

МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О. В. ПАВЛІЙ¹, О. А. КРЮКОВА²

¹ТОВ «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади»,
вул. Патріотів, 103, Київ, 03061

²Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Мала Шияновська, 2, Київ, 01011

Зроблено огляд методів неруйнівного контролю та практики застосування рентгенівського контролю готових металевих виробів адитивного виробництва. Наведено результати досліджень, виконаних в лабораторії неруйнівного контролю ТОВ «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади». Дослідження проведені методом плівкової радіографії зразків з титану, отриманих за допомогою електронно-променевої технології xBeam 3D Metal Printing. За результатами досліджень зроблено висновки про контролепридатність виробів. Запропоновано шляхи подальшого вдосконалення технології рентгенівського контролю металевих виробів адитивного виробництва.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, неруйнівний контроль, радіографія, дефектоскопія.

Неруйнівні методи контролю (НК) та діагностики займають одне з важливих галузей знань в сучасних технічних науках. Ці методи використовуються при виробництві та експлуатації життєвоважливих виробів, компонентів і конструкцій (будинків, залізничних рельсів, літаків, морських суден, нафто та газопроводів та іншого обладнання). Сучасна наука налічує більше десяти методів неруйнівних досліджень, що знайшли своє використання в промисловості, в енергетиці, на виробництві, транспорті, тощо. Розглянемо методи, що мають наймасовіше застосування, які можуть знайти своє використання при виробництві виробів адитивних технологій.

Всі методи засновані на взаємодії фізичного поля з об'єктом дослідження. Це можуть бути електромагнітні поля, акустичні коливання, жорстке гамма- або рентгенівське випромінювання (що по суті теж є електромагнітним полем).

По способу застосування методи поділяються на групи по глибині виявлення дефектів. Для виявлення поверхневих дефектів використовують найчастіше:

- візуальний (або візуально-оптичний метод) VT;
- метод проникних речовин RT;
- магнітопорошковий метод MT;
- вихрострумний (електромагнітний) метод ET.

Для виявлення дефектів, що не виходять на поверхню, як правило, використовують акустичний UT або радіографічний RT методи.

Нижче описані ключові фізичні принципи кожного з вказаних методів. Візуальний контроль VT проводиться як огляд виробу, що контролюється неозброєним оком або з застосуванням оптичних приладів - луп, дзеркал. Лупи застосовуються для збільшення роздільної здатності ока, тобто дозволяють розглянути більш дрібні деталі об'єкта контролю. На даний момент для огляду важкодоступних місць, застосовуються відеоендоскопи, що дозволяють оглянути внутрішні поверхні об'єктів, що підлягають огляду. Під час візуального контролю оператор повинен виявити неозброєним оком дефект типу тріщини або точки корозії розміром від 0,1 мм і більше.

Методи проникних речовин RT засновані на капілярному проникненні індикаторних рідин у порожнини поверхневих і наскрізних несучильностей матеріалу об'єкта контролю та реєстрації індикаторних слідів, що утворюються, візуально або за допомогою перетворювача. Методи дозволяють виявляти поверхневі (виходять поверхню) і наскрізні (з'єднуючі протилежні поверхні стінки об'єкта контролю (ОК)) дефекти. За продуктивністю RT значно перевершують методи VT. Проте протиставляти ці методи некоректно. Області застосування VT та RT практично не перетинаються. Розмір мінімального дефекту для VT, що виявляється, відповідає розміру максимального дефекту, що виявляється RT. Тобто, ці методи взаємно доповнюють одне одного. Методи проникних речовин застосовують також для об'єктів, для яких застосування магнітопорошкового контролю неможливе або недоцільне.

Магнітна дефектоскопія МТ – це окремий випадок магнітного неруйнівного контролю, який передбачає спосіб виявлення дефектів у вигляді порушення цілісності в об'єктах з феромагнітних матеріалів.

Суть методу – реєстрація магнітних полів розсіювання поблизу цих дефектів. При розміщенні в однорідне магнітне поле об'єкта контролю, що не має дефектів і різкої зміни форми, магнітний потік Φ_m буде проходити по шляху найменшого опору через матеріал, практично не виходячи за межі об'єкта (рис. 1а). Деяка незначна частина магнітного потоку Φ_0 може проходити по повітрю. Це пов'язано з тим, що магнітний опір матеріалу (металу) набагато менше опору повітря, оскільки цей опір обернено пропорційний магнітній проникності. При наявності тріщини, перпендикулярних напрямку магнітного потоку, виникає перешкода у вигляді повітряного проміжку, що різко збільшує магнітний опір на цій ділянці. Тому потік Φ_m буде в основному огинати тріщину знизу. Разом з тим, частина потоку буде замикатися в повітря над тріщиною, тобто виникає потік розсіювання над дефектом $\Delta\Phi_d$ (рис. 1б).

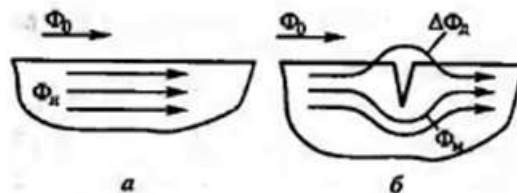


Рисунок 1 – Схема проходження магнітного потоку через матеріал.

При використанні методу магнітопорошкової дефектоскопії (МПД) на намагнічену деталь наноситься магнітний порошок або магнітна суспензія, що представляє собою дрібнодисперсну суспензію магнітних частинок в рідині. Частинки феромагнітного порошку, що потрапили в зону дії магнітного поля розсіювання, притягуються і осідають на поверхні поблизу місць розташування несутцільностей. Ширина смуги, по якій відбувається осідання магнітного порошку, може значно перевищувати реальну ширину дефекту. Внаслідок цього навіть дуже вузькі тріщини можуть фіксуватися за осілим частинкам порошку неозброєним оком.

Реєстрація отриманих індикаторних малюнків проводиться візуально або за допомогою пристроїв обробки зображення.

Вихрострумний неруйнівний контроль (ЕТ) ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться котушкою збудження в електропровідному ОК. Щільність вихрових струмів в ОК залежить від його геометричних і електромагнітних параметрів, стану поверхні, наявності дефектів та взаємного розташування вихрострумного перетворювача (ВСП) і ОК. В якості перетворювача зазвичай використовують індуктивні котушки (одну або декілька).

Синусоподібний або імпульсний струм, що діє в котушці збудження ВСП, створює електромагнітне поле, яке в електропровідному ОК породжує вихрові струми. Електромагнітне поле цих струмів діє на котушки ВСП, наводячи в них електрорушійну силу (е.р.с.) або змінюючи їх комплексний електричний опір. Щільність вихрових струмів зменшується із заглибленням в матеріал ОК, тому ЕТ ефективний тільки для контролю поверхневих і підповерхневих шарів ОК.

Також існують інші методи неруйнівного контролю, що мають специфічне використання — електричний, радіохвильовий, тепловий.

В даній статті проводиться оцінка можливостей використання методів для контролю якості продукції адитивного виробництва.

Як відомо, адитивне виробництво - це метод побудови будь-яких предметів за їхньою 3D-моделлю. Процес ще називають «вирощуванням», тому що виріб виготовляється поступово, шар за шаром. Залежно від типу технології, створення предмета може відбуватися знизу вгору або зверху вниз. Наразі адитивне виробництво більше відоме під назвою «3D-друк». Також до продуктів адитивного виробництва відносять вироби, що отримують за допомогою технологій плазмово-індукційного вирощування або електронно-променевої технології. Особливості цього виду виробництва в змінній структурі готового виробу, якщо порівнювати з

традиційною технологією лиття або ковки, чи механічною обробкою заготовок.

В зв'язку з цим традиційний підхід до контролю якості може бути не в повній мірі застосовано до продукції 3D-друку. Однак, при відповідній підготовці поверхні виробу та адаптації технології контролю можна отримати цілком прийнятні результати.

Для виявлення поверхневих невідповідностей перш за все використовують візуальну оцінку. Якщо візуально виріб відповідає вимогам замовника — далі в залежності від виробу та вимог можуть бути застосовані інші фізичні методи досліджень.

Наукові установи в світі досліджують можливості використання неруйнівних методів для виявлення різних типів невідповідностей і в процесі розвитку технологій оцінки суттєво змінюються.

Було проведено низку досліджень за допомогою класичної радіографії зразків виробів з титану отриманих за допомогою електронно-променевої технології xBeam 3D Metal Printing люб'язно наданих колегами з ІЕЗ ім. Патона [2].



Рисунок 2 – Зразок №1 — Матеріал титан товщина 10 мм розмір 100x100x30 мм, поверхня після 3D друку частково шліфувана

Також було проведена оцінка контролепридатності виробів отриманих за допомогою технології плазмово-індукційного вирощування надвеликих тугоплавких монокристалів вольфраму у формі тіл

обертання [3]. Об'єктом дослідження були зразки з титану вироблені по технології xBeam 3D Metal Printing.



Рисунок 3 – Зразок №2 — Матеріал титан товщина 10 мм розмір 100x100x30 мм, поверхня після 3D друку

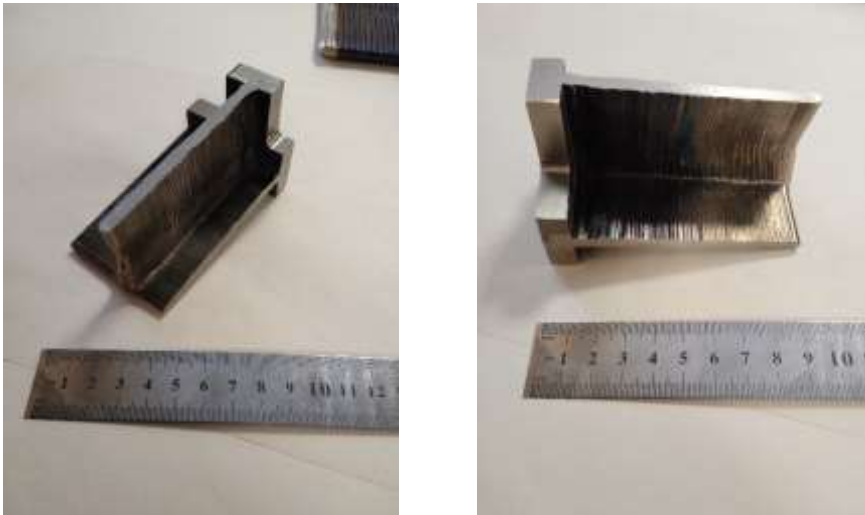


Рисунок 4 – Зразок №3 — Матеріал титан товщина 5 мм розмір 90x50x50 мм, поверхня після 3D друку T-подібна форма

Результати рентгенівських досліджень металевих виробів виконані в лабораторії неруйнівного контролю ТОВ «Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади». Джерело випромінювання: генератор рентгенівського випромінювання Baltospot GFD165 (максимальна прискорююча напруга на рентгенівській трубці 160 кВ, струм 5 мА).

Фокусна відстань 600 мм, напруга — 100 кВ, струм 5 мА. Рентгенівська плівка Fujifilm IX 80 (С4 згідно ISO 11699-1), час експозиції для виробів товщиною 10 мм — 1 хвилина 30 секунд, для виробів з

товщиною 5 мм — 25 секунд. Час експозиції залежить від номограм експозиції для кожного типу плівки, а також від особливостей генератора рентгенівського випромінювання.

Також використовувались індикатори якості зображень (ІЯЗ) відповідно до ДСТУ ISO 19232-1, відповідного матеріалу (титан).



Рисунок 5 – Генератор рентгенівського випромінювання Baltospot GFD165

Отримані рентгенівські знімки (рис. 6, 7, 8) демонструють, що виробу можна роздивитись та провести оцінку відповідно до нормативних документів. Індикатори якості зображення фіксуються, та по номеру еталонного дроту або канавки можна оцінити наявність недопустимих дефектів об'ємного типу.



Рисунок 6 – Рентгенівський знімок зразка № 1 (поверхня зразка після 3D друку)

Поверхня зразка частково шліфрована (нижня частина знімка) номер дроту на ІКІ W11 – D 0,32 мм. Чітко видно неоднорідність густини. Отриманий результат демонструє, що чутливість цього методу відповідає 3%, що є прийнятним згідно ДСТУ EN ISO 19232-1:2016.



Рисунок 7 – Рентгенівський знімок зразка № 2 (поверхня зразка після 3D друку)

Видно, як і в першому зразку неоднорідність густини, що відповідає кроку проходу електронного променя. На ІЯЗ №32 чітко видно всі канавки, а на ІЯЗ №31 канавка №4 — D-0,1мм. Відповідно до ГОСТ 7512 чутливість методу складає 1%.



Рисунок 8 – Рентгенівський знімок зразка № 3

Для зразка Т-подібної форми кут опромінення складає приблизно 60° , що призводить до зміни радіаційної товщини на різних ділянках

зразка. На знімку видно неоднорідність оптичної густини. Для достовірного контролю виробів складної форми слід робити декілька експозицій з різним часом (оптимально розрахувати під кожну радіаційну товщину). Отриманий результат демонструє, що чутливість цього методу відповідає 4% відповідно до ДСТУ EN ISO 19232-1:2016.

Висновки

Серед методів НК рентгенівський контроль має великий потенціал для контролю виробів адитивного виробництва. Титанові зразки адитивного виробництва, досліджені в лабораторії ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади» є контролепридатними для рентгенівського методу контролю. Результати досліджень показали, що якість рентгенівських зображень може бути цілком прийнятною для дослідження виробів 3D-технологій. За результатами проведених досліджень рекомендовано на етапі розробки конструкторської документації на вироби та технологію ввести коректні критерії прийомки у відповідності до міцнісних характеристик адитивних матеріалів.

Література

1. *M.J. Quintana, Y. Ji, P.C. Collins: A perspective of the needs and opportunities for coupling materials science and nondestructive evaluation for metals-based additive manufacturing. Журнал “Технічна діагностика та неруйнівний контроль”- №3, 2023.*
2. *Д.В. Ковальчук, В.Г. Мельник, І.В. Мельник, Б.А. Тугай. Технологія xBeam 3D Metal Printing на шляху до промислового виробництва. Сучасна електрометалургія, 2020, №3, с.30-34.*
3. *В.О. Шаповалов, Ю.О. Никитенко, О.М. Гніздило, В.Р. Бурнашев, О.В. Карускевич, Т.І. Дубова, В.В. Якуша. Дослідження енергетичного балансу в системі кристал–високочастотний нагрівальний модуль при плазмово-індукційному вирощуванні монокристалів тугоплавких металів. Сучасна електрометалургія, 2022, №4, с.27-33.*
4. ДСТУ EN ISO 19232-1:2016 (EN ISO 19232-1:2013, IDT; ISO 19232-1:2013, IDT) Неруйнівний контроль. Якість зображення радіографічних знімків. Частина 1. Визначення показника якості зображення за допомогою індикатора якості зображення дротового типу.