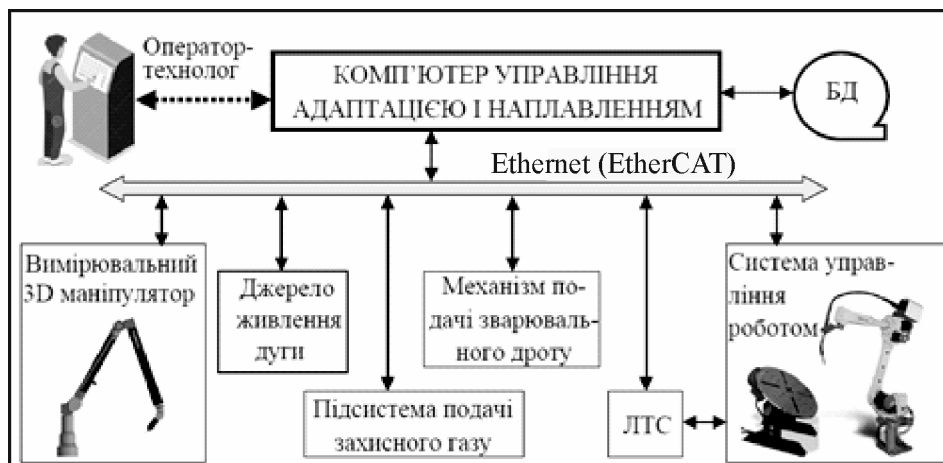


Рис. 5. Інформаційна структурна схема адаптивної робототехнічної системи електродугового наплавлення

3D-маніпулятор з вимірювальним датчиком положення, маніпулятор виробу та система управління шестиланковим шарнірним роботом-маніпулятором з пальником, а також зварювальний поворотний стіл. Інформаційний обмін даними і командами забезпечено інтерфейсом Ethernet (або EtherCAT). Зазначимо, що елемент структури LTC має зв'язки з комп'ютером верхнього рівня і з системою управління роботом. Це забезпечує реалізацію встановлювальної адаптації і автоматичної дефектації, а також технологічної адаптації при виконанні електродугового наплавлення.

Запропонована концепція реалізації адаптивної робототехнічної системи відновлення деталей складних просторових форм базована на широкому використанні математичних моделей, зокрема CAD моделей відновлюваних деталей. Це відрізняє таку робототехнічну систему від існуючих і дає реальну перевагу вже на етапі відпрацювання встановлювальної адаптації, що є першою фазою виконання автоматичної дефектації деталі.

Розглянемо вирішення проблеми встановлювальної адаптації, одним із способів реалізації якої є використання контактних механічних сенсорів FARO Edge ScanArm HD і FARO Quantum ScanArm HD [4]. В них використовується шарнірний маніпулятор із шістьма ступенями рухливості. На рис. 6 показано використання такого механічного сенсора. Послідовність роботи з таким інструментом наступна. Оператор своєю рукою рухає пістолетне руків'я в напрямку поверхні виробу до моменту торкання кінцівкою руків'я (яка має вигляд кульки) поверхні виробу. Після досягнення торкання оператор натискає кнопку на руків'ї і інформація про положення даної точки поверхні виробу заноситься до хмари точок.



Рис. 6. Контроль якості відновлення деталі: *а* — 3D маніпулятор FARO QuantumScanArm з позиціонером виробу; *б* — маніпулятор для контролю геометричних параметрів корпусу двигуна

Точність формування координат точки поверхні виробу, до якої доторкнувся щуп сенсора, може складати ± 35 мкм, що дозволяє не тільки виконувати встановлювальну адаптацію, але і контролювати геометричні параметри ремонтної заготовки на виході технологічного процесу відновлення.

Суттєвим недоліком даного способу встановлювальної адаптації є неможливість позбавитися від суб'єктивного фактору людини-оператора. В залежності від її фізичного і психологічного стану результати такої ідентифікації можуть мати значні похибки. Однак, попри все, використання інструментів FARO Edge ScanArm HD і FARO Quantum ScanArm HD можна рекомендувати для вхідного контролю відновлюваних деталей, коли досвідчений оператор-дефектолог формує карту пошкоджень деталі і оцінює складність виконання процесу її відновлення.

Більш продуктивним способом встановлювальної адаптації є використання зварювального електроду. На рис. 7 показано виконання встановлювальної адаптації для різних видів відновлюваних деталей. Застосування цього способу виключає суб'єктивний фактор. Процес ідентифікації відбувається наступним чином.

Робот-маніпулятор програмно без участі людини-оператора рухається по заданій траєкторії, синтезованої на базі CAD/CAM-моделі відновлюваної деталі. Робот «обережно», на невеликій швидкості, виконує пошукові рухи, що закінчуються контактом електрода з поверхнею відновлюваної деталі. До електроду в цьому режимі роботи замість зварювального джерела живлення підключено джерело слабого струму. Момент контакту фіксується за допомогою датчика електричного струму, що проходить по ланцюжку електрод — відновлювана деталь. Ці точки контакту запам'ятовуються у БД хмари точок і потім в реальному часі з

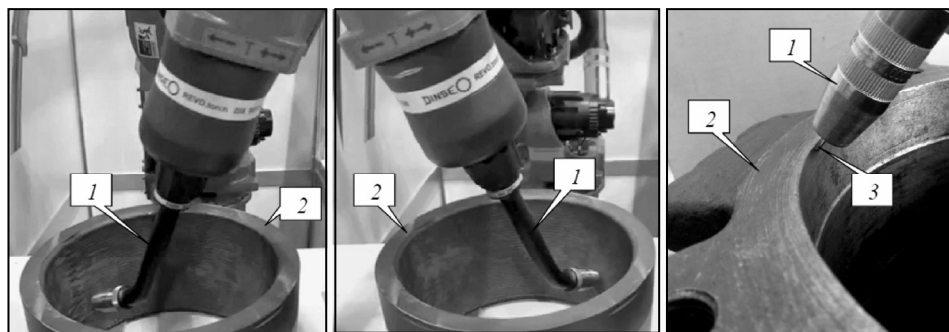


Рис. 7. Встановлювальна адаптація в робототехнічній системі з використанням зварювального електроду: 1 — пальник; 2 — відновлювана деталь; 3 — зварювальний електрод

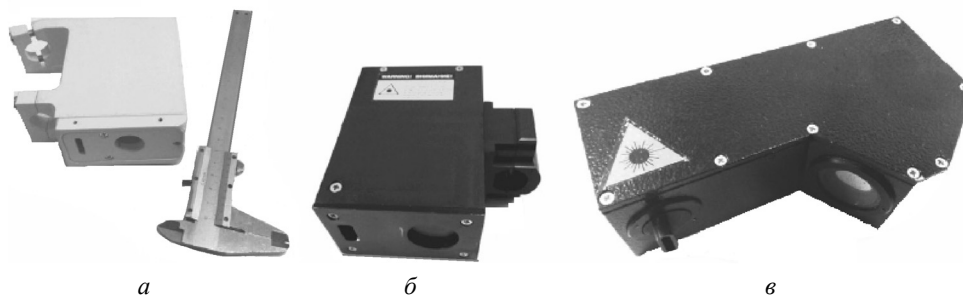


Рис. 8. Лазерно-телевізійні сенсори з різною величиною триангуляційного кута: а — 15° ; б — 20° ; в — 40°

використанням спеціального математичного забезпечення виконується ідентифікація положення відновлюваної деталі на столі позиціонера. Такий метод геометричної адаптації також має ваду, а саме його продуктивність дуже обмежена.

Найбільш перспективними в рамках даного проекту можна вважати способи адаптації з використанням засобів технічного зору. Підготовлено декілька моделей ЛТС, які можна використовувати як для встановлювальної адаптації, так і для автоматичної дефектації [5]. На рис. 8 показано різні за габаритами сенсори, які використовуються в адаптивних робототехнічних системах.

Використання того чи іншого типу ЛТС залежить від вимог необхідної точності отримуваних результатів обмірювання та від геометрії заготовки. У відомих моделях ЛТС для підсвічування рельєфу поверхні виробу використовується прямолінійна лазерна смужка світла. Зображення лазерної смужки, яке несе інформацію про профіль поверхні деталі, надходить до ЛТС під деяким триангуляційним кутом і проектується на світлочутливу CCD-матрицю ЛТС.

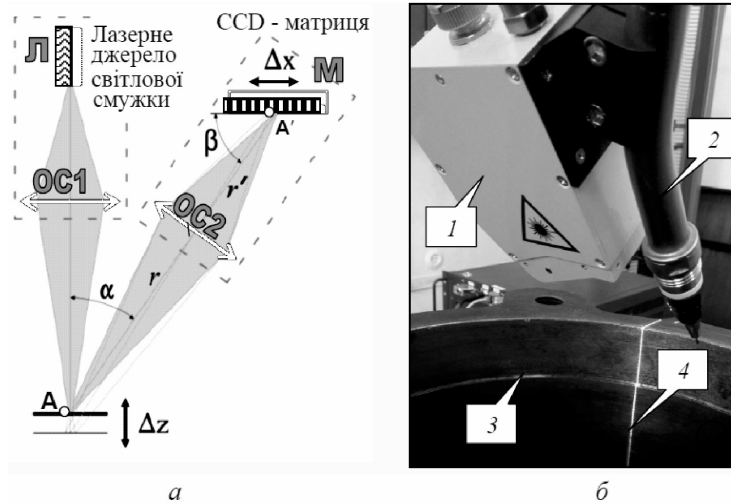


Рис. 9. Оптична схема триангуляції (а) і встановлювальна адаптація з використанням ЛТС (б): α — триангуляційний кут; β — кут орієнтації CCD-матриці відносно оптичної осі OC2; r — відстань від оптичної системи OC2 до поверхні деталі; r' — відстань від поверхні CCD-матриці до оптичної системи OC2; 1 — ЛТС; 2 — пальник; 3 — відновлювана деталь; 4 — смужка, що світиться

Для з'ясування переваг ЛТС розглянемо детальніше їх побудову. На рис. 9, а, зображено оптичну схему триангуляції, а на рис. 9, б, показано виконання встановлювальної адаптації при відновленні корпусу букси залізничного вагону за допомогою ЛТС. На рис. 9, а, видно, що лазерне джерело світлової смужки складається із лазера Л і оптичної системи OC1, а вузол приймача — із світлочутливої CCD-матриці М та іншої оптичної системи OC2. Точка А на поверхні деталі проектується на поверхню CCD-матриці точкою А'. Зміщення точки А по вертикалі на величину Δz сприймається як зміщення точки А' на поверхні CCD-матриці на величину Δx . Отже, оптична схема, зображена на рис. 9, а, дозволяє побудувати оптичний інструмент, що вимірює відстань до поверхні деталі.

Роботу триангуляційного вимірювача відстані подамо у наступному вигляді [6]:

$$\Delta z = r \sin \varphi / \sin (\alpha - \varphi), \quad (1)$$

де

$$\varphi = \arctg (B \Delta x / (1 + C \Delta x)), \quad (2)$$

$$B = \sin \beta / r', \quad (3)$$

$$C = -\cos \beta / r'. \quad (4)$$

За допомогою рівнянь (1)—(4) можна знайти відстань Δz . В зварювальних технологіях такої об'єм інформації відносно геометрії поверхні

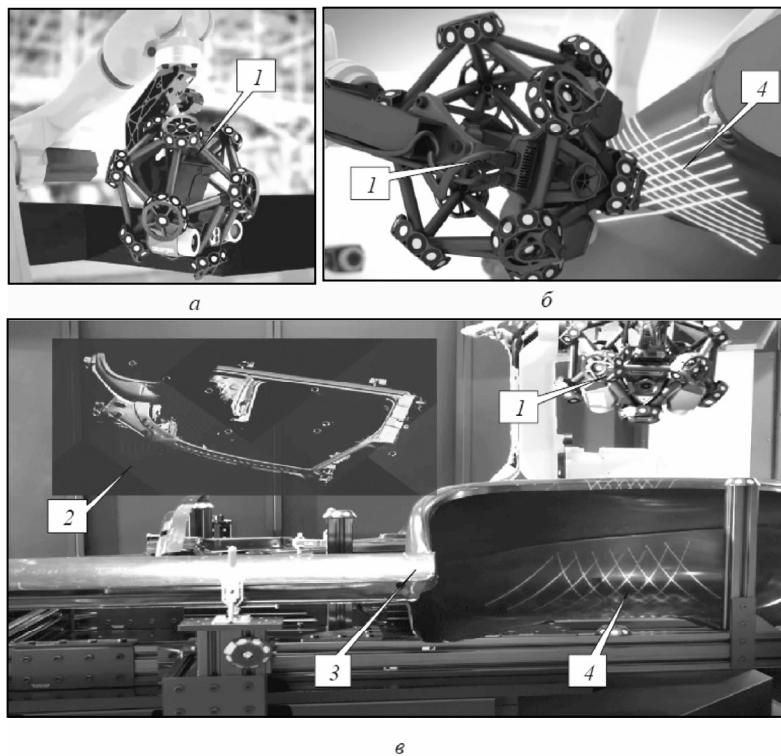


Рис. 10. Використання багатосмужкових ЛПС для ідентифікації геометричних параметрів відновлюваної деталі складної просторової форми: 1 — ЛПС із структурованим підсвічуванням; 2 — графічне зображення CAD/CAM моделі на екрані монітора; 3 — відновлювана деталь; 4 — сітка світлових смужок

зварювального стику здебільшого є достатнім. Але при проведенні автоматичної дефектації відновлюваної деталі складної просторової форми виникає потреба в більш інформативному способі підсвічування поверхні заготовки. Наразі вже відомі системи технічного зору, в яких використовується лазерне структуроване підсвічування, що створює на поверхні деталі візерунок з багатьма смужками, які світяться. ЛПС із структурованим підсвічуванням METRASCAN 3D фірми CREAFORM (Канада) [7] наведено на рис. 10.

На рис. 10, а, подано конструкцію ЛПС із структурованим підсвічуванням, що закріплено на руці робота. Формування сітки світлових смужок на поверхні відновлюваної деталі показано на рис. 10, б, а на рис. 10, в, — вигляд роботизованої ділянки з системою дефектації METRASCAN 3D. Основні технічні характеристики системи MetraSCAN 750-R наступні: максимальна точність — 0,030 мм; 3D роздільна здатність — 0,05 мм; площа сканування — 275×250 мм; нормальна відстань до поверхні — 300 мм;

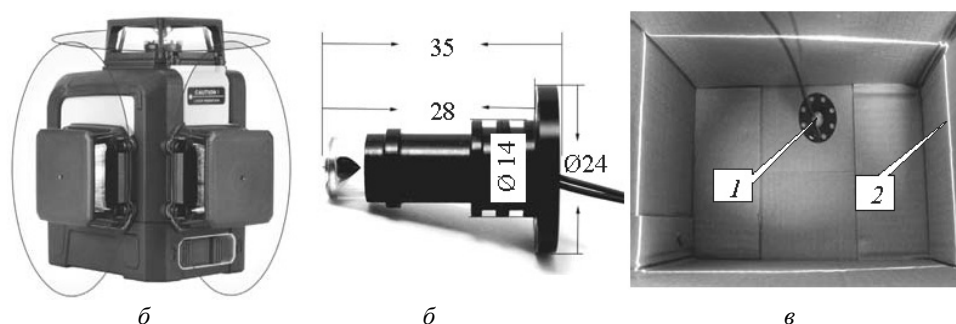


Рис. 11. Використання лазерного джерела світлової смужки: а — лазерний ноніус; б — лазерний модуль з кутом розгортання 360° (розміри дано в мм); в — формування лазерної смужки в замкненому об'ємі об'єкта типу «прямокутна коробка»

глибина сканування — 200 мм. Слід зазначити, що така система дефектації для обробки відеосигналів ЛТС потребує використання самостійного комп'ютера з великою обчислювальною потужністю.

Рациональнішим рішенням відносно обчислювальної потужності комп'ютера, який обробляє відеосигнали ЛТС, є використання структурованого підсвічування з паралельними смужками, що світяться. У [8] наведено приклад технічного рішення структурованого підсвічування в системі технічного зору із паралельними смужками, що світяться, для контролю розмірів залізничних вагонів.

Іншим перспективним рішенням є використання в ЛТС лазерного модуля з кутом розгортання 360° (рис. 11). Наразі такі лазерні модулі використовуються в будівельних пристроях типу «лазерний ноніус» (рис. 11, а, б). На рис 11, в, бачимо високу якість формування лазерного променя: товщина лазерної смужки 2 на внутрішній поверхні замкненого об'єму залишається постійною, хоча відстань від лазерного джерела 1 до поверхні прямокутної форми суттєво змінюється. В даному проекті запропоновано використовувати для реалізації встановлювальної адаптації таке джерело підсвічування.

Розглянемо розроблену методику вирішення задачі встановлювальної адаптації з використанням САД моделі. Скористуємось методикою імітаційного моделювання [9], в якій використано зв'язку із двох комп'ютерних програм моделювання: гнучкої і масштабованої платформи для моделювання роботів V-REP (Coppelia Robotics) [10] і математичного пакету MATLAB (MathWorks) [11]. Варто зазначити, що всі об'єкти, створювані в середовищі V-REP, зважаючи на фізичні закони, існують в реальному світі, тобто є гравітація і форма об'єктів, фіксується їх зіткнення. Можна також виконувати захоплення предметів, додавати датчики відстані і відео датчики та інші дії.

На першому етапі створюється модель робота з шістьма ступенями рухомості, що є достатньою умовою виконання довільних переміщень робочого інструменту в необхідну позицію з заданою точністю і орієнтацією (відносно кінематичної структури). Така кінематична структура дозволяє з великою вірогідністю уникати колізій при переміщенні інструмента в робочій зоні робота.

На другому етапі створюється модель робочого інструмента (в даному випадку ЛТС), в якій враховано основні геометричні параметри інструмента, а саме номінальна відстань від сенсора до об'єкта — 800 мм, розміри робочої зони на номінальній відстані — 500×40 мм, ширина світового сліду на номінальній відстані — 1,0 мм, робоча зона в осьовому напрямку — ±1000 мм. Закріплення робочого інструмента виконується на останній ланці маніпулятора.

При створенні САД моделі робочого інструмента забезпечується прив'язка початку системи координат об'єкта до початку глобальної системи координат. Далі створюється САД модель об'єкта відновлення, якою взято деталь «конус», що належить до складу дробарки типу ККД-1500 [12]. Металевий конус дробарки має великі розміри та масу (діаметр основи дорівнює 1,5 м, висота — 1,5 м) і тому зрозуміло, що при позиціонуванні в зоні роботизованого наплавлення його положення у просторі буде мати деяку невизначеність, тобто координати положення можуть суттєво відрізнятись від очікуваних «нульових». Завданням встановлювальної адаптації є зменшення цієї міри невизначеності до рівня 0,002...0,02 м. Тому необхідно уточнювати САД модель об'єкта відновлення кожного разу для забезпечення високої точності відпрацювання траєкторії переміщення зварювального пальника в процесі наплавлення шарів металу на конкретний зразок відновлюваної деталі.

Розроблена імітаційна модель дозволяє відтворити процес сканування поверхні відновлюваної деталі за допомогою ЛТС і отримати відеодані з частотою 30 кадрів/с і роздільною здатністю 1 точка/мм (на відстані до об'єкту 800 мм). Швидкість сканування поверхні конуса задано на рівні 50 мм/с, тому час сканування складає 20 с. На рис. 12 зображено синтезовану імітаційну модель роботизованої системи на основі шестиланкового робота-маніпулятора ABB IRB 1660ID. Як видно на рис. 12, робот закріплено на спеціальній порталній конструкції у стерильному положенні. В процесі сканування рука робота переміщує ЛТС у вертикальному напрямку на відстань 1,0 м. При скануванні внутрішньої поверхні конуса формується світловий слід від лазерного джерела у вигляді кола.

Отже, в процесі сканування буде отримано 600 контурів з точками, що містять 3D координати внутрішньої поверхні конкретного зразка ко-

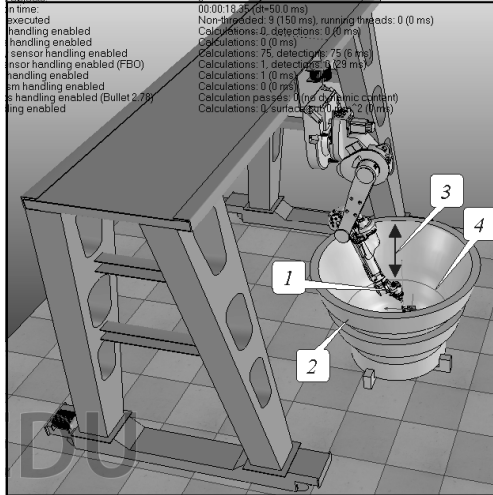


Рис. 12. Імітаційна модель адаптивної роботизованої системи відновлення деталей: 1 — ЛТС; 2 — виріб; 3 — траєкторія переміщення ЛТС; 4 — лазерна смужка

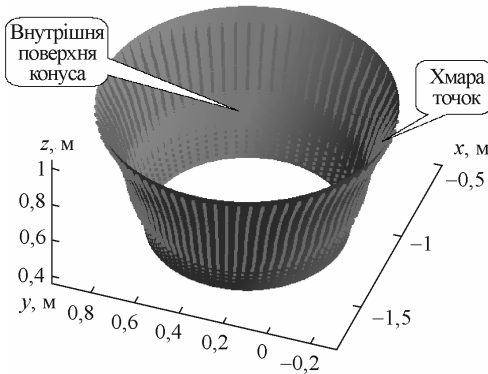


Рис. 13. Ідентифікація внутрішньої поверхні конуса на основі хмари точок

Розраховуються параметри алгебраїчного опису конуса (10 коефіцієнтів квадратичної форми) і параметри геометричного опису конуса (центр, радіуси, головні осі). Результат розрахунку подано у вигляді поверхні конуса на рис. 13, на якому видно, що отримана поверхня конуса достатньо точно проходить через початкові дані хмари точок, а положення і орієнтація осі конуса відповідає геометрії відновлюваної деталі.

Результатом математичних розрахунків є шість параметрів, що ідентифікують вісь конуса, а також десять параметрів $[a_1, \dots, a_{10}]$, які описують конус відповідно до аналітичної моделі:

нуса. Всі отримані дані об'єднуються в один об'єкт під назвою «хмара точок» [13] і передаються в середовище пакета MATLAB з використанням TCP/IP протоколу обміну даними. Слід зазначити, що отримані від ЛТС дані спочатку можуть містити шум і викиди. Тому виконується узгоджена фільтрація хмари точок.

Основною метою встановлювальної адаптації є визначення параметрів лінії, яка проходить через вісь «конуса». В параметричній формі рівняння лінії має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} x &= p_1 t + x_0, \\ y &= p_2 t + y_0, \\ z &= p_3 t + z_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Із системи рівнянь (5) видно, що потрібно визначити шість невідомих: $p_1, p_2, p_3, x_0, y_0, z_0$. Для цього використано процесор математичного пакету MATLAB, що дозволяє в реальному часі виконати апроксимацію хмари точок кінечною поверхнею. Спочатку виконується ідентифікація геометричної моделі поверхні конуса.

$$a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 z^2 + 2a_4 xy + 2a_5 xz + 2a_6 yz + \\ + 2a_7 x + 2a_8 y + 2a_9 z + a_{10} = 0.$$

Точність ідентифікації положення геометричної моделі (CAD моделі) відновлюваної деталі у просторі було оцінено за допомогою середньоквадратичної похибки по всім елементам хмари точок, яка в даному випадку (див. рис. 13) склала $\delta = 0,015$ м, що є задовільним результатом. На наступному етапі відновлення деталі буде виконано автоматичну заміну ЛТС таким, що формує прямолінійну лазерну смужку (див. рис. 8) з меншою фокусною відстанню. Це дозволить виконати автоматичну дефектацію деталі, а саме обміряти підготовлену до наплавлення ділянку пошкодженої поверхні з високою точністю і уточнити геометричні параметри її форми.

Висновки

Подана концепція створення адаптивної робототехнічної системи відновлення деталей складних просторових форм, орієнтована на технологію електродугового наплавлення з використанням безконтактних засобів технічного зору, дозволяє виконувати автоматичну встановлювальну адаптацію відновлюваної деталі.

Використання лазерно-триангуляційного відеосенсора з круговим лазерним джерелом січної площини дозволяє ефективно виконувати встановлювальну адаптацію деталі з відновлюваними внутрішніми поверхнями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ельцов В.В.* Восстановление и упрочнение деталей машин / Электрон. учеб. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015, 335 с.
2. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. Введ. 1988-03-31. М.: Изд-во стандартов, 1992, 19 с.
3. ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. Введ. 1985-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1997, 57 с.
4. *FARO SCANARM*. Режим доступу: <https://www.faro.com/russia/products/faro-scanarm> (назва з екрана).
5. *Лобанов Л.М., Шаповалов Е.В., Коляда В.А.* Применение современных информационных технологий для решения задач автоматизации технологических процессов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2014, № 4, с. 52—56.
6. *Гужов В.И.* Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения/ Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015, 82 с.
7. *MetraSCAN 750-R*. Режим доступу: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/cube-r-automated-quality-control>.
8. *Попов С. Б.* Использование структурированной подсветки в системах технического зрения // Компьютерная оптика, 2013, 37, № 2, с. 233—238.

9. Скуба Т.Г., Шаповалов Є.В., Долиненко В.В. Ідентифікація положення у просторі об'єктів із складною геометрією в задачах роботизованого дугового наплавлення і неруйнівного контролю // Електрон. моделювання, 2019, 41, № 1, с. 67—80.
10. Virtual Robot Experimentation Platform: User Manual. Режим доступу: <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles> (назва з екрана).
11. Stormy Attaway “Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. College of Engineering, Boston University, Boston, MA, 2009, 452 p.
12. ГОСТ 6937-91. Дробилки конусные. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991, 13 с.
13. Remondino F. From point cloud to surface: The modeling and visualization problem // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003, Vol. XXXIV-5/W10.

Отримано 22.07.2020

REFERENCES

1. Yeltsov, V.V. (2015), *Vosstanovleniye i uprochneniye detaley mashyn* [Recovering and hardening of machine parts], TGU, Tolyatti, Russia.
2. State standart 27674-88 (1992), “Friction, wear and lubrication. Terms and definitions” from March 31, 1988, Izdatelstvo standartov, Moscow, USSR.
3. State standart 2601-84 (1997), “Welding of metals. Terms and definitions of basic concepts” from July 01, 1985, Izdatelstvo standartov, Moscow, USSR.
4. FARO SCANARM. URL: <https://www.faro.com/russia/products/faro-scanarm>.
5. Lobanov, L.M., Shapovalov, Ye.V. and Kolyada, V.A. (2014), “Application of modern information technologies to solve problems of technological process automation”, *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy control*, Vol. 4, pp. 52-56.
6. Guzhov, V.I. (2015), *Metody izmereniya 3D-profilya ob'yektov. Kontaknyye, triangulyatsionnyye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniya* [Methods for measuring the 3D profile of objects. Contact, triangulation systems and structured lighting methods], NGTU, Novosibirsk, Russia.
7. MetraSCAN 750-R. URL: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/cube-r-automated-quality-control>.
8. Popov, S.B. (2013), “The use of structured lightning in computer vision systems”, *Kompyuternaya optika*, Vol. 37, no. 2, pp. 233-238.
9. Skuba, O.G., Shapovalov, E.V. and Dolinenko, V.V. (2019), “Position identification in space of objects with complex geometry in ARC surfacing and NDT tasks”, *Elektronne modelyuvannya*, Vol. 41, no. 1, pp. 67-80.
10. Virtual Robot Experimentation Platform: User Manual. URL: <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles>.
11. Attaway, S. (2009), *Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving*, College of Engineering, Boston University, Boston, MA.
12. State standart 6937-91 (1991), “Cone crushers. General technical requirements”, Izdatelstvo standartov, Moscow, USSR.
13. Remondino, F. (2003), “From point cloud to surface: The modeling and visualization problem”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W10.

Received 22.07.2020

V.V. Dolinenko, E.V. Shapovalov, V.A. Kolyada, T.G. Skuba

CREATION OF AN ADAPTIVE ROBOTIC ARC SURFACING SYSTEM,
DESIGNED TO RESTORE COMPLEX SPATIAL FORMS METAL PARTS

The adaptive robotic system creation concept of difficult spatial forms metal parts restoration in which technology of an electric arc surfacing is used is offered. Arc surfacing implementation on the basis of industrial robots equipped with means of adaptation can significantly improve the quality and productivity of parts restoration while reducing the cost of energy and welding materials. The paper uses both theoretical research methods — analysis, idealization and formalization, and experimental — simulation. The solution of the repair CAD workpiece model identification problem and the installation adaptation implementation are considered. The robotic system adaptive capabilities are realized with the help of non-contact means of technical vision a triangulation laser-television sensor. The work results can be used in the areas of adaptive robotic restoration creation by electric arc surfacing in the engineering, railway and energy industries.

Key words: metal parts restoration of complex spatial forms, electric arc surfacing, robot manipulator, triangulation laser-television sensor, installation adaptation, CAD workpiece model.

ДОЛИНЕНКО Володимир Володимирович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. В 1979 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — проектування автоматизованих систем управління зварюванням та наплавленням, чисельне моделювання термомеханічної та гідромеханічної задач, автоматичне управління дуговим зварюванням.

ШАПОВАЛОВ Євген Вікторович, канд. техн. Наук, зав. відділу №27 Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. В 1999 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — створення перспективних зразків лазерно-триангуляційних відеосенсорів, робототехнічні системи для дугового зварювання, неруйнівний контроль якості зварювальних швів.

КОЛЯДА Володимир Олександрович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. В 2002 г. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — створення імітаційних моделей відеосенсорів, розробка математичного забезпечення для відеосенсорів, розв'язок прямої та оберненої задач кінематики маніпуляторів.

СКУБА Тарас Григорович, наук. співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. В 2002 г. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — імітаційне моделювання роботизованих комплексів, розробка математичного забезпечення для систем управління роботами, адаптивне управління дуговим зварюванням і наплавленням.