

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г.В. КАРПЕНКА  
НАН УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГРАБОВСЬКА НАТАЛІЯ РОМАНІВНА**

УДК 621.396.96:621.396.6

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТРИВИМІРНОЇ  
РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФКТІВ ДЛЯ  
ЛАМБЕРТІВСЬКОЇ МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ СВІТЛА**

05.13.06 – Інформаційні технології

05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело




Грабовська Н.Р.



Науковий керівник: **Русин Богдан Павлович**,  
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації  
ЗАСВІДЧУЮ:

вчений секретар спеціалізованої вченої ради К 58.082.02  
Яцків В.В. 

Тернопіль – 2019

## АНОТАЦІЯ

Грабовська Н.Р. Інформаційні технології тривимірної реконструкції зображень поверхневих дефектів для ламбертівської моделі відбиття світла. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена розробці та удосконаленню методів, алгоритмів і інформаційних технологій тривимірної реконструкції зображень з дефектами поверхні, яка базована на оптиці ламбертівської моделі відбиття світла.

У роботі розв’язано актуальну науково-технічну задачу, пов’язану з розробленням методів, алгоритмів та створення на їх основі інформаційних технологій для зменшення впливу похибок та артефактів на реконструкцію форми і визначення глибини дефектів при її використанні для моніторингу технічного стану металевих конструкцій. Зокрема, отримано такі результати:

Запропоновано нову інформаційну технологію 3D реконструкції поверхні на основі інформації про тріаду зображень, отриманих за різних напрямків освітлення поверхні, з затіненим зображенням поверхні. На основі цієї інформації в процедурі 3D реконструкції, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла, поверхню матеріалу описано у вигляді системи рівнянь реконструкції. Для реалізації реконструкції запропоновано два варіанти.

У першому варіанті для розв’язку системи рівнянь реконструкції застосовано діагональну матрицю, яка для реалізації вимагає спеціалізовану техніку відеозйомки: базове зображення отримують з вертикальним розташуванням джерела світла, а інші два додаткові зображення визначають з напрямками (кутами) освітлення, які локалізовані в одній з двох вертикальних ортогональних площин тривимірного простору. На основі цієї інформації оцінено похідні векторів нормалі. Оцінка глибини дефекта знаходиться інтегральним накопиченням похідних векторів нормалі дефекту, починаючи від однієї з точок поверхні, яку приймають за опорну. Наведено приклад практичного застосування

розробленого алгоритму тривимірної реконструкції поверхні реального пітинга трубопроводу. Оцінено точність реконструкції. Розраховані похибки визначення похідних досліджуваної поверхні, обумовлені неконтрольованим відхиленням кожного з тріади напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. На їх основі розраховані діапазони безвартної 3D реконструкції значень горизонтальної та вертикальної похідних.

Щоб автоматизувати процес відтворення дефекту в другому варіанті реконструкції за тріадою зображень для розв'язку системи рівнянь реконструкції застосовано матрицю яка для реалізації вимагає застосування техніки відеозйомки з довільно заданими напрямками освітлення поверхні. Для реалізації такої техніки відеозйомки у складі методу тривимірної реконструкції запропоновано застосовувати новий метод оптичного моніторингу напрямку освітлення з інформації зображення тестового зразка. На основі інформації про зображення поверхні тріади площин з відомими векторами нормалі та затіненим зображенням поверхні в процедурі 3D реконструкції, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла, кутові параметри напрямку світла (похідні вектору нормалі сфери) описано у вигляді системи рівнянь реконструкції, що має програмний розв'язок. При перевірці працездатності і точності запропонованого методу встановлено, що абсолютна похибка оцінки похідних вектору нормалі сфери становить  $[-0,025, 0,028]$ , коли похідні належать діапазону  $[-1,225; 1,25]$ .

Запропоновано новий метод тривимірної реконструкції поверхні, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла, де використовується інформація двох зображень. Ця інформація спільно з затіненим зображенням дозволяє описати тривимірну поверхню матеріалу у вигляді системи двох рівнянь, що дозволяють реконструювати похідні векторів нормалі. Для підвищення точності реконструкції похідні векторів нормалі коректуються систематичними похибками, які визначаються на площині поверхні досліджуваного об'єкта. Оцінка глибини поверхні знаходиться інтегральним накопиченням скоректованих похідних векторів нормалі починаючи від одної з точок поверхні, яку приймають за опорну. За таким підходом, коли алгоритм тривимірної реконструкції поверхні

реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, придатної для штучного генерування зображень стереопари використовуючи пластину з тріщиною, оцінено її похибки реконструкції. Встановлено, що відносна похибка розрахункової частини алгоритму реконструкції становить  $\pm 0,5\%$ . Розраховані похибки реконструкції, а також діапазони безвтратної реконструкції похідних векторів нормалі і глибини дефекту.

Запропоновано нову двоетапну інформаційну технологію тривимірної реконструкції поверхневих дефектів, таких, як тріщини та пітинги, за одним зображенням. Ефективність та працездатність цієї технології розглянута на прикладі пітинга. На першому етапі, щоб створити умови реконструкції за інформацією відбиття на платформі ламбертівської моделі відбиття світла, з зображення пітинга фільтрацією по горизонтальному напрямку усувається інформація горизонтальної похідної поверхні пітинга, що дає змогу реконструювати вертикальну похідну вертикального перерізу пітинга та з цієї інформації інтегрально знайти профіль пітинга  $z$ . На другому етапі, базуючись на отриманій оцінці перерізу  $z$ , визначимо повномасштабну оцінку 3D поверхні пітинга шляхом апроксимації поверхні сфероподібними сегментами. Для підвищення точності реконструкції створена модель пітинга отримує параметричну корекцію в горизонтальному напрямку за такими параметрами, як зсув моделі і косий стиск спочатку лівої, а потім правої частини моделі. Для оцінки якості корекції моделі пітинга по окремому параметру штучно генерується зображення моделі пітинга за застосованою моделлю відбиття точками 3D моделі пітинга, а потім розраховується квадратична форма, яка є інтегральним накопиченням квадрата абсолютної похибки реального зображення пітинга та штучно створеного зображення моделі пітинга. В системі обробки для уточнення моделі пітинга визначено мінімум квадратичної форми по кожному параметру моделі. Оцінені похибки визначення глибини пітинга, індуковані відхиленням параметрів застосованої моделі відбиття від прогнозованих значень, що дало змогу розрахувати відповідні діапазони безвтратної тривимірної реконструкції значень вертикальної похідної.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла нових методів і інформаційних технологій тривимірної реконструкції, які зменшують вплив артефактів на відтворення форми дефектів та підвищують швидкість і точність їх реконструкції.

1. Вперше розроблено математичну модель, яка усуває з процесу відтворення форми дефекту вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла, що дозволяє розробити інформаційну технологію тривимірної реконструкції поверхневих дефектів за тріадою зображень, яка на відміну від існуючих зменшує похибку визначення форми та глибини дефектів.

2. Запропоновано метод автоматизованого дистанційного контролю напрямку освітлення поверхні об'єкту, який дозволяє здійснити такий контроль на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла за трьома векторами нормалі до тестової поверхні, що має тріаду площин. Метод об'єднаний у технологічний ланцюжок з методами ІТ тривимірної реконструкції за тріадою зображень, що збільшує швидкість і точність відтворення форми поверхневих тріщин та пітингів.

3. Удосконалено ІТ тривимірної реконструкції за стереозображенням, в якій застосовуються два напрямки освітлення поверхні об'єкту та зменшено до мінімуму вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла в процесі відтворення форми дефекту.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному.

Запропонована ІТ тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень, де напрямки освітлення визначаються методом дистанційного оптичного моніторингу напрямку освітлення (абсолютна похибка розрахункової частини алгоритму реконструкції котангенсів кутів освітлення становить  $\pm 0,028$ ), дає змогу застосовувати таку реконструкцію для автоматизованого неруйнівного контролю дефектостійкості поверхні елементів конструкції.

Запропонований метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень з контролем напрямків освітлення, шляхом порівняння з технологічно заданим вектором (гарантована абсолютна похибка встановлення котангенсів кутів освітлення  $\pm 0,01$ ), дозволяє застосовувати таку реконструкцію для моніторингу технічного стану об'єктів з відносною похибкою реконструкції  $\pm 0,1$ . Для підвищення точності реконструкції розроблено двокроковий алгоритм встановлення оптимального бокового кута освітлення для формування зображень. Ефективність практичного застосування 3D реконструкції перевірена для поверхневих пітингів, що виникають на поверхні на сталі 17ГС.

Для запропонованої ІТ 3D реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням оцінені похибки визначення значень вертикальної похідної та глибини, які індуковані відхиленням оцінок параметрів ламбертівської моделі відбиття світла від дійсних або технологічно запланованих значень, що дало змогу практичної реалізації ІТ з гарантованими похибками реконструкції.

Результати дисертаційної роботи, а саме розроблені установки фотозйомки поверхні трубопроводів, а також алгоритми та інформаційні технології реконструкції дефектів реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке прийнято для впровадження в філії БМФ “Укргазпромбуд” АТ “Укртрансгаз” та Долинському ЛВ УМГ філії “Прикарпаттрансгаз” для неруйнівного контролю стану газопроводів, уражених корозійними дефектами.

**Ключові слова:** тривимірна реконструкція, похибки, артефакти, зображення, напрямок освітлення, інформаційна технологія.

#### **Список опублікованих праць за темою дисертації:**

Наукові праці в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В. Дистанційне визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень. *Наукові праці ДонНТУ Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*. 2017. №1(24). С. 36–44.

2. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності. *Вісник НУ Львівська політехніка “Інформаційні системи та мережі”*. 2017. №872. С. 49–61.

3. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Корній В.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображень корозійного тріщиноподібного дефекту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. 2016. №11. С. 297–300.

4. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2016. № 1. С. 39–46.

5. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка глибини тріщини за її стереозображенням на основі ламбертівської моделі відбиття. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2015. №4. С. 46–53.

6. Rusyn V., Hrabovska N., Ivaniuk V., Lysak Y., Varetsky J. Information Technology of the Pitting Three-Dimensional Reconstruction by Halftone Images. *Mechanik*. 2015. № 3. P. 372–376.

7. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №2. С. 58–63.

8. Rusyn V., Hrabovska N., Ivaniuk V. Evaluation of Error Pitting Depth in Three – Dimensional Reconstruction. *Application of information technologies-theory and practice*. Poland. 2015. P. 197–204.

9. Rusyn, V.P., Anufriyeva N.P., Hrabovska N.R., Ivaniuk V.H. Nondestructive Testing of the State of Surfaces Damaged by Corrosion Piting. *Materials Science*. 2014. 49(4). P. 516-524. (Scopus, WEB of Science).

10. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В. Похибка тривимірної реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням. Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи. XXV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного

інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 27-29 вересня 2017 р., Львів. 2017. С. 197–200.

11. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Інформатика та системні науки", 16-18 березня 2017 р., Полтава: праці конференції. Полтава, 2017. С. 60–62.

12. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображення корозійного пітинга. VIII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", 21-23 вересня 2016 р., Запоріжжя: праці конференції. Запоріжжя, 2016. С. 210–214.

13. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Тривимірна реконструкція поверхні за тріадою її зображень. IV науково-технічна конференція "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації", 28-30 вересня 2016 р., Львів: збірник тезисів. Львів, 2016. С. 197–200.

14. Грабовська Н.Р. Оцінка глибини тріщини за її зображенням Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи, XXIV Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 20-22 жовтня 2015 р., Львів. 2015. С. 228–231.



## ABSTRACT

Hrabovska N.R. Information technologies of three-dimensional reconstruction from images of surface defects are for the Lambert reflection model of the light.

Qualifying scientific work is on rights for a manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of technical sciences after speciality 05.13.06 are Information technologies. It is the Ternopil national economic university, Ternopil, 2019.

Dissertation is sanctified to development and improvement of methods, algorithms and information technologies of three-dimensional reconstruction of images of surface defects that is based on the optics of Lambert reflection model of the light.

An actual scientific technical task is in-process untied. This task related to development of methods, algorithms and creation on their basis of information technologies for reduction to influence of errors and artefacts on the reconstruction of form and depth-of defects finding at her use for monitoring of the technical state of metallic constructions. In particular, such results are got:

New information technology of a 3D reconstruction of surface is offered on the basis of information about the triad of the images of surface, with the shaded image of surface. This images of the triad got at different directions of illumination of surface. This information is using in procedure of a 3D reconstruction that is based on the Lambert reflection model of the light. With the using model in this procedure of the 3D reconstruction the surface of material is described as a system of equalizations of reconstruction. For realization of reconstruction two variants are offered.

In the first variant the decision of the equalizations of the system of reconstruction is with a diagonal matrix. The matrix for realization requires the special technique of the video recording. This recording is applied: a base image is got with a vertical location by the sources of light, and other determine two additional images, with directions (by corners of illumination, that is noncommunicative in one of two vertical orthogonal planes of three-dimensional space. On the basis of this information the derivatives of normal vectors are appraised. An estimation of depth of the defect is

the integral accumulation of derivative normal of the defect vectors, beginning from one of points of surface that is taken for set.

An example of practical application of the worked out algorithm of three-dimensional reconstruction of surface of the real pitting of the pipeline is made. Exactness of reconstruction is appraised. The expected errors of determination of derivatives of the prospected surface are conditioned by an out-of-control rejection each of triad of directions of illumination from technologically pre-arranged value. On their basis the expected ranges of a lossless reconstruction of values of horizontal and vertical derivatives.

To automatize the process of recreation of defect in the second variant of reconstruction after the triad of images for the decision of the system of equalizations of reconstruction a matrix is applied that for realization requires application of technique of the video recording with the arbitrarily set directions of illumination of surface. For realization such video recording in composition the method of three-dimensional reconstruction it is suggested to apply new method of the optical monitoring of a illumination direction from information of image of test standard. On the basis of information about the image of surface of triad of planes with the known normal vectors and shaded image of surface in procedure of a 3D reconstruction that is based on the Lambert reflection model of the light, the angular parameters of direction of light(derivatives of normal of sphere vector) are described as a system of equalizations of reconstruction that has a programmatic decision. It is set at verification of capacity and exactness of the offered method, that the absolute error of estimation of derivatives of normal of sphere vector presents  $[-0,025, 0,028]$ , when derivatives belong to the range  $[-1,225; 1,25]$ .

The new method of three-dimensional reconstruction of surface that is based on the Lambert reflection model of the light is offered, where information of pair of images is used. This information jointly with shaded image allows to describe the three-dimensional surface of material as a system of two equalizations that allow to reconstruct the derivatives of normal vectors. For the increase of exactness of reconstruction derivative normal vectors are corrected systematic errors that is

determined on the plane of surface of the prospected object. An estimation of depth of surface is the integral accumulation of the adjusted derivative normal vectors, beginning from one of points of surface that is taken for set. After such approach, when the algorithm of three-dimensional reconstruction of surface is realized as a virtual system of treatment of information, suitable for the artificial generating the pair of images using a plate with a crack, her errors of reconstruction are appraised. It is set that the relative error of calculation part of algorithm of reconstruction presents  $\pm 0,5\%$  Expected errors of reconstruction, and also ranges of lossless reconstruction of derivative normal vectors and depth of defect.

New two-stage information technology of three-dimensional reconstruction of superficial defects is offered, such, as cracks and pitting, after one image. Efficiency and capacity of this technology is considered on the example of the pitting.

On the first stage, to create the terms of reconstruction on information of beating back on the platform of the Lambert reflection model of the light, from the image of a pitting filtration to horizontal direction information of horizontal derivative surface of the pitting is removed. That gives an opportunity to reconstruct the vertical derivative of vertical cut of the pitting and from this information integrally to find the profile of the pitting  $z$ .

On the second stage, being based on the got estimation of cut of  $z$ , will define the full-scale estimation of a 3D pitting surface by approximation of surface spheroidal segments. For the increase of exactness of reconstruction the created a pitting model gets a self-reactance correction in horizontal direction on such parameters, as a model change and slanting clench at first left, and then right part of model. For the estimation of quality of correction of the pitting model on a separate parameter the image of the pitting model is artificially generated after the applied model of removing of a 3D model of the pitting points, and then a quadratic form that is the integral accumulation of square of absolute error of the real image of the pitting and artificially created image of model of the pitting settles accounts.

In the system of treatment for clarification of the pitting model certainly minimum quadratic form on every parameter of model. Appraised errors of depth-

finding of the pitting, induced by deviation of parameters of the applied model of beating back from the forecast values, that gave an opportunity to expect the appropriate ranges of lossless of three-dimensional reconstruction of values of vertical derivative.

**The scientific novelty of the obtained results** consists in creating on the information resource of the Lambert model of reflection of light new methods and information technologies of three-dimensional reconstruction, which reduce the influence of artifacts on the reproduction of defect form and increase the speed and accuracy of their reconstruction.

1. For the first time a mathematical model was developed that eliminates the effect of changing the diffuse reflection coefficient on the defect's shape reproduction process, which allows us to develop information technology for three-dimensional reconstruction of surface defects in a triad of images, which, in contrast to existing ones, reduces the error of defining the shape and depth of defects.

2. The method of automated remote control of the direction of illumination of a surface of an object is proposed, which allows to carry out such control on the information resource of the Lambert model of reflection of light for three vectors of normal to a test surface having a triad of planes. The method is combined in a technological chain with three-dimensional reconstruction of the IT methods in a triad of images, which increases the speed and accuracy of reproduction of the shape of surface cracks and pits.

3. Three-dimensional reconstruction of the IT based on a stereoscopic image has been improved, in which two directions of illumination of the surface of the object are applied and the effect of changing the diffusive reflection coefficient in the process of reproduction of the defect is minimized.

**The practical significance of the results** obtained is as follows.

Three-dimensional reconstruction of the surface of the IT is suggested by the triad of images, where the directions of illumination are determined by the method of remote optical monitoring of the direction of illumination (the absolute error of the calculation part of the algorithm for reconstruction of the kotangens of the angles of

illumination is  $\pm 0.028$ ), allows apply such a reconstruction for automated non-destructive control of the defect resistance of the surface of the structural elements.

The proposed method of three-dimensional reconstruction of the surface in a triad of images with the control of lighting directions, by comparison with a technologically determined vector (guaranteed absolute error of installing collages of angles of illumination  $\pm 0.01$ ), allows us to apply such reconstruction to monitor the technical condition of objects with a relative reconstruction error of  $\pm 0.1$ . To improve the accuracy of the reconstruction, a two-step algorithm for setting the optimum side angle of illumination for the formation of images has been developed. Effectiveness of the practical application of 3D reconstruction has been tested for surface patches that appear on the surface on a steel 17GC.

For the proposed IT 3D reconstruction of the pitting for its two-dimensional image, the errors of the determination of values of the vertical derivative and depth, which are induced by the deviations of the estimates of the parameters of the Lambert light reflection model from the actual or technologically planned values, have been estimated, which enabled the practical realization of the IT with guaranteed reconstruction errors.

The results of the dissertation work, namely, the installation of photographic images of the surface of the pipelines, as well as algorithms and information technologies for defect reconstruction, are implemented in the form of software implemented in the branch of the "Ukrgezprombud" branch of Ukrtransgas and Dolinsky LM UMG of the "Prykarpatransgas" branch for non-destructive status control gas pipelines affected by corrosion defects.

**Key words:** three-dimensional reconstruction, errors, artefacts, images, illumination directions, information technology.

#### **List of published works on the topic of the dissertation:**

The scientific works in which the main results of the dissertation are published:

1. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G., Lysak Yu.V. Remote determination of the direction of light in a three-dimensional reconstruction by a triad of

images. *Scientific works of DonNTU Series "Informatics, Cybernetics and Computing"*. 2017. No. 1 (24). P. 36–44.

2. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G. Method of three-dimensional surface reconstruction by a triad of images and estimation of its accuracy. *Visnyk NU Lviv Polytechnic "Information systems and networks"*. 2017. No. 872. P. 49–61.

3. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G., Korniy V.V. Estimation of the accuracy of three-dimensional reconstruction of images of a corrosion cracked defect. *Physical chemistry. material mechanics. Special output. Problems of corrosion and corrosion protection of materials*. 2016. No. 11. P. 297–300.

4. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G. Error of three-dimensional surface reconstruction by the triad of its images. *Radio Electronics and Informatics*. 2016. No. 1. P. 39-46.

5. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G. Estimation of the depth of the crack in its stereo image based on the Lamberti model of reflection. *Radio Electronics and Informatics*. 2015. №4. P. 46–53.

6. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V., Lysak Y., Varetsky J. Information Technology of the Pitting, Three-Dimensional Reconstruction by Halftone Images. *Mechanic*. 2015. No. 3. P. 372–376.

7. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G., Kapshy O.V. Error of three-dimensional reconstruction of the surface of the crack during the triad of images. *Radio Electronics and Informatics*. 2015. № 2. P. 58–63.

8. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V. Evaluation of Error Pitting Depth in Three-Dimensional Reconstruction. *Application of information technologies-theory and practice*. Poland. 2015. P. 197–204.

9. Rusyn, B.P., Anufriyeva N.P., Hrabovska NR, Ivaniuk V.H. Nondestructive Testing of the State of Surfaces Damaged by Corrosion Piting. *Materials Science*. 2014. №49 (4). P. 516–524. (Scopus, WEB of Science).

10. Hrabovska N.R., Lysak Yu.V. Error of three-dimensional reconstruction of a pitting on its two-dimensional image. Problems of corrosion-mechanical destruction, surface engineering, diagnostic systems, XXV Open scientific and technical conference

of young scientists and specialists of the Physics and Mechanics Institute named after. GV Karpenko National Academy of Sciences of Ukraine, September 27-29, 2017, Lviv. 2017. P. 197–200.

11. Hrabovska N.R., Lysak Yu.V., Torska R.V. Estimation of the accuracy of three-dimensional surface reconstruction by the triad of its images. VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Informatics and Systems Science", March 16-18, 2017, Poltava: Works of the Conference. Poltava, 2017. P. 60–62.

12. Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivaniuk V.G. Estimation of the accuracy of three-dimensional reconstruction of the image of corrosive pyting. VIII International scientific and practical conference "Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies", September 21-23, 2016, Zaporozhye: works of the conference. Zaporozhye, 2016. P. 210–214.

13. Hrabovska N.R., Lysak Yu.V., Torska R.V. Three-dimensional surface reconstruction by the triad of its images. IV sciences. conf. "Computational Methods and Systems for the Conversion of Information", September 28-30, 2016, Lviv: Collection of Theses. Lviv, 2016. P. 197–200.

14. Hrabovska N.R. Evaluation of the depth of the crack in its image Problems of corrosion and mechanical destruction, surface engineering, diagnostic systems, XXIV Open scientific and technical conference of young scientists and specialists of the Physics and Mechanics Institute named after. G.V. Karpenko, NAS of Ukraine, October 20-22, 2015, Lviv. 2015. P. 228–231.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ.....	25
1.1. Загальний огляд тематики основних сучасних методів 3D реконструкції. ....	25
1.2. Тривимірна реконструкція об'єктів на основі стереозображення	27
1.2.1. Модель системи стереобачення.....	28
1.2.2. Погодження зображень.....	29
1.2.3. Тривимірна реконструкція координат точок поверхні	32
1.2.4. Поява проблеми загороджених пікселів у неруйнівному контролі конструкцій.....	34
1.3. Алгоритми SFS і фотометричний стереоскопічний метод .....	36
1.4. Методи тривимірної реконструкції на платформі ламбертівської моделі відбиття світла.....	39
1.4.1. Метод тривимірної реконструкції за одним 2D зображенням на платформі ламбертівської моделі відбиття світла.....	41
1.4.2. Метод тривимірної реконструкції за серією 2D зображень на платформі ламбертівської моделі відбиття світла .....	43
1.4.3. Оцінка похибки визначення глибини тріщини в методі 3D реконструкції за її 2D зображенням в залежності від напрямку освітлення.....	47
1.5. Висновки.....	51
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВІДТВОРЕННЯ ФОРМИ ДЕФЕКТУ ЗА МЕТАЛОГРАФІЧНИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ НА ПЛАТФОРМІ ЛАМБЕРТІВСЬКОЇ МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ СВІТЛА	53
2.1. Розробка методу тривимірної реконструкції форми поверхні по трьох 2D зображеннях на платформі ламбертівській моделі відбиття світла.....	53



2.1.1. Метод тривимірної реконструкції за тріадою зображень з технологічно запланованими напрямками освітлення фотозйомки.....	56
2.1.1.1. Алгоритм 3D реконструкції за тріадою зображень з технологічно заданими напрямками світла.....	57
2.1.1.2. Вдосконалення техніки системи освітлення фотозйомки на основі механічно – оптичних інструментів встановлення напрямку світла.....	58
2.1.2. 3D реконструкція за тріадою зображень з дистанційним оптичним моніторингом напрямків світла .....	62
2.1.2.1. Техніка дистанційного оптичного моніторингу напрямку світла	63
2.1.2.2. Програмна реалізація алгоритму оптичного моніторингу напрямку світла .....	65
2.1.3. Двокроковий алгоритм підвищення точності реконструкції за тріадою зображень .....	69
2.2. Метод оцінки глибини поверхні за стереозображенням на платформі ламбертівської моделі відбиття світла .....	71
2.2.1. Тривимірна реконструкції за стереозображенням на основі елементів тривимірної реконструкції за тріадою зображень .....	72
2.3. Удосконалення методу оцінки глибини поверхневого дефекту за одним зображенням, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла.....	75
2.3.1. Двохетапна інформаційна технологія тривимірної реконструкції пітинга .....	76
2.3.2. Двохетапна інформаційна технологія тривимірної реконструкції горизонтальної тріщини .....	78
2.4. Висновки.....	78
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ГЛИБИНИ ДЕФЕКТУ ПРИ ТРИВИМІРНІЙ РЕКОНСТРУКЦІЇ.....	80
3.1. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень в залежності від бокових напрямків освітлення .....	80
3.2. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою її зображень в залежності від відхилень у вертикальному напрямку освітлення	85

3.3. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності .....	90
3.4. Кількість інформації інформаційної технології тривимірної реконструкції за тріадою зображень .....	98
3.5. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за її стереозображенням, індукційована відхиленням напрямків освітлення від технологічно запланованих значень .....	102
3.6. Оцінка похибки визначення глибини пітинга при тривимірній реконструкції за його 2D зображенням .....	103
3.7. Висновки.....	114
<b>РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D РЕКОНСТРУКЦІЇ ПІТИНГІВ.....</b>	<b>116</b>
4.1. Інформаційна технологія оцінки 3D поверхні пітинга за тріадою зображень поверхні матеріалу .....	116
4.2. Інформаційна технологія тривимірної реконструкції пітингів за 2D зображенням.....	120
4.3. Програмна реалізація методу оцінки глибини поверхні за її стереозображенням, створеного на платформі ламбертівської моделі відбиття .....	124
4.4. Висновки.....	137
<b>ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>141</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>154</b>
Додаток А. Програми, застосовані в розроблених інформаційних технологіях 3D реконструкції .....	154
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертації .....	160
Додаток В. Список праць дисертанта .....	162

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- СОЗ – система обробки зображень;
- ІТ – інформаційна технологія;
- СТРТЗ – система тривимірної реконструкції за тріадою зображень;
- ПВП – пристрій вертикального променя;
- ПБП – пристрій бокового променя;
- ТР – тривимірна реконструкція;
- ТРТЗ – тривимірна реконструкція за тріадою зображень;
- НСП – напрямок світла, ілюмінаційні параметри;
- НС – напрямок світла;
- ЛМВС – ламбертівська модель відбиття світла;
- КІ – кількість інформації.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Інформаційні технології (ІТ) тривимірної реконструкції об'єктів широко застосовуються в різноманітних галузях науки і техніки, а саме в медицині, робототехніці, дистанційному зондуванні поверхні Землі. Останнім часом вони знайшли своє широке використання і в дистанційному зондуванні поверхні конструкційних матеріалів. Так в неруйнівному контролі технічного стану об'єктів необхідно оцінити форму та розміри поверхневих дефектів, які є вирішальними при оцінці ресурсу безаварійної роботи об'єктів. Існуючі підходи до тривимірної реконструкції (3D) мають цілий ряд недоліків. Їх усунення вимагає вдосконалення існуючих інформаційних технологій 3D реконструкції. Зокрема, при стереорекопструкції необхідно усунути збій методу та алгоритму, що його реалізує. Цей збій пов'язаний з присутністю на одному з зображень стереопари значної за розмірами зони загороджених пікселів. Для тривимірного відтворення за фотометричним стерео та алгоритмами SFS збій методу і алгоритму зумовлений присутністю на об'єкті аналізу зони, де змінюється дифузний коефіцієнт відбиття від поверхні. Ці артефакти виникають і при використанні методів, що основані на використанні ламбертівської моделі відбиття світла.

Тому, дисертаційна робота, яка присвячена розробці методів і програмно-технічних засобів тривимірної реконструкції, в яких усувається залежність від завад, викликаних зміною дифузного коефіцієнта відбиття та загороджених пікселів на зображеннях об'єктів реконструкції, є актуальною науковою роботою.

Розвинуті в роботі положення базуються на доробці таких вчених, як О. Романюк, В. Гусятін, Є. Башков, В. Боюн, В. Лукін, Е. Путятін, Б. Русин, М. Шлезінгер, Y. Ma, C. Rafael, Д. Форсайт, O.D. Faugeras, P. Anandan, A. Blake, R. Szeliski, D. Scharstein, Д. Броек, P. Marcus, J. Fole, B.K.P. Horn, R.J. Woodham та інші.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.**

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, що виконувалися за держбюджетною темою: “Розроблення інформаційних технологій діагностики елементів конструкцій, уражених корозійними виразками” (номер державної реєстрації 0114U004007, 2014-2016рр.) у Фізико-механічному інституті НАН України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методів і програмно-технічних засобів тривимірної реконструкції на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла, та створення на їх основі інформаційних технологій, які підвищують завадостійкість та швидкість відтворення форми дефектів в технічній діагностиці.

Досягнення поставлено мети вимагало вирішення наступних науково-технічних завдань:

- провести загальний огляд та системний аналіз основних відомих методів тривимірної реконструкції з обґрунтуванням їхніх переваг та недоліків при моніторингу технічного стану металевих конструкцій;

- розробити та реалізувати ІТ тривимірної реконструкції поверхні за одним або тріадою зображень на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла, яка використовує технологічно задані напрямки освітлення поверхні;

- усунути вплив артефактів, а саме зміни дифузного коефіцієнта відбиття і загороджених пікселів на процес реконструкції та оцінити похибки відтворення форми поверхневих дефектів;

- розробити метод дистанційного оптичного моніторингу напрямків світла;

- розробити новий метод та алгоритм тривимірної реконструкції за стереозображенням на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла;

- практично реалізувати нову ІТ тривимірної реконструкції поверхневих дефектів за одним зображенням, що базується на ламбертівському відбитті світла.

**Об'єкт дослідження:** процес тривимірної реконструкції локальних пошкоджень поверхонь металевих конструкцій за їх зображеннями/

**Предмет досліджень** – методи та алгоритми зменшення впливу артефактів на тривимірну реконструкцію поверхневих дефектів.

**Методи дослідження:** методи 3D реконструкції, методи оцінки похибок вимірювань з застосуванням рядів Тейлора і Маклорена, комп'ютерне моделювання процесу реконструкції.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у створенні на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла нових методів і інформаційних технологій тривимірної реконструкції, які зменшують вплив артефактів на відтворення форми дефектів та підвищують швидкість і точність їх реконструкції.

1. Вперше розроблено математичну модель, яка усуває з процесу відтворення форми дефекту вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла, що дозволяє розробити інформаційну технологію тривимірної реконструкції поверхневих дефектів за тріадою зображень, яка на відміну від існуючих зменшує похибку визначення форми та глибини дефектів.

2. Запропоновано метод автоматизованого дистанційного контролю напрямку освітлення поверхні об'єкту, який дозволяє здійснити такий контроль на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла за трьома векторами нормалі до тестової поверхні, що має тріаду площин. Метод об'єднаний у технологічний ланцюжок з методами ІТ тривимірної реконструкції за тріадою зображень, що збільшує швидкість і точність відтворення форми поверхневих тріщин та пітингів.

3. Удосконалено ІТ тривимірної реконструкції за стереозображенням, в якій застосовуються два напрямки освітлення поверхні об'єкту та зменшено до мінімуму вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла в процесі відтворення форми дефекту.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному.

Запропонована ІТ тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень, де напрямки освітлення визначаються методом дистанційного оптичного моніторингу напрямку освітлення (абсолютна похибка розрахункової частини алгоритму реконструкції котангенсів кутів освітлення становить  $\pm 0,028$ ), дає змогу застосовувати таку реконструкцію для автоматизованого неруйнівного контролю дефектостійкості поверхні елементів конструкції.

Запропонований метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень з контролем напрямків освітлення, шляхом порівняння з технологічно заданим вектором (гарантована абсолютна похибка встановлення котангенсів кутів освітлення  $\pm 0,01$ ), дозволяє застосовувати таку реконструкцію для моніторингу технічного стану об'єктів з відносною похибкою реконструкції  $\pm 0,1$ . Для підвищення точності реконструкції розроблено двокроковий алгоритм встановлення оптимального бокового кута освітлення для формування зображень. Ефективність практичного застосування 3D реконструкції перевірена для поверхневих пітингів, що виникають на поверхні на сталі 17ГС.

Для запропонованої ІТ 3D реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням оцінені похибки визначення значень вертикальної похідної та глибини, які індуковані відхиленням оцінок параметрів ламбертівської моделі відбиття світла від дійсних або технологічно запланованих значень, що дало змогу практичної реалізації ІТ з гарантованими похибками реконструкції.

Результати дисертаційної роботи, а саме розроблені установки фотозйомки поверхні трубопроводів, а також алгоритми та інформаційні технології реконструкції дефектів реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке впроваджено в філії БМФ “Укргазпромбуд” АТ “Укртрансгаз” та Долинському ЛВ УМГ філії “Прикарпаттрансгаз” для неруйнівного контролю стану газопроводів, уражених корозійними дефектами.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать;

метод дистанційного визначення напрямку світла [1]; метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень [2]; оцінка точності тривимірної реконструкції [3, 4]; алгоритм тривимірної реконструкції за стереозображенням [5]; алгоритм адаптивної тривимірної реконструкції за одним зображенням дефекту [6]; програмна реалізація методів реконструкції [7-9]; аналіз похибок методів реконструкції [10-13].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень та основні положення роботи доповідались та обговорювались на:

- VIII Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (Запоріжжя, 2016).

- IV науково-технічній конференції “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації” (Львів, 2016).

- Відкритих науково-технічних конференціях молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2015, 2017).

- VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції “Інформатика та системні науки” ІСН – 2017 (Полтава, 2017).

**Публікації.** За тематикою дослідження опубліковано 14 наукових праць, з них 9 статей у виданнях, що входять до переліку фахових видань, затверджених ДАК України, і 5 публікації у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел (141 найменування) та двох додатків. Загальний обсяг роботи – 163 с., у тому числі 32 рисунки та 3 таблиці.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

В розділі проведено огляд сучасних методів тривимірної реконструкції відновлення просторової конфігурації поверхні об'єктів за їх стереозображеннями, а також на основі моделі відбиття світла. На основі порівняльного аналізу представленої інформації зроблені висновки, які підтверджують актуальність роботи і вказують на необхідності розробки нових та вдосконалення існуючих моделей, методів і інформаційних технологій для проведення наукових і експериментальних досліджень, пов'язаних з обробкою та аналізом послідовності зображень для відновлення форми дефекту та оцінки його глибини в задачах технічної діагностики конструкційних матеріалів.

#### **1.1. Загальний огляд тематики основних сучасних методів 3D реконструкції**

Початковий напрямок наукових досліджень, пов'язаний з тривимірною реконструкцією, був сфокусований на розробці багатьох ефективних методів [1-6], які дозволяли відтворювати поверхню дифузних предметів.

Проаналізуємо роботи, які стосуються тематики загороджених об'єктів. Відомі різні техніки реконструкції їх поверхні: PMVS [7], Poisson [8,9], SMP-MVS [10], мульти спостереження стерео MVS [11], які представляють як широко, так і добре вивчені алгоритми реконструкції. Зокрема це застосовується в відтворенні поверхні при існуванні загороджених пікселів та їх усунення при використанні серій зображень, отриманих з різних напрямків спостереження. Працездатність наведених методів переважно демонструються на статуях, або елементах архітектури. Проте пряме застосування цих методів та алгоритмів для обстеження конструкцій значного розміру обмежується і навіть лімітується повільністю процедури 3D реконструкції. Так при неруйнівному контролю конструкцій фотозйомкою отримуємо значні обсяги зображень, а потім на основі

отриманої фотоінформації часто виникає необхідність реконструювати поверхню конструкції, що потребує дуже значного часу. В перспективі застосування таких методів для неруйнівного контролю конструкцій очікуваний час реконструкції буде набагато більший ніж час класичної стереорекопструкції.

Основні моменти представленого огляду у вигляді переваг та недоліків відомих методів 3D реконструкції наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Порівняльна оцінка методів та інформаційних технологій

Метод реконструкції	Переваги	Недоліки
Мульти спостереження стерео MVS	усуває зони загороджених пікселів	швидкість 3D реконструкції значно менша ніж стереорекопструкції
PMVS	усуває зони загороджених пікселів	швидкість 3D реконструкції значно менша ніж стереорекопструкції
Poisson	усуває зони загороджених пікселів	швидкість 3D реконструкції значно менша ніж стереорекопструкції
CMR-MVS	усуває зони загороджених пікселів	швидкість 3D реконструкції значно менша ніж стереорекопструкції
Класична стереорекопструкція	задовільна швидкість реконструкції, проста технічна реалізація	не усуває зони загороджених пікселів

алгоритми SFS метод photometric stereo	задовільна швидкість 3D реконструкції	просторово-змінний дифузний коефіцієнт (альbedo) блокує 3D реконструкцію
3D реконструкція з одним 2D зображенням на основі ламбертівської моделі відбиття світла	задовільна швидкість 3D реконструкції	часткова 3D реконструкція дефекту
3D реконструкція по серії 2D зображень на основі ламбертівської моделі відбиття світла	задовільна швидкість 3D реконструкції	відсутня технічна реалізація

Як видно з представленої інформації з однієї сторони усунення зон загороджених пікселів супроводжується зменшенням швидкості 3D реконструкції. Щоб з'ясувати і уточнити причини такого сповільнення реконструкції доцільно розглянути класичну стереореконострукцію.

## 1.2. Тривимірна реконструкція об'єктів на основі стереозображення

На сьогодні існує ряд підходів для побудови тривимірних моделей об'єктів, в тому числі й таких, де застосовується складна й дорога техніка для зйомки зображень (пристрої для кодованого освітлення об'єктів [12], вимірювачі профілю [13] тощо). Проте, найбільш природним та простим у технічній реалізації є тривимірна реконструкція об'єктів на основі стереозображення, яка використовує лише зображення об'єкта, що отримані за допомогою фотокамер [1]. Ця тривимірна реконструкція – одна з найуживаніших інформаційних технологій тривимірної реконструкції, що набула інтенсивного розвитку завдяки можливостям сучасної обчислювальної техніки [14-17].

За останні роки область застосування тривимірної реконструкції на основі стереозображення значно збільшилась і зараз вона впевнено застосовується в геодезії та картографії де виникають задачі автоматизованої побудови карти місцевості за результатами аерофотозйомки, при спостереженні з супутників, розвідка з повітря, в системах безпеки, де використовуються тривимірні моделі людських облич для підвищення надійності ідентифікації особи за її фотознімком, в фрактографії чи фотограмметрії ближнього радіуса дії, на виробництві, при роботі з персональними комп'ютерами, в управлінні “зрячих роботів”, в задачах технічної та медичної діагностики. Актуальність дослідження тематики тривимірної реконструкції об'єктів на основі стереозображення, підтверджується стабільним розвитком науково-технічних програм, направлених на створення нових інформаційних технологій, що спиратимуться не лише на потужність обчислювальної техніки, а, насамперед, на інтелектуальні алгоритми та підходи до обробки зображень.

Тривимірна реконструкція на основі стереозображення є комплексним процесом, що містить кілька споріднених задач:

- калібрування фотокамер, формування фотокамерами двох рознесених проєкцій одного і того ж об'єкта;
- задачі погодження зображень, отриманих кожною фотокамерою;
- реконструкція тривимірного зображення [1, 14-20].

Щоб з'ясувати і уточнити причини появи зони загороджених пікселів і вплив на результат тривимірної реконструкції доцільно розглянути один з сучасних алгоритмів її реалізації.

### **1.2.1. Модель системи стереобачення**

Для інформаційної технології реконструкції використовуються дані, які поступають на екрани двох камер [1, 14-16]. Нехай  $[X, Y, Z]$  точка реального світу. Ця точка проєктується на  $i$ -ий екран  $[x_i, y_i]$   $i$ -ої камери. Модель процесу проєктування на екрани двох камер (рис. 1.1) записується наступними співвідношеннями

$$k_i s_i = F_i S, \quad i = 1, 2 \quad (1.1)$$

де  $F_i = [K_i R_i | -K_i R_i O_i]$ , тут  $K_i$  калібраційна матриця  $i$ -ої камери;  $R_i$  - матриця обертання оптичної осі  $i$ -камери відносно центра координат тривимірного простору;  $O_i$  - координати оптичного центра  $i$ -ої камери;  $k_i$  - скалярний коефіцієнт;  $s_i = [x_i, y_i, f]^T$  та  $S = [X, Y, Z, 1]^T$  - однорідні координати.

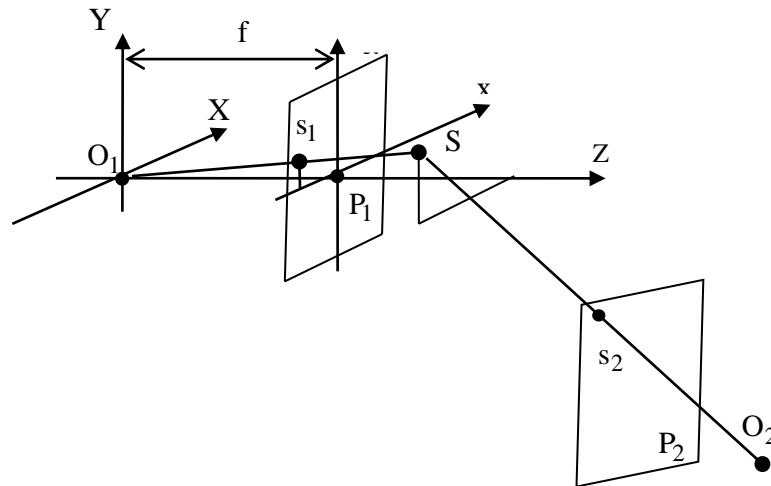


Рисунок 1.1 – Схематичне представлення процесу проектування на екрани двох камер

Для камери 1 процес проектування представлений детальніше.

На рис. 1.1. оптичний центр 1-камери розміщено в початку системи координат. Перспективна проекція для камери 1 в цьому випадку описується наступними рівняннями:  $\frac{x_{1S}}{f} = \frac{X_S}{Z_S}$ ,  $\frac{y_{1S}}{f} = \frac{Y_S}{Z_S}$ , де  $(x_{1S}, y_{1S})$  проекційні координати

точки  $S$  на екрані  $P_1$ ,  $f$  – фокусна віддаль камери. Розглянемо більш детально операцію погодження двох зображень.

### 1.2.2. Погодження зображень

Під час погодження виконується пошук відповідності між тривимірними точками сцени і пікселями двох зображень. Точки  $s_1$  та  $s_2$  на екранах називаються погодженими (рис. 1.1). Час виконання цієї операції набагато більший за час виконання інших операцій тривимірної реконструкції на основі стереозоб-

раження, і практично визначає час виконання цієї тривимірної реконструкції. Основну увагу приділимо операціям, які визначають час виконання реконструкції. До операції погодження входять або мають зв'язок наступні операції:

1. Формування двох зображень об'єкта  $I_1(x, y)$  та  $I_2(x, y)$ .
2. Виявлення та погодження особливих точок на зображеннях.
3. Оцінка фундаментальної матриці.
4. Ректифікація зображень.
5. Погодження з врахуванням епіполярного обмеження.

Операції 1-4 є підготовчі для проведення погодження. Після проведення операції 2 стає відома інформація про координати  $S_{w,1}$  та  $S_{w,2}$  погоджених  $w$  точок. В операції 3 відбувається встановлення оцінки елементів фундаментальної матриці, яка визначає взаємозв'язок між зображеннями з двох камер, (епіполярне обмеження) [14, 15, 17, 21]

$$\left( s_1^T \cdot F s_2 \right) = 0. \quad (1.2)$$

На основі цієї інформації операції 2 розв'язується задача мінімізації. Для розв'язку такої задачі існують різні підходи [17, 22-24]. Коли оцінку фундаментальної матриці знайдено, то використовуючи рівняння (1.2) можна встановити, що якщо будь-яка точка в просторі проектується в точку на екрані  $P_1$ , тоді відповідна (погоджена з нею) точка на іншому екрані буде знаходитись на іншому ек-

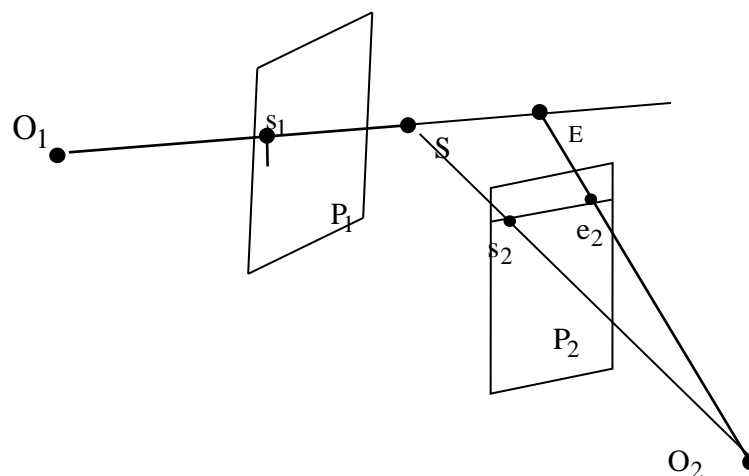


Рисунок 1.2 – Схематичне представлення прикладу епіполярного обмеження

рані тільки на визначеній нею епіполярній лінії. На рис. 1.2 для точки  $s_1$  пошук відповідності відбувається вздовж спряженої епіполярної лінії, яка проходить через точки  $s_2, e_2$ . Таким чином використання епіполярного обмеження дозволяє суттєво спростити (прискорити) розв'язок задачі погодження, через те, що пошук відповідності відбувається не по цілому зображенню, а вздовж спряжених епіполярних ліній.

Найчастіше погодження (операція 5) має три етапи: встановлення критерію погодження [25-34], узгодження конфігурації вікна обробки значень критерія погодження з принципом дії критерія погодження [35-39], застосування вирішуючого правила для співставлення пікселю зображення значення відповідного критерія погодження [40- 42].

Нехай вихідними даними задачі погодження зображень є два зображення  $I_1(x, y)$  та  $I_2(x, y)$ , де  $(x, y) \in A$  (апертура зображення) (див. рис. 1.1 та рис. 1.2) Під час погодження  $\mathbf{h}: I_1 \rightarrow I_2$  основна задача полягає у знаходженні вектора (функція відмінності)  $\mathbf{h}(x, y) = (u(x, y), v(x, y))^T$ , такого, що  $I_2(x, y) = I_1(x + u(x, y), y + v(x, y))$ . За критерієм погодження відбувається пошук вектора  $\mathbf{h}$ . Критерій погодження (локальна функція вартостей, міра подібності) встановлює міру подібності між пікселями.

На даний час кращі результати визначення відмінності досягаються шляхом використання глобальних методів погодження. Ці методи [43, 44] формально можна представити як задачу мінімізації енергетичної функції

$$E(\mathbf{h}) = E_f(C(\mathbf{h})) + \kappa E_r(\mathbf{h}), \quad (1.3)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт регуляризації, що задає рівень гладкості;  $E_f(C(\mathbf{h}))$  – функціональна компонента, яка визначає відповідність пікселів зображень на основі заданої міри подібності  $C(\mathbf{h})$ ;  $E_r(\mathbf{h})$  – регуляризуючий доданок, який встановлює обмеження на шукану функцію відмінності. Для знаходження мінімуму функціоналу  $E(\mathbf{h})$  (1.3) використовуються різні методи. Найбільш відомими є методи, які базуються на використанні кореляційних схем [45-47] варіаційного

числення [48], динамічного програмування [49-51], січення графу [52-54], марковських мереж [55-63] і ін. Представимо основні моменти одного з цих методів, в якому для знаходження екстремуму функціоналу  $E(\mathbf{h})$  використовується варіаційний підхід. Суть його полягає у встановленні відповідності між функціоналом, що мінімізується, та деяким рівнянням з частковими похідними таким чином щоб мінімум функціоналу збігався з розв'язком отриманого рівняння [48]. Для числового розв'язку таких диференціальних рівнянь використовують кінцево-різницеvu ітераційну схему. Наведений алгоритм погодження програмно реалізований [48].

### 1.2.3. Тривимірна реконструкція координат точок поверхні

Розглянемо метод тривимірної реконструкції координат точки  $S$  – метод розкладу на сингулярні значення [48, 64]. Перевагою цього метода є те що він не вимагає значних обчислювальних затрат. В цьому методі задачу реконструкції тривимірних координат точки  $S$  приведено до розв'язку системи нормальних однорідних лінійних рівнянь

$$\mathbf{Q}\mathbf{S} = 0, \quad (1.4)$$

де

$$\mathbf{Q} = k \begin{bmatrix} x_1 Q^{(1)}_3 - Q^{(1)}_1 \\ y_1 Q^{(1)}_3 - Q^{(1)}_2 \\ x_2 Q^{(2)}_3 - Q^{(2)}_1 \\ y_2 Q^{(2)}_3 - Q^{(2)}_2 \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

Тут, для формування оператора  $\mathbf{Q}$ , використовується проєкційна модель  $i$ -ої камери ( $i = 1, 2$ ), яка має вигляд:



$$k \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(i)} & p_{12}^{(i)} & p_{13}^{(i)} & p_{14}^{(i)} \\ p_{21}^{(i)} & p_{22}^{(i)} & p_{23}^{(i)} & p_{24}^{(i)} \\ p_{31}^{(i)} & p_{32}^{(i)} & p_{33}^{(i)} & p_{34}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1^{(i)T} \\ Q_2^{(i)T} \\ Q_3^{(i)T} \end{bmatrix} S. \quad (1.6)$$

За умовами реконструкції елементи проекційного оператора визначено, а також встановлені координати погоджених точок  $s_1$  та  $s_2$ .

Коли всі вихідні дані задані точно, ненульовий розв'язок однорідної системи є нуль – простір оператора  $Q$ . В реальній ситуації, враховуючи наявність похибок при обчисленні значень координат погоджених пікселів зображень  $s_1$  і  $s_2$  та неточностей калібрації камер стереосистеми, оператор  $Q$  не буде мати нуль – простору. Тоді поставлену задачу приводять до встановлення власного вектора оператора  $Q$ , що відповідає його мінімальному власному значенню. Для знаходження такого власного вектора оператора  $Q$ , знаходимо власні вектори матриці  $Q^T Q$   $[U, D, V] = \text{svd}(Q)$ , де  $D$  – діагональна матриця власних значень,  $V$  – матриця власних векторів матриці  $Q^T Q$ , впорядкованих у відповідності до елементів діагоналі матриці власних значень  $D$ . Геометрична інтерпретація цього підходу схематично подана на рис. 1.3. Шукана точка  $S$  розташована найближче до прямих  $O_1 s_1$ ,  $O_2 s_2$ . З розгляду (1.5) видно, що коли не встановлені координати погоджених точок  $s_1$  та  $s_2$ , то це приводять до збою 3D реконструкції (1.5).

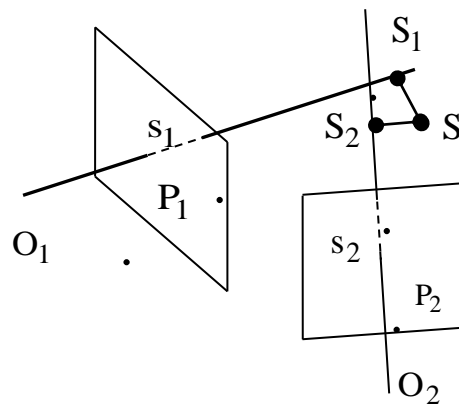


Рисунок 1.3 – Геометрична інтерпретація задачі мінімізації неув'язки, з використанням прямих  $O_1 s_1$ ,  $O_2 s_2$  на які проектується точка  $S$ .

Розглянемо ситуації, коли такий ефект виникає.

#### **1.2.4. Поява проблеми загороджених пікселів у неруйнівному контролі конструкцій**

Методи погодження зображень слід окремо розглядати стосовно здатності вирішувати проблему загороджених пікселів [65-74].

Наявність специфічних перешкод на поверхні об'єкта дослідження не дозволяє здійснювати погодження всіх ділянок поверхні. Ефект цих перешкод проявляється у частковому затіненні елементів поверхні об'єкта іншими її елементами.

В найпростіших підходах для вирішення проблеми загороджених пікселів передбачено процедуру їх детектування перед, або після етапу погодження [63, 75]. В подальшому в залежності від поставленої задачі такі пікселі позначаються як пікселі, для яких відмінності не може бути встановлено, або ж їм присвоюється значення отримане шляхом інтерполяції по сусідніх пікселях функції відмінності. Зауважимо, що така інтерполяція має сенс для незначних, відносно критерія Найквіста, областей затінення.

Розглянемо специфіку проблеми загороджених пікселів у неруйнівному контролі конструкцій. Розглянемо артефакт фотозйомки, тобто ефект затінення, який може мати місце у практичних дослідженнях дефектостійкості конструкцій. Ефект затінення, який приводять до збою 3D реконструкції (1.5) схематично представлено на рис. 1.4, де дефект дослідження це тріщиниподібний об'єкт. В моделі процесу проектування на екрани двох камер  $P_1, P_2 - O_1(O_2)$  – позначено координати оптичного центра камери 1 (2). Очевидно затінені точки об'єкта дослідження, які належать розкриву тріщини представлено кривою АВ. Ця крива повністю проектується на екран камери  $P_2$ . А на екран камери  $P_1$  проектується лише вище розташована крива MN. Цей артефакт фотозйомки блокує визначення такого важливого параметра, як довжина тріщини

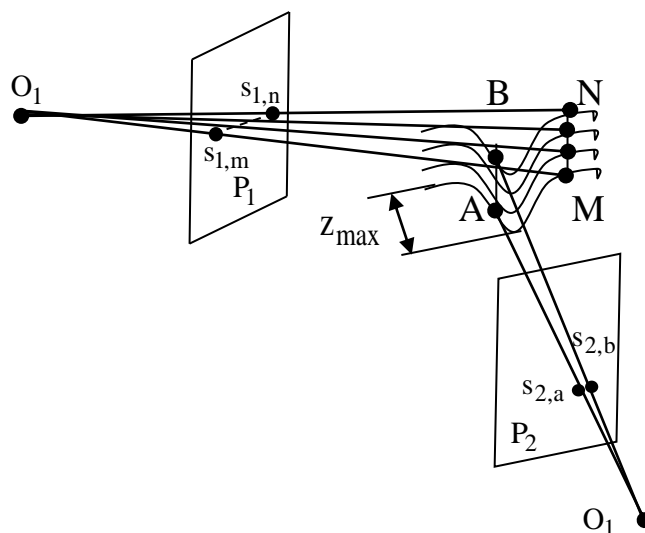


Рисунок 1.4 – Затінення тріщиноподібного дефекту при формуванні стерео проєкцій

На рис. 1.4 довжина тріщини  $z_{\max}$  представляє собою максимальну відстань від висоти на краю тріщини до її дна. Коли дослідну пластину з тріщиною розтягнуто у випробувальній машині нормальними до ходу тріщини навантаженнями  $\sigma$  поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень [76]

$$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi z_{\max}}, \quad (1.7)$$

який є мірою всіх напружень і деформацій. При досягненні  $K$  критичного значення  $K_c$  (константа матеріалу) здійсниться руйнування.

Зробимо декілька зауважень, які стосуються експлуатаційних умов роботи, які спричиняють появу артефакту, а саме зони загороджених пікселів. Зауважимо, що спочатку фотозйомкою отримується масив стереозображень поверхні конструкції, а потім на основі цієї інформації виконується 3D реконструкція. Крім того 3D реконструкцію планується використовувати при обстеження поверхні конструкцій значного розміру. В цьому випадку фотозйомкою отримується масив стереозображень значного обсягу. В зв'язку з цим фотозйомку планується здійснювати в режимі роботи, який близький до автоматичного обстеження

поверхні конструкцій. При таких умовах роботи поява зони загороджених пікселів на декількох зображеннях масиву стереозображень цілком імовірна.

Пропонується два варіанти боротьби з таким артефактом. Перший варіант, щоб не повертатись до повторної фотозйомки необхідно розробити 3D реконструкцію на основі одного зображення дефекту і реконструювати дефект таким методом. Другий варіант полягає в тому, що виконується повторна фотозйомка дефекту, який мав зону загородження. По отриманій фото інформації виконується альтернативна 3D реконструкція. В обох варіантах необхідно забезпечити мінімальний час реконструкції.

Таким чином для збільшення зони реконструкції у розкритті тріщини і підвищенні точності прогнозу коефіцієнта інтенсивності напружень доцільно скористатись в зоні загороджених пікселів додатковою тривимірною реконструкцією відмінною від стереобачення.

Враховуючи цю особливість постає необхідність в розробці альтернативної тривимірної реконструкції працездатної в зоні загородження пік селів.

Щоб запропонувати альтернативу продовжимо розгляд відомих методів тривимірної реконструкції.

### **1.3. Алгоритми SFS і фотометричний стереоскопічний метод**

Ще одним з напрямків отримання тривимірної форми предмету на основі аналізу його зображень є алгоритми SFS [ 77-91], а також фотометричний стереоскопічний метод, photometric stereo [92, 93, 2, 3]. За photometric stereo методом для корекції параметрів реконструкції штучно згенеровані зображення (застосовується штучна модель відбиття) порівнюються з отриманнями фотозйомкою зображеннями. У дискретизованому вигляді процедура мінімізації відхилень штучних та отриманих фотозйомкою зображень еквівалентна розв'язку системи лінійних рівнянь

Розглянемо основні елементи SFS одиничного зображення [94].

Основне рівняння для процесу формування зображення може бути виражене рівнянням освітленості зображення :

$$E(x,y) = R(p, q),$$

де  $R$  називається функцією схеми відбиття. Схема відбиття може бути отримана так, що

$$R(p, q) = \begin{cases} \eta l^T n, & 0 \leq l^T n; \\ 0, & 0 > l^T n, \end{cases}$$

де  $\eta$  – альbedo поверхні,  $n = \frac{(-p, -q, 1)^T}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$  нормаль до поверхні і  $l = \frac{(-p_s, -q_s, 1)^T}{\sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1}}$  –

одичний вектор напрямку освітлення, що вказує у бік джерела світла, і де  $p_s$  і  $q_s$  означають нахил перпендикуляра елемента поверхні з напрямом освітлення.

Розглянемо наближення гладкої поверхні з об'єднанням трикутних ділянок поверхні по рівномірній сітці області, як показано на рис. 1.5(а). Апроксимуюча поверхня може бути виражена у вигляді лінійної комбінації базисних функцій  $\phi_i$  з місцевими компактним носієм відомої, як кінцеві трикутні елементи (див. рис. 1.5 (б)), що

$$z(x,y) = \sum_{i=1}^{M_n} z_i \phi_i(x,y),$$

де  $z_i$  є значенням  $Z(x, y)$  в  $i$ -тому вузлі і  $M_n$  є кількістю вузлових основних функцій. Потім орієнтація трикутної ділянки може бути визначена як

$$p(x,y) = \sum_{i=1}^{M_n} z_i \frac{\partial \phi_i(x,y)}{\partial x}, \quad q(x,y) = \sum_{i=1}^{M_n} z_i \frac{\partial \phi_i(x,y)}{\partial y}.$$

Об'єднанням кінцевої трикутної моделі поверхні з лінеаризованою моделлю схеми відображення формування зображення, можемо виразити освітленість зображення безпосередньо в межах висот вузлових трикутних елементів таким

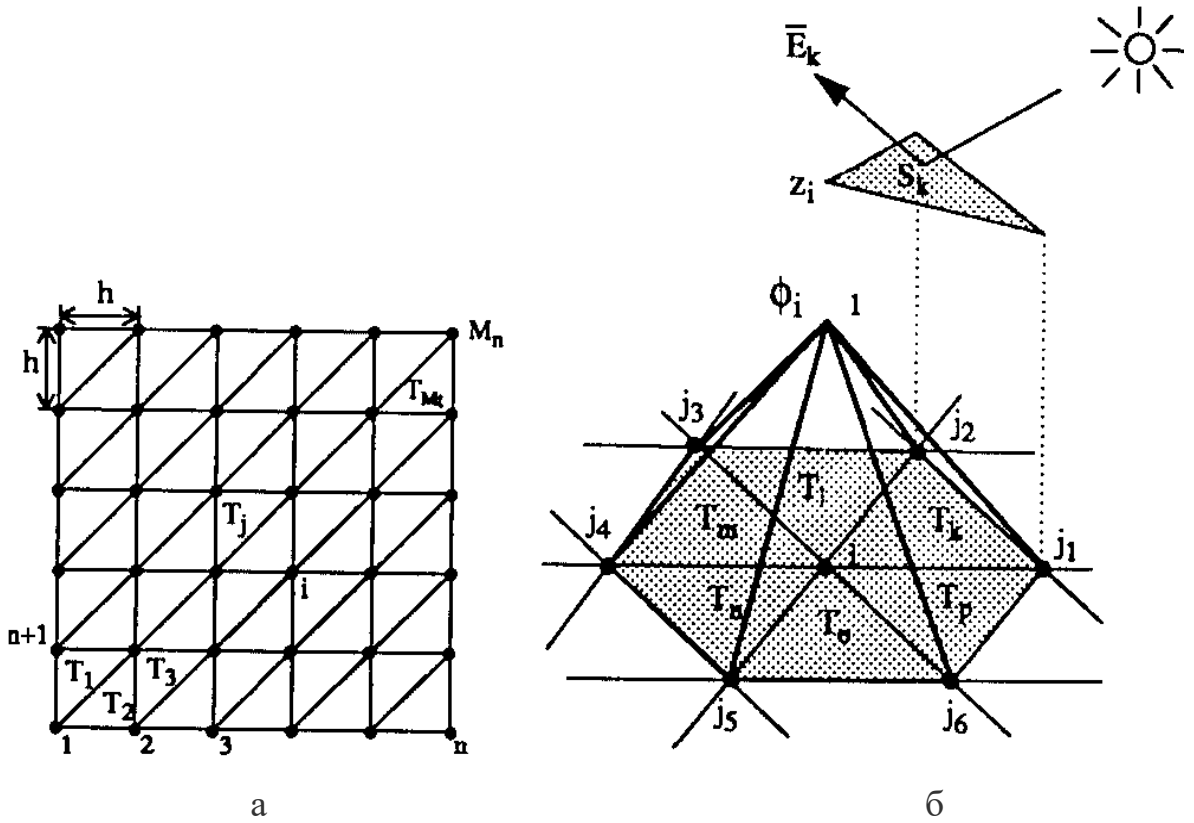


Рисунок 1.5 – Рівномірна триангуляція квадратної області  $\Omega$  (а), основна вузлова функція  $\phi_i$  (б)

чином

$$E=R(p, q) \approx \alpha p + \beta q + \gamma = \sum_{i=1}^{M_n} z_i \Phi_i + \gamma,$$

де

$$\Phi_i(x, y) \approx \alpha \frac{\partial \Phi_i(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial \Phi_i(x, y)}{\partial y},$$

$$\gamma = R(p_0, q_0) - \alpha p_0 - \beta q_0,$$

$$\alpha = \left[ \frac{\partial R(p, q)}{\partial p} \right]_{(p_0, q_0)}, \quad \beta = \left[ \frac{\partial R(p, q)}{\partial q} \right]_{(p_0, q_0)}.$$

Для оцінки вузлових висот  $z_i$  вважаємо, що витратний функціонал, який включає помилки яскравості і межі регуляризації, рівний

$$\varepsilon = \iint_{\Omega} (E_0 - E)^2 dx dy + \frac{\lambda}{2} \iint (z_{xx}^2 + z_{xy}^2 + z_{yy}^2) dx dy$$

де  $E_0$  і  $E$  означають спостережувану і генеровану освітленість зображення за допомогою моделі схеми відбиття, і  $\lambda$  є згладжуючим чинником. Розглянемо вплив альbedo поверхні на перший інтеграл. Альbedo поверхні визначають як відношення потоку випромінення, що його розсіює плоский елемент поверхні в усіх напрямках, до потоку випромінення, що надходить. У світлотехніці цю величину називають коефіцієнтом дифузного відбиття. Цей параметр може мати різне значення для різних матеріалів [95-98]. У випадку формування складу поверхні об'єкту різними матеріалами, які мають відмінний дифузний коефіцієнт, при фотозйомці зображення такої поверхні виникають зміни яскравості зображення  $E_0$  на просторових сегментах поверхні, викликані варіацією дифузного коефіцієнту. При реконструкції такого зображення за методом photometric stereo необхідно скоректувати коефіцієнти моделі відбиття, врахувавши просторові зміни дифузного коефіцієнту. Оскільки така корекція у цьому методі, у генерованій освітленість зображення  $E$ , відсутня, то виникає збій тривимірної реконструкції (у першому інтегралі) зумовлений впливом дифузного коефіцієнту. Переваги та недоліки алгоритмів SFS а також photometric stereo представлені у таблиці.

Щоб розробити альтернативну тривимірну реконструкцію продовжимо розгляд відомих методів тривимірної реконструкції.

#### **1.4. Методи тривимірної реконструкції на платформі ламбертівської моделі відбиття світла**

Проведемо розгляд відомих методів тривимірної реконструкції, де джерелом постачання інформації для проведення тривимірної реконструкції, є інформація, яка описує фізичні процеси формування зображення в рамках дифузної моделі відбиття. Розпочнемо огляд з розгляду дифузної моделі відбиття, яка є основою низки методів даного типу. Для дифузної моделі відбиття (розглядають монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначає рівняння [99, 100]

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d (N \cdot L), \quad (1.8)$$

де  $I_a$  – інтенсивність розсіяного світла;  $I_{p\lambda}$  – інтенсивність джерела освітлення;  $k_d$  – дифузний коефіцієнт, який визначає рівень дифузного відбиття досліджуваної точки поверхні;  $L = (L_x, L_y, L_z)$  – напрям на джерело світла;  $N = (N_x, N_y, N_z)$  – одиничний вектор нормалі до поверхні  $F(x, y, z) = 0$  у досліджуваній точці  $M = (x, y, z)$

$$N = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \right\}, \quad (1.9)$$

де

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

– нахил поверхні в околі точки (рис. 1.6., де  $N \in \{X, Y\}$ ). Вважаємо, що наступну реконструкцію виконують коли поверхня задана в явній формі  $z = f(x, y)$ , тому  $F(x, y, z) = f(x, y) - z = 0$ .

Оскільки інтенсивність джерела освітлення  $I_{p\lambda}$  є стала величина, то рівняння (1.8) є функцією чотирьох невідомих  $p, q, k_d$  та  $I_a$ .

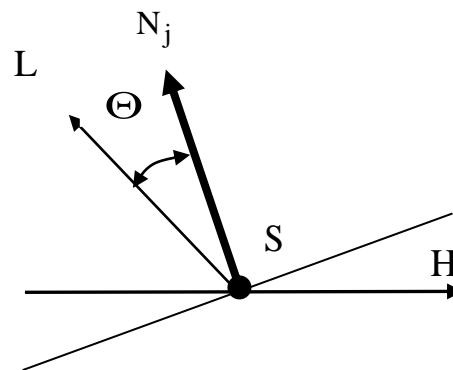


Рисунок 1.6 – Схематичне представлення процесу відбиття для моделі Ламберта

В алгоритмі тривимірної реконструкції, який базується на ламбертівській моделі відбиття світла передбачено два основні етапи:

- реконструкція параметрів  $p, q$ ;
- реконструкція поверхні дефекту шляхом інтегрального накопичення (апроксимації) параметрів  $p, q$ .



В одному з існуючих методів відтворення форми дефекту використовується інформація тріади зображень [102], а в іншому методі – одного зображення [101].

#### 1.4.1. Метод тривимірної реконструкції за одним 2D зображенням на платформі ламбертівської моделі відбиття світла

Щоб зменшити технологічні витрати на створення ІТ тривимірної реконструкції з усуненням зони загороджених пікселів доцільно розглянути можливості проведення реконструкції за ламбертівською моделлю відбиття за одним зображенням. Цей метод тривимірної реконструкції при значенні для реконструкції поверхонь дефектів таких як пітинги. Використовуючи для освітлювання пітинга джерело світла з такими параметрами, що  $L = (0, \cos \varphi, \sin \varphi)$ , отримаємо інтенсивність відбиття поверхні

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{\sin \varphi - q \cos \varphi}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}. \quad (1.10)$$

Для визначення дифузного коефіцієнта використаємо точку максимальної глибини пітинга  $z(x_0, y_0)$  в якій має місце

$$q(x_0, y_0) = p(x_0, y_0) = 0. \quad (1.11)$$

В цьому випадку вираз (1.8) можна представити у такій формі

$$t = I_{p\lambda} k_d = \frac{I_{\lambda 0} - I_a}{\sin \varphi}, \quad (1.12)$$

де  $I_{\lambda 0} = I_{\lambda}(x_0, y_0)$ . На обробленому низькочастотним фільтром у горизонтальному напрямку сегменті зображення, з якого виділено вертикальний переріз пітингу, діє спрощувальне припущення, що  $p=0$ . Реконструкцію вертикальної похідної  $q$  одержуємо з розв'язку квадратичного рівняння

$$aq^2 + bq + c = 0, \quad (1.13)$$

де  $a = \operatorname{ctg}^2 \varphi - \xi$ ;  $b = -2 \operatorname{ctg} \varphi$ ;  $c = 1 - \xi$ . Величина параметра  $\xi = 1 / (I_\lambda - I_a)$  шляхом алгебраїчних перетворень слідує з рівняння (1.10). В результаті таких розрахунків на першому етапі реконструкції отримано масив оцінок вертикальної похідної в вертикальному перерізі пітинга. На другому етапі реконструкції накопиченням реконструйованих значень вертикальної похідної  $q$ , починаючи від точки, яка розміщена на початку пітинга (де апріорі задане значення глибини  $z_e = 0$ ), було реконструйовано масив оцінок глибини пітинга.

При реконструкції в центральній частині пітинга отримується його вертикальний переріз, що дозволяє оцінити максимальну глибину пітинга.

На основі описаних методів та визначення інформації про інтенсивність фонового освітлення, освітлення в його центрі та освітлення точок вертикального перерізу, з врахуванням стабільності його характеристик в перпендикулярному до площини перерізу напрямку, отримано оцінку вертикальної похідної вектора нормалі. Ця інформація дозволяє описати тривимірну будову перерізу пітинга. Оцінка глибини перерізу пітинга знаходиться інтегральним накопиченням вертикальної похідної вектора нормалі пітинга починаючи від одного з країв.

Практична цінність цієї методики [101] полягає в тому, що наведений метод, в перспективі, можна технологічно-програмно реалізувати в рамках стандартної системи обробки інформації металографічних зображень, що дозволить отримувати додаткову інформацію про матеріали які досліджуються, в даному випадку, про пітинги на поверхні матеріалу.

До недоліків цього методу можна віднести відсутність технічної діагностики практичних результатів реконструкції, що не дозволяє спеціалістам повністю оцінити його ефективність. Встановлено, що в цьому методі тривимірній реконструкції вузол освітлення та вузол контролю напрямку освітлення фотозйомки зображення не розроблено. Тому постає важливе науково-практичне завдання Важливо практично реалізувати цей метод у вигляді інформаційної технології тривимірної реконструкції пітингів, та інших металографічних дефектів в сучасних системах обробки зображень, що буде зроблено в дисертації.

#### 1.4.2. Метод тривимірної реконструкції за серією 2D зображень на платформі ламбертівської моделі відбиття світла

У роботі [ 102] розглянута задача тривимірної реконструкції поверхні матеріалу за тріадою її зображень, отриманих із спеціально узгодженими положеннями джерела світла за кутом. Реконструкція проводиться в рамках дифузної моделі відбиття.

На основі описаних методів визначення інформації про інтенсивність відбиття, для випадку функціональної залежності від кута освітлення джерела світла (інші параметри приймача системи обробки є фіксованими), отримано оцінки похідних векторів нормалі. Для цього визначається тріада зображень інтенсивності відбиття. Зображення зразка із тріщиною штучно згенеровані за допомогою комп'ютера. Представлено програмну реалізацію даного методу у вигляді наступної віртуальної системи обробки зображень, що має такі характеристики. Базове зображення отримується з вертикальним розташуванням джерела світла  $L_0 = (0,0,1)$ . Визначення інших двох інтенсивностей відбиття

виконується, з джерелом світла, що забезпечує  $L_1 = \left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ ,

$L_2 = \left( 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ . При такому освітленні за виразами (1.8), (1.9) штучно

сформована серія зображень  $I_{\lambda m} = I_{\lambda}(L_m)$ , таких, що

$$I_{\lambda 0} = I_a + I_{p\lambda} k_d \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (1.14)$$

$$I_{\lambda 1} = I_a + \frac{1}{\sqrt{2}} I_{p\lambda} k_d \frac{1-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (1.15)$$

$$I_{\lambda 2} = I_a + \frac{1}{\sqrt{2}} I_{p\lambda} k_d \frac{1-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}. \quad (1.16)$$

В результаті отримано систему трьох рівнянь з чотирма невідомими  $p$ ,  $q$ ,  $I_{p\lambda} k_d$ , інтенсивністю фону  $I_a$  і трьома оцінками  $I_{\lambda 0}$ ,  $I_{\lambda 1}$ ,  $I_{\lambda 2}$ , які, за умовами

реконструкції, теж відомі. Для того, щоб знайти похідні вектора нормалі  $p$ ,  $q$  з системи рівнянь (1.14) - (1.16) необхідно визначити інтенсивність фону  $I_a$ .

Для експериментального визначення інтенсивності фону використовується інформація з двох зображень, одне з яких отримується в результаті тимчасового штучного затінення зразка. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а, відповідно, і положення тіні, визначається системою. Порівняння базового зображення без тіні та зображення із штучним затіненням дозволяє експериментально визначити інтенсивність фону  $I_a$ .

При штучному визначенні  $I_\lambda(L_m)$ , з джерелом світла  $L_m$  ( $m=0,1,2$ ), слід звернути увагу на ту обставину, що фонові засвітка набагато менша за другу складову в  $I_{\lambda 0}$ ,  $I_{\lambda 1}$ ,  $I_{\lambda 2}$ . Для спрощення, доцільно, на стадії комп'ютерного моделювання, вважати інтенсивність фону відомою і покласти

$$I_a = 0. \quad (1.17)$$

За виконання умови (1.17) із системи (1.14)-(1.16) проведемо визначення оцінок похідних

$$p = 1 - \sqrt{2} \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 0}}, \quad (1.18)$$

$$q = 1 - \sqrt{2} \frac{I_{\lambda 2}}{I_{\lambda 0}}. \quad (1.19)$$

Отримані вирази відповідають проведенню першого етапу 3D реконструкції зразка. Для проведення остаточної 3D реконструкції на основі отриманих похідних в якості дослідного зразка обрано тріщину

Тестова модель тріщини  $Z_{ik}$  використовувалися для комп'ютерного генерування штучних зображень  $I_\lambda(L_m)$  (1.14)-(1.16).

Процедура формування штучних зображень на базі моделі тріщини містить наступні операції:

1. На основі  $z_{ik}$ , де  $i=1, \dots, I$ ,  $k=1, \dots, K$  в кожній точці  $i_k$ , визначаються масиви похідних  $p_{ik,\gamma}$  (1.9),  $q_{ik,\gamma}$  (1.9).

2. Результати розрахунків п. 1 використовуються для формування серії штучних зображень тестової моделі тріщини

$$I_{\lambda}(L_m) = I_{\lambda}(L_m, p, q), \quad (1.20)$$

де  $m=0,1,2$  за співвідношеннями (1.14)-(1.16) Для розрахунку фотосигналів  $I_{\lambda}(L_m)$  додатково прийнято умову (1.17) і  $I_{p\lambda} k_d = 250$ .

3. Результати розрахунків п. 2 зображення  $I_{\lambda}(L_m)$  квантуються у діапазоні значень  $[0,255]$ .

Процедура реконструкції глибини поверхні пластини з тріщиною містить наступні операції:

1 За виразом (1.18), у кожній точці  $ik$ , визначається похідна  $p_{ik,\gamma}$ .

2. За виразом (1.19), у кожній точці  $ik$ , визначається похідна  $q_{ik,\gamma}$ .

3. Інтерактивно вибирається опорна точка  $z_{ll,r}$  така, що виконується

$$z_{ll,r} = 0. \quad (1.21)$$

4. На основі одномірного масиву похідних  $q_{lmr}$ , де  $m = 1, \dots, K$  (п.2), за накопиченнями

$$z_{lkr} \approx \Delta y \sum_{m=1}^{k-1} q_{lmr} \quad (1.22)$$

визначається одномірний масив глибин  $z_{lkr}$ ,  $k = 1, \dots, K$ . Зауважимо, що крок  $\Delta y$  є апріорно заданий.

5. На основі одномірного масиву глибин  $z_{lkr}$ ,  $k = 1, \dots, K$  (п.4) та двохмірного масиву похідних  $p_{ikr}$ , де  $i = 1, \dots, I$ ,  $k = 1, \dots, K$  (п.1), за накопиченнями

$$z_{ikr} \approx z_{lkr} + \Delta x \sum_{n=1}^{i-1} p_{nkr}, \quad (1.23)$$

де  $i = 1, \dots, I$ ,  $k = 1, \dots, K$ ; визначається двомірний масив глибин  $z_{ikr}$ . Зауважимо, що крок  $\Delta x$  також є апріорно заданий.

Таким чином на основі синтезованих зображень  $I_{\lambda m}$  було реконструйовано масив глибин площини з тріщиною  $Z$  і визначено її абсолютну похибку  $\Delta z_{\max} = 2 \cdot 10^{-4}$  і відносну похибку розрахунку глибини тріщини  $\delta z_{\max} = 4 \cdot 10^{-4}$

Це перспективно і для металографічних досліджень і для неруйнівного контролю поверхонь конструкцій. Така точність роботи алгоритму

тривимірної реконструкції надихає зробити наступні кроки технологічній реалізації цієї ІТ.

На цьому шляху є певні перешкоди. Слід очікувати, що похибки значно збільшаться коли при проведенні оцінки точності методу будуть враховані похибки індукційовані відхиленням напрямку освітлення від технологічно запланованих значень, та похибка, обумовлена відхиленням фону від дійсного значення. В представленій ІТ тривимірної реконструкції немає перешкод, які впливають на точність в алгоритмі реконструкції. Але при технічній реалізації установка такої ІТ вимагає оснащення тріадою ідентичних джерел світла, або джерелом, яке має три змінні положення під час фотозйомки.

До недоліків відомого методу [102] можна віднести відсутність практичних результатів реконструкції, що не дозволяє повністю оцінити його ефективність. Важливо практично реалізувати такий метод у вигляді інформаційної технології тривимірної реконструкції пітингів, тріщин та інших металографічних дефектів в сучасних системах обробки зображень, що буде зроблено в дисертації.

Ще один результат, який наведено у роботі [102], і який заслуговує на увагу лежить у площині прогнозу дефектостійкості. В представленій роботі [102] в якості досліджуваного об'єкта реконструкції по зображеннях було обрано поверхневу тріщину. Для цього запроваджена аналітична модель тріщини

$$z(x, y) = \begin{cases} -z_{\max} + \begin{cases} -P, & (-x_s + x_v) \leq x \leq x_v; \\ P, & (x_s + x_v) \geq x > x_v; \end{cases} \\ 0, & (x_s + x_v) < x, (-x_s + x_v) > x, \end{cases} \quad (1.24)$$

де  $z_{\max}$  – довжина тріщини, яка представляє собою максимальну відстань від краю до дна тріщини;  $(-x_s + x_v)$ ,  $(x_s + x_v)$  – крайні точки тріщини,  $x_v = \eta y + b$  –

зміщення тріщини;  $P = kx + k\eta y + kb$  – площа, яка визначається похідними  $p=q$ ,  $q=k\eta$ . Видно, що у розкритті це тріщина з V подібним профілем. В процесі реконструкції, яка проведена у роботі [102] сфокусована увага на параметрах, які є важливі для прогнозу тріщиностійкості. Розглянуто випадок коли тріщина розміщена на поверхні досліджуваної пластини, яку розтягнуто в випробувальній машині нормальним до ходу тріщини навантаженням  $\sigma$ . В цьому випадку поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K$  (1.7). За рахунок неточності 3D реконструкції виникає відносна похибка визначення коефіцієнта інтенсивності напружень

$$\delta K = \frac{\delta z_V}{2} \cdot \quad (1.25)$$

З виразу (1.25) видно, що точність прогнозу тріщиностійкості визначається відносною похибкою розрахунку довжини тріщини

$$\delta z_V = \frac{\Delta z_{\max}}{z_{\max}}, \quad (1.26)$$

де  $\Delta z_{\max}$  – абсолютна похибка реконструкції довжини  $z_{\max}$ .

### **1.4.3. Оцінка похибки визначення глибини тріщини в методі 3D реконструкції за її 2D зображенням в залежності від напрямку освітлення**

Підрозділ присвячений презентації результатів проведеної оцінки похибок: вимірювання глибини при використанні 3D реконструкції за 2D зображенням [129] і зокрема металографічних зображень тріщин. Результати досліджень подані на основі роботи [123].

Проведемо оцінку похибки визначення глибини тріщини при її реконструкції на основі 2D зображення в залежності від напрямку освітлення поверхні.

Для обчислення дифузного коефіцієнта та інтенсивності фону  $I_a$  використовуються елементи інформаційної технології 3D реконструкції за 2D

зображенням описані у [123]. Для класу вертикально розташованих тріщин зважаючи на повільно змінність параметрів тріщини, виконується умова  $q = q(x, y) = 0$ . Враховуючи наведену умову, а також параметри фону  $I_a$  і  $l = I_{p\lambda} k_d$ , та що у СОЗ напрям джерела світла  $L_E = (0, 0, 1)$ , з рівняння (1.8) отримуємо реконструкцію у такій формі

$$|p| = \sqrt{\xi^2 - 1},$$

де коефіцієнт  $\xi$  визначається наступним чином

$$\xi = \frac{l}{I_\lambda - I_a}. \quad (1.27)$$

Оцінка глибини тріщини знаходиться шляхом інтегрального накопичення значень модуля горизонтальної похідної  $|p|$  починаючи від одного з країв тріщини. Оцінимо вплив на модуль горизонтальної похідної  $|p|$  неточності фіксації напрямку на джерело світла  $L_E$ .

Для опису вектора  $L$  скористаємось одиничною сферою  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , з центром у досліджуваній точці  $O$ . Досліджувана точка розміщена у центрі координат. Для поверхні  $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$  можна визначити похідну  $P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg}\theta$ ,

де  $\theta$  – кут напрямку світла в площині  $XOZ$ , а також похідну  $Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg}\varphi$ , де

$\varphi$  – кут напрямку світла в площині  $YOZ$ . На цій основі вектор  $L$  набуває форми

$$L = \left( \frac{-P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}} \right). \quad (1.28)$$

З виразу (1.28) випливає, що в загальному випадку маємо функцію двозмінних  $L = L(P, Q)$ . В ідеальному випадку  $L_E = L(0, 0)$ . Використовуючи параметри  $P$  та  $Q$  оцінимо вплив на модуль горизонтальної похідної  $|p|$  неточності фіксації напрямку на джерело світла, коли замість  $L_E$  використовується напрям на джерело світла  $L = (P, Q)$ .



Щоб провести аналіз впливу умов освітлення на якість реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини, який формується спільно параметрами  $P$  та  $Q$  використовуємо ряд Маклорена. Можна показати, що шляхом алгебраїчних перетворень з виразу (1.8) отримується квадратичне рівняння корні якого є функцією  $p_{1,2} = f(P, Q)$  від двох незалежних змінних. Розклад функції  $f(P, Q)$  в ряд Маклорена [108] є таким

$$f(P, Q) = f(0, 0) + P \left\{ \frac{\partial}{\partial P} f(P, Q) \right\}_{P=0, Q=0} + Q \left\{ \frac{\partial}{\partial Q} f(P, Q) \right\}_{P=0, Q=0} + \frac{P^2}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial P^2} f(P, Q) \right\}_{P=0, Q=0} + \frac{PQ}{2!} \left\{ \frac{\partial}{\partial P} \frac{\partial}{\partial Q} f(P, Q) \right\}_{P=0, Q=0} + \frac{Q^2}{2!} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial Q^2} f(P, Q) \right\}_{P=0, Q=0} + \dots \quad (1.29)$$

Підставляючи значення модуля горизонтальної похідної  $|p| = |p|(0, 0)$ , похідної  $p'_{1,2}(0) = \xi^2$  (диференціювання  $f(0, Q)$  по параметру  $Q$ ), похідних (диференціювання  $f(P, 0)$  по параметру  $P$ )

$$|p|'(0) = 0, \quad |p|''(0) = -\frac{\xi^2}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \quad (1.30)$$

у вираз (1.29) та нехтуючи в виразі (1.29) малозначущими членами отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з застосуванням позначення  $p(P, Q) = f(P, Q)$ , у такому вигляді

$$p(P, Q) = |p| + P\xi^2 - \frac{Q^2\xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}.$$

Виходячи з отриманого виразу, визначимо загальну оцінку якості реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини

$$\Delta|p| = p(P, Q) - |p| = P\xi^2 - \frac{Q^2\xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}, \quad (1.31)$$

де перший член це абсолютна похибка  $\Delta P$ , а другий член абсолютна похибка  $\Delta Q$ . Використовуючи абсолютну похибку реконструкції модуля горизонтальної похідної тріщини у формі (1.31) визначимо оцінку якості реконструкції глибини

тріщини  $\Delta z_V$ . Ця оцінка знаходиться інтегральним накопиченням абсолютної похибки  $\Delta|p|$  при  $\xi = \xi(x, y_e)$ , починаючи від одного з країв тріщини  $z_e(x_e, y_e)$  до точки максимальної глибини тріщини  $z(x_V, y_e)$

$$\Delta z_V = P \int_{x_e}^{x_V} \xi^2(x, y_e) dx - \frac{Q^2}{2} \int_{x_e}^{x_V} \frac{\xi^2(x, y_e)}{\sqrt{\xi^2(x, y_e) - 1}} dx, \quad (1.32)$$

де  $\xi = \xi(I_\lambda(x, y))$  обчислюється з виразу (1.27). зображення  $I_\lambda$  можна отримати штучно, змодельовавши процес відбиття від поверхні. Для цього скористаємось аналітичною моделлю сегмента вертикальної тріщини (2.63) (1.24), де використане підставлення  $x_e = -x_s$ , а також має місце  $q=0$ ,  $x_V = 0$ ,  $p = p(x, y) = -k$ , де  $x \in [x_e, x_V]$ ,  $y \in [y_s, y_A]$ . В цьому випадку відповідна аналітична модель сегмента зображення вертикальної тріщини, визначена виразом (1.8), має вигляд

$$I_\lambda(x, y) = I_a + \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}}, \quad (1.33)$$

де  $x \in [x_e, x_V]$ ,  $y \in [y_s, y_A]$ . З виразу (1.33) випливає, що параметр  $\xi$  має такий вигляд

$$\xi = \sqrt{k^2 + 1}. \quad (1.34)$$

Підставивши вираз (1.34) в формулу (1.32) та виконуючи операцію інтегрування, остаточно отримуємо оцінку абсолютної похибки визначення глибини тріщини

$$\Delta z_V = (x_V - x_e)(k + k^{-1}) \left[ Pk - \frac{Q^2}{2} \right]. \quad (1.35)$$

Відносна похибка  $\delta z_V$  визначення глибини тріщини складає

$$\delta z_V = \frac{\Delta z_V}{z_{\max}} = \frac{\Delta z_V}{k(x_V - x_e)} = \delta z_{VP} + \delta z_{VQ}, \quad (1.36)$$

де  $\delta z_{VP} = (1 + k^{-2})Pk$ ;  $\delta z_{VQ} = -(1 + k^{-2})\frac{Q^2}{2}$ .

З виразу (1.36) видно, що за рахунок  $k^{-2}$  погіршується точність визначення глибини тріщини. Такий режим реконструкції потребує застосування в СОЗ фіксації напрямку освітлення з підвищеною точністю.

Запропоновані рекомендації по оцінці відносної похибки визначення глибини тріщини з заданою точністю і зроблена її кількісна оцінка.

Позитивним в представленому аналізі точності є основна ідея, яка полягає у розкладу реконструкційного параметра по параметрам від яких він залежить в ряд Тейлора і на цій основі проведення оцінки точності. До недоліків представленого аналізу точності можна віднести наступне. Проведений аналіз є вузько специфічним по таким характеристикам, як запланований напрям джерела світла  $L_E = (0, 0, 1)$ , об'єкт дослідження аналітична модель вертикальної тріщини. Специфіка аналізу не дозволяє використати наведені результати для аналізу точності реконструкції пітинга.

## 1.5. Висновки

На основі проведеного аналізу і порівняльного аналізу існуючих методів тривимірної реконструкції зображень зроблено такі висновки:

1. Встановлено, що в тривимірній реконструкції за стереозображенням під час фотозйомки з високою імовірністю виникає ефект загороджених пікселів на одному з зображень стереопари. Для випадку значного затінення це призводить до повного блокування реконструкції на затіненій ділянці зображення. Усунути цей артефакт спроможні технічно-програмні модифікації тривимірної реконструкції за стереозображенням, які використовують для реконструкції більшу ніж два кількість зображень. Але зростання кількості погоджень зображень призводить до зростання часу реконструкції порівняно з часом реконструкції за стереозображенням.

2. Встановлено, що алгоритми SFS і фотометричний стереоскопічний метод не працюють, коли точки поверхні об'єкта дослідження мають змінний дифузний коефіцієнт.

3. При огляді методів тривимірної реконструкції на основі ламбертівської моделі відбиття світла встановлено, що реконструкція за тріадою зображень не має технічної реалізації, а реконструкція за одним зображенням має обмежену програмну реалізацію, для перерізу поверхневого пітинга, що викликає зниження якості неруйнівного контролю конструкції, ураженої пітингом. Техніка освітлення фотозйомки не представлена. За станом контролю напрямку освітлення ці реконструкції непридатні для роботи в польових умовах і в умовах оптичної мікроскопії. Сучасний стан речей вимагає розробки нових методів, алгоритмів та програм технічно працездатної тривимірної реконструкції на основі ламбертівської моделі відбиття світла, яка долає артефакт загороджених пікселів та ефект змінності дифузного коефіцієнта.

## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВІДТВОРЕННЯ ФОРМИ ДЕФЕКТУ ЗА МЕТАЛОГРАФІЧНИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ НА ПЛАТФОРМІ ЛАМБЕРТІВСЬКОЇ МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ СВІТЛА**

Розділ присвячений розробленню нових методів тривимірної реконструкції форми поверхневих дефектів матеріалу за одним, двома та трьома зображеннями отриманими на платформі ламбертівської моделі відбиття світла. Практична необхідність застосування таких методів реконструкції виникає, тоді коли на одному з зображень стереопари є значна, за розмірами зона загороджених пікселів, які блокують алгоритм тривимірної реконструкції за стереозображенням. Основний акцент розробки у таких методах доцільно зробити на вузлах автоматизації та контролю напрямку освітлення досліджуваної поверхні.

#### **2.1. Розробка методу тривимірної реконструкції форми поверхні по трьох 2D зображеннях на платформі ламбертівській моделі відбиття світла**

Альтернативна проблемно-орієнтована тривимірна реконструкція локальних пошкоджень поверхонь металів на металографічних зображеннях охоплює комплекс взаємозалежних, наукових, технологічних та метрологічних дисциплін, як в сфері моделей та методів відновлення форми дефектів так і в сфері методів оцінки похибок визначення глибини пітингів та метрологічного тестування вузлів системи 3D реконструкції. Тому для ефективної організації реконструкції доцільно використовувати інформаційну технологію. Інформаційна технологія повинна починатися зі створення математичного забезпечення ефективних методів 3D реконструкції, формування інформаційних потоків у системі підготовки апаратури для реалізації проблемно-орієнтованих методів 3D реконструкції та підготовки (навчання) спеціалістів, які отримують інформацію на цій апаратурі. Від металографістів необхідно отримати

інформацію, які тривимірні параметри дефектів є критичними при визначенні дефектостійкості елемента конструкції, а від розробників інформаційних технологій тривимірної реконструкції дефектів за зображеннями необхідно отримати методи та апаратуру, методики її перевірки, що забезпечують отримання метрологічно достовірної тривимірної інформації.

Одним з методів отримання тривимірної форми дефекту на основі аналізу його зображень є запропонований в роботі [102] метод 3D реконструкції за тріадою зображень, отриманих зі змінним положенням джерела світла. Метод оснований на ламбертівській моделі відбиття світла від поверхні конструкції. Для фотозйомки зображень використовуються три напрямки освітлення – вертикальний та два бокові. Значення кожного напрямку освітлення кількісно задане і є незмінним для цього типу реконструкції. Таким чином для цього методу реконструкції не було проведено дослідження її ефективності в залежності від встановлення інших значень напрямків освітлення.

В даному підрозділі продовжується розвиток проблемно – орієнтованої 3D реконструкції спираючись на цей метод [102]

Головна відмінність запропонованого в дисертації нового методу є створення 3D реконструкції за тріадою зображень, де кожне зображення тріади отримане для довільного напрямку освітлення досліджуваної поверхні. Тобто постає необхідність, щоб новий метод відновлення форми дефекту був інваріантний до напрямку освітлення.

В рамках поставленої мети на основі тривимірної реконструкції за тріадою зображень будуть вирішені дві наступні задачі.

Задача 1. 3D реконструкція в якій кожний напрямок освітлення має технологічно задане значення і є незмінним при реконструкції для всіх з серії зображень поверхні. Технологічно передбачена можливість зміни заданого значення напрямку освітлення в залежності від специфіки.

Задача 2. 3D реконструкція, широкодіапазонна по встановленню напрямків освітлення. Перед проведенням фотозйомки значення кожного напрямку

освітлення встановлюється довільно та вимірюється перед проведенням фотозйомки і ця інформація потрапляє в програму реконструкції.

Розглянемо ілюмінаційну модель зображення (1.8) з контрольованим кутом освітлення та визначимо її параметри  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$  та  $I_a$  з тріади зображень. Щоб усунути залежність від параметра  $I_a$  експериментально визначимо його, тимчасово, штучно, затінюючи зразок з дефектом. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже і положення тіні, визначає система обробки. Використовуючи базове зображення  $I_\lambda$  зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону  $I_a$  і звести модель (1.8) до трьох невідомих. Забезпечивши у системі джерело світла з такими параметрами, що  $L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0})$ ,  $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ ,  $L_2 = (L_{x2}, L_{y2}, L_{z2})$ , отримаємо інтенсивність відбиття  $dsl$  поверхні у вигляді системи трьох рівнянь

$$\begin{aligned} I_{\lambda 0} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x0} N_x + L_{y0} N_y + L_{z0} N_z), \\ I_{\lambda 1} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x1} N_x + L_{y1} N_y + L_{z1} N_z), \\ I_{\lambda 2} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x2} N_x + L_{y2} N_y + L_{z2} N_z), \end{aligned} \quad (2.1)$$

в якій невідомі компоненти вектора нормалі  $N$ . Кожна компонента вектора нормалі  $N$  залежать від похідних  $p$ ,  $q$ , а отже система (2.1) залежать від них. Отриману систему трьох рівнянь з трьома невідомими  $k_d$ ,  $p$ ,  $q$  шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо у таку:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

де

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_{\lambda 1} - I_a) L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{x1}, & A_{22} &= (I_{\lambda 2} - I_a) L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{y2}, \\ A_{12} &= (I_{\lambda 1} - I_a) L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{y1}, & B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a) L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{z1}, \\ A_{21} &= (I_{\lambda 2} - I_a) L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{x2}, & B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a) L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{z2}. \end{aligned}$$

Видно, що кожне зображення тріади отримане з індивідуальним напрямком освітлення поверхні з дефектом. Кожний напрямок освітлення є параметром розробленої ІТ реконструкції. Видно, що реконструкція (2.2) реалізується, якщо

відомі параметри  $L_0$ ,  $L_1$  і  $L_2$ . Перед фотозйомкою необхідно і достатньо знайти ці параметри. Буде розглянуто два варіанти реконструкції, відмінних по методиці визначення параметрів  $L_0$ ,  $L_1$  і  $L_2$ . В першому варіанті реконструкції (задача 1) потрібно встановити технологічно заплановане значення кожного з трьох напрямків освітлення. В другому варіанті реконструкції (задача 2) потрібно визначити ці параметри шляхом вимірювання. Тоді за одержаними виразами можна реконструювати похідні  $p$ ,  $q$ , що програмно реалізується засобами МАТЛАБ [111, 112].

Акцент наступного дослідження буде зосереджений на здобутті метрологічно-достовірної тривимірної інформації шляхом розробки технологічно та метрологічно ефективних вузлів встановлення напрямку освітлення фотозйомки та вузлів контролю напрямку освітлення.

Параметри реконструкції  $L_0$ ,  $L_1$  і  $L_2$  залежно від типу реконструкції визначаються наступним чином.

В першому варіанті тривимірної реконструкції кожний напрямок освітлення має незмінне значення. Тому кожне зображення тріади отримане для технологічно заданого напрямку освітлення.

В другому варіанті тривимірної реконструкції напрямок освітлення вимірюється перед проведенням фотозйомки. Жорстка умова незмінності значення напрямку освітлення знята. Визначене значення напрямку освітлення поступає у розроблене програмне забезпечення. Програма проводить реконструкцію з напрямками освітлення, які не мають технологічно заданої обмеженості.

Розглянемо реалізацію першого варіанту реконструкції.

### **2.1.1. Метод тривимірної реконструкції за тріадою зображень з технологічно запланованими напрямками освітлення**

В процесі тривимірної реконструкції за виразом (2.2) відбудеться спрощення алгоритму, встановленням оптимальних значень напрямків освітлення. Окрім того розробка метрологічних вузлів, для контролю відхилення кожного напрямку



освітлення від оптимального значення, дозволить конструктивно зменшити їх відхилення до необхідного рівня і покращити точність 3D реконструкції.

### 2.1.1.1. Алгоритм 3D реконструкції за тріадою зображень з технологічно заданими напрямками світла

Перед програмною реалізацією доцільно спростити вираз (2.2) встановленням оптимальних значень напрямків освітлення. Приймаємо, що елемент матриці  $A_{21} = 0$ . З чого випливає рівність нулю  $L_{x0}$  і  $L_{x2}$ . Крім того, умова  $A_{12} = 0$  можлива лише, якщо  $L_{y0} = L_{y1} = 0$ . З врахуванням сказаного джерело світла матиме такі параметрами  $L_0 = (0, 0, 1)$ ,  $L_1 = (L_{x1e}, 0, L_{z1e})$ ,  $L_2 = (0, L_{y2e}, L_{z2e})$ . Представимо координати джерела світла (рис.2. 1) у наступному вигляді

$$L_0 = (0, 0, 1), \quad L_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta), \quad L_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi).$$

Внаслідок цього, вираз (2.2) набуває вигляду

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

З рис. 2.1. видно, що ці джерела світла  $L_{S0}, L_{S1}, L_{S2}$  є розташовані в двох ортогональних площинах та осі z. Приймаємо, що джерела світла є однаковими за інтенсивністю. Тоді коефіцієнти у виразі (2.2) приймають наступний вигляд

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\theta; \\ A_{22} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\phi; \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\theta; \\ B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\phi. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Якщо підставити вирази (2.4) в (2.2) то отримуємо реконструкцію похідних p, q у такому вигляді

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1}{L_{x1e}} = \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos\theta}, \quad (2.5)$$

$$\text{де } \eta_1 = \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}$$

$$q = \frac{L_{z2e}}{L_{y2e}} - \frac{\eta_2}{L_{y2e}} = \operatorname{tg} \phi - \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos \phi}, \quad (2.6)$$

$$\text{де } \eta_2 = \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}.$$

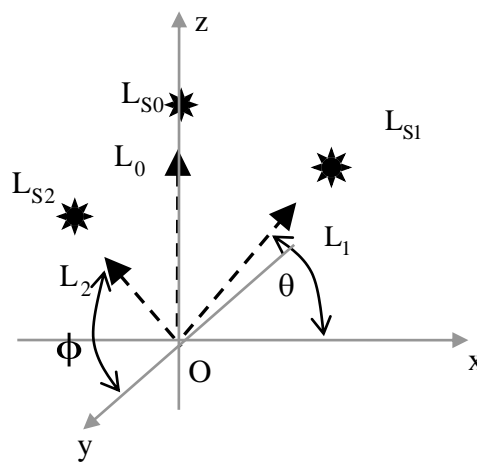


Рисунок 2.1 – Геометрична інтерпретація локалізації джерела світла в тривимірному просторі відносно точки O поверхні

Оскільки напрямки освітлення  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  є технологічно заплановані, то на основі їх компонент виконується реконструкція (2.3) і (2.5), (2.6). Системи освітлення представлена на рис. 2.1. має такі недоліки

- велика кількість джерел світла;
- великі габарити, обумовлені застосуванням точкових джерел світла ;
- відсутність засобів контролю кутів освітлення;
- відсутність засобів встановлення технологічно запланованих кутів освітлення.

При моніторингу технічного стану об'єктів ці недоліки необхідно усунути.

### 2.1.1.2. Вдосконалення техніки системи освітлення фотозйомки на основі механічно-оптичних інструментів встановлення напрямку світла

Щоб усунути перший недолік системи освітлення (2.1) і скоротити кількість джерел світла розглянемо новий варіант системи освітлення

представлений на рис. 2.2. Приймаємо, що джерело світла  $L_{S0}$  конструктивно реалізовано як пристрій вертикального променя, а джерела світла  $L_{S1}$ ,  $L_{S2}$  конструктивно реалізовано у вигляді двох пристроїв бокового променя (ПБП), кожен з яких містить вузол освітлення  $L_{S12}$  від якого пучок паралельних променів потрапляє на плоске дзеркало  $M_1$  ( $M_2$ ) і відбивається з напрямком  $L_1$  ( $L_2$ ) на поверхню дослідного зразка. Зауважимо, що вузол освітлення  $L_{S12}$  є спільний. Крім того зауважимо, що на рис. 2.2. вузол освітлення  $L_{S12}$  представлено спрощено. Більш детальний опис елементів ПБП буде представлено далі.

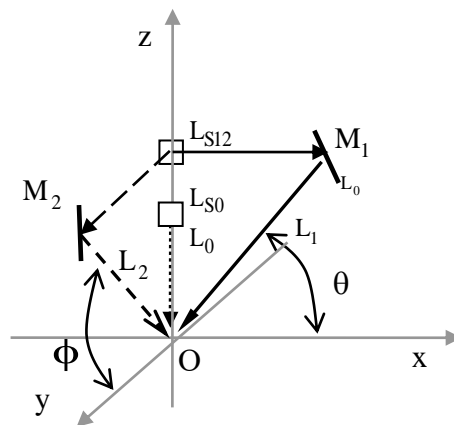


Рисунок 2.2 – Геометрична інтерпретація схеми освітлення джерелами світла ( $L_{S0}, L_{S12}$ ) в тривимірному просторі відносно точки  $O$  поверхні

Щоб усунути наведений другий недолік і зменшити габарити системи освітлення розглянемо варіант вузла освітлення 1, представлений джерелом світла  $L_{S0}$  та двома лінзами (рис. 2.3а). Ці лінзи формують паралельний пучок променів.

Для усунення решти недоліків і з'ясування практичних аспектів застосування вузла освітлення в реалізації встановлення вертикального напрямку освітлення розглянемо варіант пристрою вертикального променя (ПВП) представлений на рис. 2.3б.

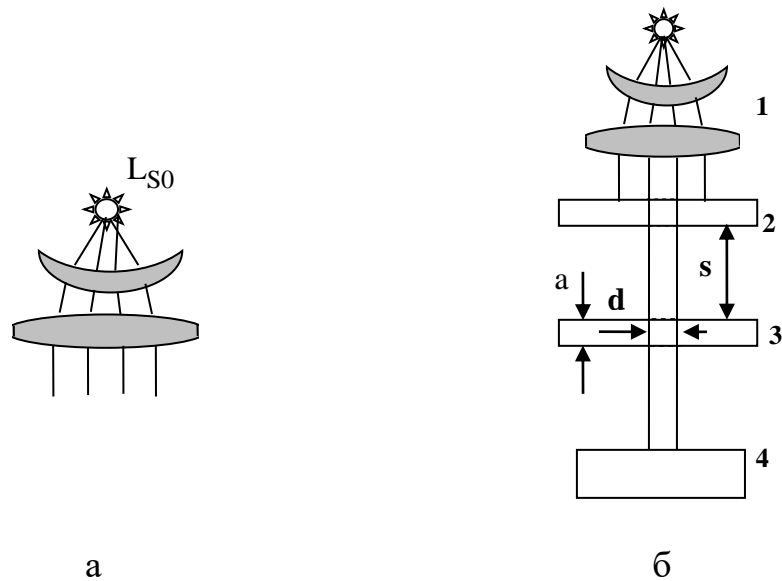


Рисунок 2.3 – Вузол освітлення (а). Пристрій вертикального променя (б)

ПВП працює в двох робочих режимах – калібровки напрямку освітлення та освітлення.

В режимі калібровки встановлюється напрям вертикального освітлення з заданою точністю, а в режимі освітлення проводиться освітлення дослідного зразка для потреб тривимірної реконструкції.

Вузол освітлення генерує паралельний пучок променів. Режим калібровки.

Для встановлення вертикального режиму освітлення вузлом освітлення 1 використовуються екрани 2 та 3. Кожний екран має отвір розміром  $d$ . Ці отвори технологічно розташовуються на прямій лінії, яка перпендикулярна до площини дослідного зразка 4.

Вузол освітлення обертом в площині  $[XZ]$  (площині  $[YZ]$ ) відносно фокуса  $f$ , в якому розміщене джерело світла  $L_{S0}$ , встановлюється таким чином, щоб промінь освітлення через отвір екрана 3 падав на дослідний зразок 4. В цьому випадку виконується умова перевірки напрямку освітлення. У площині  $[XZ]$  ця умова має вигляд

$$\Delta P \geq \frac{d}{s + 2a}, \quad (2.7)$$

а у площині  $[XZ]$

$$\Delta Q \geq \frac{d}{s + 2a}. \quad (2.8)$$

ПВП має такі технічні характеристики:

1. Абсолютна похибка  $\Delta P_0 = \pm 0,01$  визначення параметра  $P_0$ .
2. Абсолютна похибка  $\Delta Q_0 = \pm 0,01$  визначення параметра  $Q_0$ .

Основні габаритні характеристики вузла екранування:  $s=30\text{см}$ ,  $a=0,5\text{см}$ .

Габаритну характеристику (розмір отвору  $d$ ) визначимо з умов (2.7, 2.8), яка на основі наведених характеристик ПВП приймає значення  $d=3\text{ мм}$ .

Режим освітлення В цьому режимі після встановлення кута освітлення отвори екранів збільшуються, вузол освітлення генерує паралельний пучок променів, який падає на дослідний зразок 4.

Щоб усунути наведені недоліки в системі освітлення при формуванні бокового напрямку освітлення розглянемо варіант пристрою бокового променя (ПБП) схематично представлений на рис. 2.4. Зауважимо, що ПБП, який формує два напрямки освітлення  $L_1$  і  $L_2$  (рис. 2.2.), відрізняються лише початковим скеруванням променя джерела світла  $L_{S12}$ .

ПБП (рис. 2.4) має наступні конструктивні елементи: вузол освітлення (2.3), вузол формування напрямку освітлення, вузол екранування.

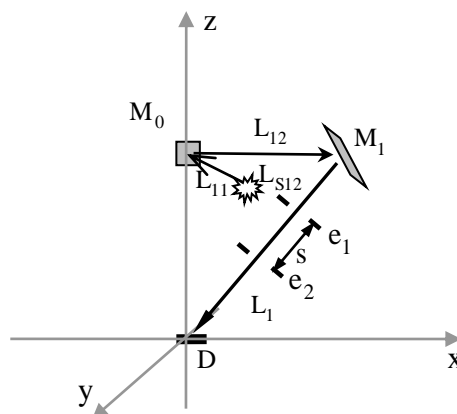


Рисунок 2.4 – Схематична дислокація елементів пристрою бокового променя

Важливим технічним завданням є наведення променя  $L_1$  на дослідний зразок через отвори екранів. Адже внаслідок первинного неточного

встановлення положення дзеркала  $M_0$  і дзеркала  $M_1$  виникають неточності відбиття, з'являється відхилення пучка промінів від запланованого значення. Вузол екранування містить два екрани: екран  $e_1$ , екран  $e_2$ .

ПБП також працює в двох: режимах (калібрування і освітлення) і має такі самі технічні і габаритні характеристики як і ПВП.

Таким чином можемо зробити висновок, що для розробленого методу тривимірної реконструкції поверхні за тріадою двовірних зображень для реалізації запропоновано систему освітлення поверхні матеріалу. В цій системі контролюється точність її роботи для випадку неконтрольованих змін вертикального та бокових напрямків освітлення фотозйомки. А також запропоновані рекомендації по встановленню експлуатаційних меж кутових відхилень вертикального та бокових напрямків освітлення від технологічно запланованого значення в перспективі практичної реалізації системи освітлення.

### **2.1.2. 3D реконструкція за тріадою зображень з дистанційним оптичним моніторингом напрямків світла**

При практичному застосуванні розробленого в попередньому параграфі методу тривимірної реконструкції було запропоновано використовувати оптичну систему вертикального та бокового освітлення досліджуваного зразка з дефектом. В цій системі необхідно постійно моніторити напрямки освітлення, оскільки вони мають визначальний вплив на точність і достовірність відтворення форми і визначення глибини поверхневих дефектів. Щоб підвищити автоматизованість та швидкість реконструкції (2.5), (2.6), для випадку коли напрямки освітлення не вимагають встановлення технологічно запланованих значень, необхідно розробити її спеціальну (нову) версію, для реалізації якої необхідно вирішити дві задачі:

- 3D реконструкція за тріадою зображень в умовах довільного розташування напрямків освітлення;
- дистанційний оптичний моніторинг напрямку освітлення.

### 2.1.2.1. Техніка дистанційного оптичного моніторингу напрямку світла

Припустимо, що у системі маємо джерело світла з параметрами  $L = (L_x, L_y, L_z)$ , які необхідно визначити [138].

Забезпечивши у системі тестовий зразок для визначення напрямку світла у вигляді тріади площин (ТП) з такими параметрами поверхні, що  $N_0 = (N_{x0}, N_{y0}, N_{z0})$ ,  $N_1 = (N_{x1}, N_{y1}, N_{z1})$ ,  $N_2 = (N_{x2}, N_{y2}, N_{z2})$ , запишемо інтенсивність відбиття поверхонь у вигляді системи трьох рівнянь

$$\begin{aligned} I_{\lambda 0} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x0} + L_y N_{y0} + L_z N_{z0}), \\ I_{\lambda 1} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x1} + L_y N_{y1} + L_z N_{z1}), \\ I_{\lambda 2} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x2} + L_y N_{y2} + L_z N_{z2}), \end{aligned} \quad (2.9)$$

в якій невідомі компоненти вектора  $L$ . Для опису вектора  $L$  скористаємось формою (1.28). Кожна компонента вектора  $L$  залежать від параметрів  $P$ ,  $Q$ , а отже система (2.9) залежать від них. Для усунення залежності моделі (2.9) від параметра  $k_d$  шляхом математичних перетворень запишемо:

$$\frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 1} - I_a} = \frac{-PN_{x0} - QN_{y0} + N_{z0}}{-PN_{x1} - QN_{y1} + N_{z1}}, \quad (2.10)$$

$$\frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 2} - I_a} = \frac{-PN_{x0} - QN_{y0} + N_{z0}}{-PN_{x2} - QN_{y2} + N_{z2}}. \quad (2.11)$$

Отриману систему двох рівнянь (2.10), (2.11) з двома невідомими  $P$ ,  $Q$  шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо у таку:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

де

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{x1}; \\ A_{12} &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{y1}; \\ A_{21} &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{x2}; \\ A_{22} &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{y2}; \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{z1}; \\ B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{z2}. \end{aligned}$$

Перед програмною реалізацією доцільно спростити вираз (2.12). Приймаємо, що елемент матриці  $A_{21} = 0$ . З цього випливає рівність нулю  $N_{x0}$  і  $N_{x2}$ . Крім того, умова  $A_{12} = 0$  можлива лише, якщо  $N_{y0} = N_{y1} = 0$ . Тоді вектори нормалі приймають наступні значення  $N_0 = (0,0,1)$ ,  $N_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta)$ ,  $N_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi)$ . Внаслідок цього, вираз (2.12) набуває вигляду

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

де коефіцієнти приймають такі ж значення як у виразі (2.4). З рис. 2.5 бачимо, що вектори  $N_1$  і  $N_2$  розташовані в двох ортогональних площинах, а  $N_0$  паралельний до осі Z. Параметри P і Q приймають наступні значення

$$P = \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a)\cos\theta}, \quad (2.14)$$

$$Q = \operatorname{tg}\phi - \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a)\cos\phi}.$$

Загалом, якщо досліджувана ТП ізотропна у тривимірному просторі, то доцільно покласти  $\theta = \phi$ . Розглянемо детальніше особливості алгоритму реконструкції параметрів P, Q. Проведемо комп'ютерне моделювання зображення тріади площин. Перехід до дискретних координат (i,k) дозволяє – штучно створити

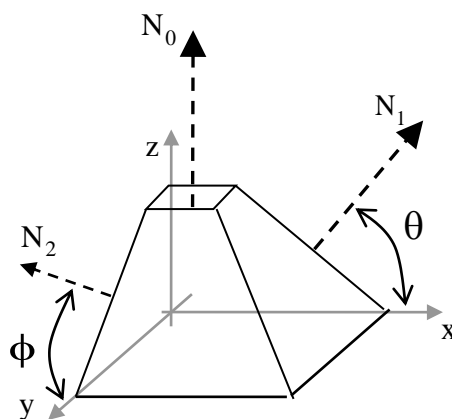


Рисунок 2.5 – Геометрична інтерпретація локалізації тріади площин з вектором нормалі до їхньої поверхні в тривимірному просторі

цифрову модель ТП у вигляді масиву  $z_{ik}$ . На основі  $z_{ik}$  визначаємо масиви похідних  $p_{ik}, q_{ik}$ . Виконання попередніх умов є підґрунтям до дискретного запису



векторів нормалі  $N_{ik} = N(p_{ik}, q_{ik})$ . На основі масиву  $N_{ik}$  визначаємо три вектори напрямків ТП  $N_j$ . На підставі  $N_{1x}$  ( $N_{2y}$ ) визначаємо кут  $\theta$  ( $\phi$ ). Для формування зображень  $I_\lambda = I_\lambda(N_{ik}, L)$  використовувався змінний напрямок освітлення  $L = L(P, Q)$ . З врахуванням дискретизації координат вектор напрямку набуває вигляду  $L_{nm} = L(P_{nm}, Q_{nm})$ , де  $P_{nm}, Q_{nm}, \forall n = \overline{1, n_x}; \forall m = \overline{1, m_y}$  – масиви визначені в апертурі  $n_x m_y$ . Виконання попередніх умов є підґрунтям до дискретного запису зображень  $I_{\lambda, nm} = I_\lambda(N_{ik}, L_{nm})$ . Зауважимо що на стадії комп'ютерного моделювання нехтуємо значенням інтенсивності фону  $I_a$ , а також додатково приймаємо, що дифузний коефіцієнт  $k_d$  є незмінним для змодельованого зразка ТП  $z_{ik}$ . На додаток зауважимо, що вплив точності встановлення векторів напрямків ТП  $N_j$ , в зображеннях  $I_{\lambda, nm}$  на реконструкцію на даному етапі не враховувався. В подальшому моделюванні будемо враховувати вплив операцій квантування.

Розглянемо реконструкцію напрямку освітлення. При виконанні попередніх умов зображення ТП  $I_{\lambda, nm}$  синтезуємо з індивідуальним кутом освітлення  $L_{nm}$ , який визначається похідними  $P_{nm}, Q_{nm}$  на сфері. З зображення  $I_{\lambda, nm}$  виділяємо три сегмента  $I_{j, nm}, j=0,1,2$ , де кожний  $j$ -й сегмент містить частину зображення окремої  $j$ -ї площини. Визначені кути  $\theta, \phi$  дозволяють за системою (2.13) реконструювати похідні  $\underline{P}_{nm}, \underline{Q}_{nm}$  вектору нормалі сфери. Для оцінки якості реконструкції напрямку освітлення визначимо абсолютні похибки

$$\begin{aligned} \Delta P_{nm} &= \underline{P}_{nm} - P_{nm}, \\ \Delta Q_{nm} &= \underline{Q}_{nm} - Q_{nm}. \end{aligned} \quad , \quad \forall n = \overline{1, n_s}, \quad \forall m = \overline{1, m_s}. \quad (2.15)$$

### 2.1.2.2. Програмна реалізація алгоритму оптичного моніторингу напрямку світла

Задамося апертурою поля  $n_x m_y$ , приймаючи, що  $n_x = m_y = 100$ . Для пара

метрів  $P$  ( $Q$ ) сформуємо поверхню, елементи якої  $P_{nm}$  ( $Q_{nm}$ ) заповнюють апертуру поля  $n_x m_y$ . Параметр  $P_{nm}$  змінювався від  $-1,225$ , до  $1,25$  з кроком  $0,025$ . Параметр  $Q_{nm}$  теж змінювався у діапазоні  $[-1,225, 1,25]$  з тим же самим кроком. Як показали результати практичних досліджень тривимірної реконструкції за тріадою зображень застосування такого діапазону є достатнє для неруйнівного контролю дефектів у випадку пітингів [106].

За виразом (1.28) розраховувався вектор напрямку  $L_{nm} = L(P_{nm}, Q_{nm})$ . Для аналізу залежності зображення  $I(P, Q)$  від параметрів  $P$ ,  $Q$  сформуємо масив зображень, елементи якого  $I_{nm}$  заповнюють апертуру поля  $n_x m_y$ . Для цього на основі масиву векторів нормалі  $N_{ik}$  та вектора напрямку  $L_{nm}$  за виразом (1.8) генерувалось зображення  $I_{nm}$ . Фотосигнал  $I_{nm}$  квантується. Для спрощення, доцільно, на стадії комп'ютерного моделювання, вважати інтенсивність фону відомою і покласти  $I_a = 0$ , а  $I_{p\lambda k_d} = 250$ . З масиву зображень  $I_{nm}$ , визначених в точках апертури  $n_x m_y$  на рис. 2.6 а представлені п'ять основних зображень. Чотири зображення розташовані в кутах апертури, а п'яте в її центрі. Ці синтезовані об'єкти та їх проміжні продукти представлені у спектрі жовтих, коричневих та чорних відтінків.

Процедура реконструкції напрямку світла, на базі зображення ТП відбувається так. З зображення ТП  $I_{nm}$  виділяються три  $j=0,1,2$  сегменти  $I_{j,nm}$  таким чином, що кожний сегмент містить інформацію про окрему частину лише однієї з трьох площин. На основі сегментів  $I_{j,nm}$  та кутів  $\theta$  і  $\phi$ , які отримані на основі векторів напрямків двох бокових площин ТП, за виразами (2.14) визначаються параметри напрямку світла  $\underline{P}_{n,m}$ ,  $\underline{Q}_{n,m}$ . Реконструйовані параметри  $\underline{P}_{n,m}$  і  $\underline{Q}_{n,m}$  представлені на рис. 2.6 а у спектрі червоних, синіх та зелених відтінків. За виразом (2.15) визначимо абсолютну похибку реконструкції  $\Delta P_{nm}, \Delta Q_{nm}$ .

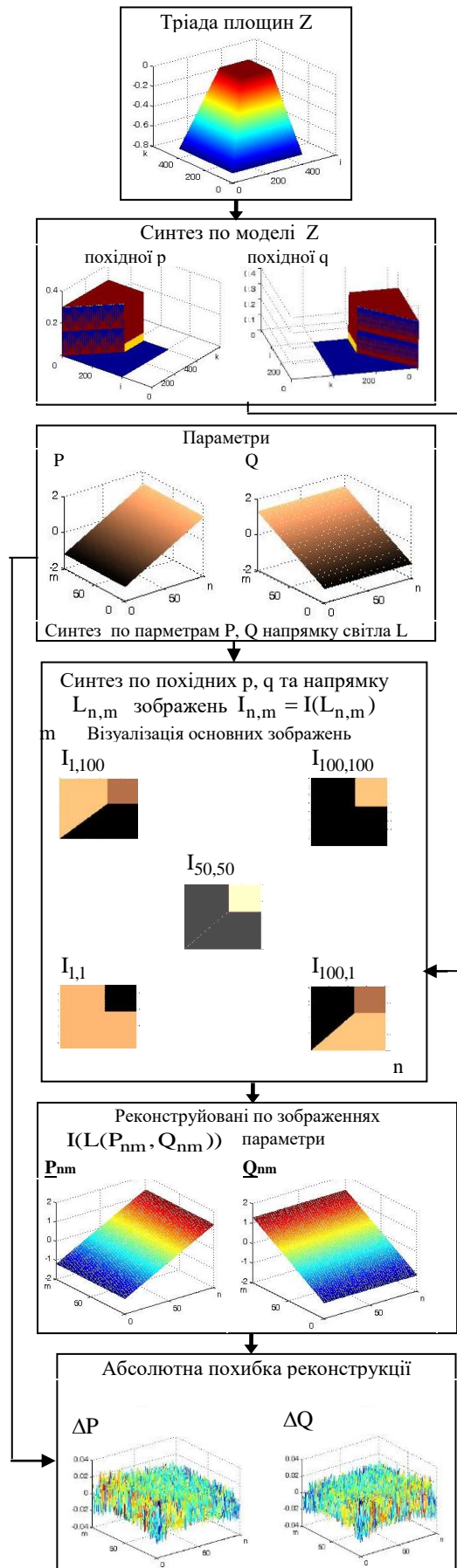


Рисунок 2.6 – Тривимірна реконструкція напрямку освітлення

Результати роботи програми по визначенню абсолютної похибки реконструкції параметрів напрямку світла  $\Delta P_{nm}, \Delta Q_{nm}$  для всіх точок апертури подані на рис. 2.6. Як бачимо, що застосувавши поворот в площині апертури відносно вертикальної осі то ці обидва розподіли подібні між собою. Крім того, видно, що обидві похибки, у першому наближенні, рівні між собою і приймають значення  $|\Delta P_{nm}| < 0,04$ ,  $|\Delta Q_{nm}| < 0,04$ . На рис. 2.7 наведено проекцію розподілу похибки  $\Delta P_{nm}$  на площину  $\Delta P_n$  з якої видно, що похибка лежить в межах

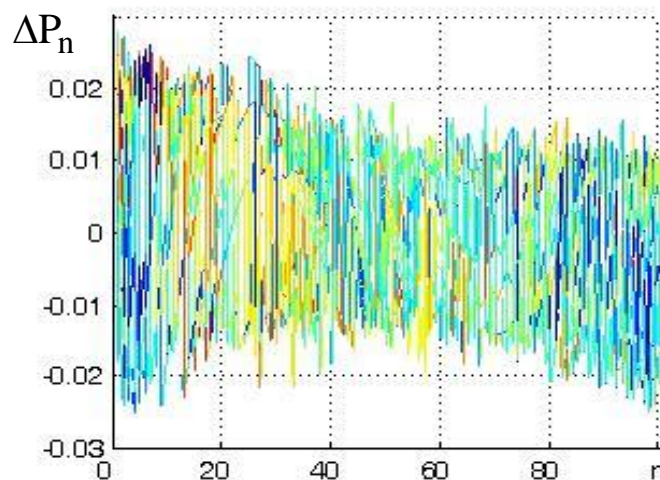


Рисунок 2.7 – Проекція розподілу похибки  $\Delta P_n$  на площину

$$-0,025 \leq \Delta P_n \leq 0,028. \quad (2.16)$$

В центрі розподілу, в околі точки  $n=50$  ( $P=0$ ) похибка приймає наступні значення

$$-0,019 \leq \Delta P_n \leq 0,018. \quad (2.17)$$

В правій частині розподілу, в околі точки  $n=100$  ( $P=1,25$ ) похибка лежить в межах

$$-0,025 \leq \Delta P_n \leq 0,018. \quad (2.18)$$

Використовуючи проекцію розподілу похибки  $\Delta Q_{nm}$  на площину  $\Delta Q_m$  було отримано що похибки  $\Delta Q_m$  (з застосуванням підставлення  $\Delta Q_m = \Delta P_n$ ) приймають такі ж значення (2.16)-(2.18). Оцінка точності (2.17) орієнтує на за

стосування основного напрямку освітлення в околі точки (50, 50), де  $(P,Q)=(0, 0)$ . Оцінка точності (2.18) для  $\Delta P_n$  та (2.17) для  $\Delta Q_m$  вказує на необхідність застосування бокового напрямку освітлення в околі точки (100, 50), де  $(P,Q)=(1, 25, 0)$ . А оцінка точності (2.17) для  $\Delta P_n$  та (2.18) для  $\Delta Q_m$  вказує на застосування другого бокового напрямку освітлення в околі точки (50, 100), де  $(P,Q)=(0, 1,25)$ .

Отримана загальна оцінка точності дозволяє застосувати представлений метод для дистанційного визначення напрямку світла в процесі тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень.

### 2.1.3. Двокроковий алгоритм підвищення точності реконструкції за тріадою зображень

Нехай досліджується пітинг. Розглянемо реконструкцію похідних  $p$  (2.5),  $q$  (2.6). Загалом, якщо досліджуваний пітинг є ізотропний у тривимірному просторі, то доцільно покласти  $\theta = \phi$ .

Розглянемо особливості алгоритму реконструкції похідних  $p, q$  залежно від кута  $\theta$  детальніше. Для підвищення точності доцільно виконувати реконструкцію з мінімально можливим значенням кута  $\theta$ . Але зі зменшенням його значення виникає загроза затінення інформації зображень  $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$ . Розглянемо заходи для її усунення. Сформулюємо умову відсутності затінення зображень  $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$  як

$$|p| < |\operatorname{tg}\theta|.$$

З урахуванням цієї умови отримуємо:

$$\left| \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda_1} - I_a}{(I_{\lambda_0} - I_a)\cos\theta} \right| < |\operatorname{tg}\theta|.$$

Шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо цю умову у таку форму

$$s = \frac{I_{\lambda_1} - I_a}{I_{\lambda_0} - I_a} < 2\sin\theta. \quad (2.19)$$

Аналогічно визначимо умову

$$t = \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a} < 2 \sin \theta. \quad (2.20)$$

Таким чином, щоб позбутися загрози затінення частин зображень  $I_{\lambda 1}, I_{\lambda 2}$ , необхідно виконувати їх фотозйомку з таким кутом освітлення, який забезпечує виконання умов (2.19 і 2.20).

Для підвищення точності реконструкції пропонуємо такий двокроковий алгоритм. Нехай фотозйомкою отримано базове зображення пітинга  $I_{\lambda 0}$  та інтенсивність фону. Встановлюємо максимальний кут освітлення  $\theta_{\max+}$ . Фотозйомкою під цим кутом отримуємо два зображення  $I_{\lambda 1+}, I_{\lambda 2+}$ . Нехай у кожній його точці за виразами (2.19 і 2.30) визначені параметри  $s, t$ . У масивах  $s, t$  знайдемо максимальний елемент. Припустимо, що це  $s_{ik, \max} = s(i\Delta x, k\Delta y)$ . У системі обробки за формулою (2.5) визначимо похідну  $p_{ik, \max}$  і за її значенням оцінимо кут  $\theta_1 = \arctg p_{ik, \max}$ . Встановлюємо кут освітлення  $\theta_{\max} = \theta_1 + \Delta\theta$ , де  $\Delta\theta$  – оцінка похибки визначення кута  $\theta_1$ , і повторно знімаємо зображення  $I_{\lambda 1}, I_{\lambda 2}$ . За отриманою інформацією за виразами (2.5), (2.6) можна обчислити скореговане значення похідних  $p, q$  і знайти точнішу оцінку глибини пітинга.

Глибину  $z_{ik}$  знаходимо інтегральним накопиченням (дискретною апроксимацією інтегрального накопичення) похідних  $p, q$  векторів нормалі, починаючи від опорної точки, яку вибираємо на площині. Глибину в опорній точці вважаємо відомою

$$z_{ik} = z_{11} + \Delta y \sum_{m=1}^{k-1} q_{1m} + \Delta x \sum_{n=1}^{i-1} p_{nk},$$

де  $i = \overline{1, I}$ ;  $k = \overline{1, K}$ ;  $\Delta x, \Delta y$  – крок дискретизації.

## 2.2. Метод оцінки глибини поверхні за стереозображенням на платформі ламбертівської моделі відбиття світла

З представленого матеріалу в п 2 1 видно, що інформації тріади зображень

достатньо для тривимірної реконструкції. Але виникає питання чи можна провести тривимірну реконструкцію використовуючи лише два зображення? Отримання двох зображень простіше конструктивно.

Повернемося до розгляду рівняння  $I_{\lambda 0}$  (2.1). Щоб спростити рівняння  $I_{\lambda 0}$  (2.1) застосуємо у системі джерело світла з такими параметрами, що  $L_0 = (0,0,1)$ .

Щоб усунути залежність від параметра  $I_a$  визначимо його експериментально, затінюючи зразок з дефектом. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже і положення тіні, визначає система обробки. Використовуючи базове зображення  $I_{\lambda 0}$  зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону  $I_a$  і звести рівняння (2.1) до трьох невідомих.

Для визначення дифузного коефіцієнта використаємо точку поверхні, в якій має місце  $q(x_0, y_0) = p(x_0, y_0) = 0$ . До таких точок належать точки екстремумів і площини. Використовуючи таку точку та її властивість у виразі  $I_{\lambda 0}$  (2.1) отримуємо  $\iota = I_{p\lambda} k_d = I_{\lambda 0}(x_0, y_0) - I_a$ .

Таким чином використовуючи базове зображення можна визначити зважений дифузний коефіцієнт і звести систему (2.1) до двох невідомих. В цьому випадку одне рівняння в системі (2.1) стає зайве для проведення тривимірної реконструкції.

Мета дослідження підрозділу – розробити метод та алгоритм тривимірної реконструкції поверхні дефекту за її стереозображенням на платформі ламбертівської моделі відбиття світла.

Нехай під час фотозйомки спочатку застосовано джерело світла  $L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0})$ , а потім  $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ . З таким змінним освітленням дифузного об'єкта фотозйомкою отримується два зображення

$$I_{\lambda j} = I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{xj} N_x + L_{yj} N_y + L_{zj} N_z), \quad (2.21)$$

де параметри  $I_a$ ,  $I_{p\lambda}$ ,  $k_d$ ,  $L$ ,  $N$  описані у виразі (1.11),  $j=0,1$ . Оскільки інтенсивність джерела освітлення  $I_{p\lambda}$  є стала величина, а методика визначення

параметрів  $k_d$  та  $I_a$  представлена на початку п. 2., то рівняння (2.21) є функціями двох невідомих  $p, q$ . Для вектору  $L_1$  скористаємось описом (1.28). Щоб спростити систему (2.21) застосуємо у системі джерело світла з такими параметрами, що  $L_0 = (0, 0, 1)$ . Крім того нехай  $\theta = \frac{\pi}{3}$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{3}$ . В цьому випадку  $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}) = (0, 45, 0, 45, 0, 77)$ . Врахувавши одержані вектори  $L_0, L_1$  в системі рівнянь (2.21) алгебраїчними перетвореннями трансформуємо цю систему у таку форму:

$$p = -q - b, \quad (2.22)$$

$$q^2 + bq + c = 0, \quad (2.23)$$

де  $b = \frac{1}{L_{x1}} \left[ \frac{I_{\lambda1} - I_a}{I_{\lambda0} - I_a} - L_{z1} \right]$ ,  $c = \frac{b^2 + 1}{2} - \frac{t^2}{2(I_{\lambda0} - I_a)^2}$ , тут  $t = I_{p\lambda} k_d$  – зважений

дифузний коефіцієнт. За одержаними виразами (2.22), (2.23) можна реконструювати похідні  $p, q$ , що програмно реалізується засобами МАТЛАБ [111]. Програма реалізація реконструкції буде проведена у розділі 3. В якості досліджуваного об'єкта реконструкції по зображеннях буде обрано поверхневу тріщину (1.24).

Оцінка глибини поверхні знаходиться інтегральним накопиченням похідних векторів нормалі поверхні починаючи від одної з точок поверхні яку приймають за опорну.

### **2.2.1. Тривимірна реконструкції за стереозображенням на основі елементів тривимірної реконструкції за тріадою зображень**

Розглянемо засоби зменшення залежності реконструкції (2.22) і (2.23) від дифузного коефіцієнту. Для цього повернемося до аналізу реконструкції (2.5). З розгляду виразу (2.5) видно, що реконструйована похідна  $p$  не залежить від дифузного коефіцієнту, а також видно, що для реконструкції  $p$  застосовуються два зображення  $I_{\lambda0}, I_{\lambda1}$ . Оскільки зображення  $I_{\lambda0}$  у реконструкції (2.5) отримане з



напрямок освітлення  $L_0 = (0,0,1)$  і зображення  $I_{\lambda 0}$  у стерео реконструкції (2.22) і (2.23) отримане з напрямком освітлення  $L_0$  то ці зображення ідентичні, у системі реконструкції (2.5).

Оскільки зображення  $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1T}(L_{1T})$  у реконструкції (2.5) отримане з напрямком освітлення  $L_1 = L_{1T} = (L_{x1e}, 0, L_{z1e})$ , а зображення  $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1}(L_{1S})$  у стерео реконструкції (2.22) і (2.23) отримане з напрямком освітлення  $L_1 = L_{1S} = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ , то ці зображення неідентичні і тому зображення  $L_{1S}$  не можна застосувати у системі реконструкції (2.5).

Щоб отримати таку можливість доступу до математичних арсеналів реконструкції (2.5) на основі використання  $I_{\lambda 1}$  і застосувати їх у реконструкції (2.22) необхідно мати більш гнучкий опис дислокації напрямків світла  $L_1 = L_{1S}$  (рис. 2.1.): Для цього продовжимо розгляд реконструкції за тріадою зображень. Нехай напрямки освітлення представлено на рис. 2.8а. Нехай застосовано стандартний опис поверхні  $z=f(x,y)$  у прямокутній декартовій системі координат  $xuz$  (рис. 2.8). Розглянемо поворот прямокутної системи координат у цьому просторі навколо осі  $OZ$  на кут  $\varphi$ . З рис 2.8а видно, що

$$L_0 = (0,0,1), \quad L_1 = (L_{u1e}, 0, L_{z1e}), \quad L_2 = (0, L_{v2e}, L_{z2e}). \quad (2.24)$$

Ці джерела світла з застосуванням кутів (рис. 2.1,а) формально мають вигляд (2.6). В прямокутній системі координат  $uvz$  одиничний вектор нормалі до поверхні в досліджуваній точці приймає вигляд

$$N = \left\{ \frac{-h}{\sqrt{h^2 + g^2 + 1}}, \frac{-g}{\sqrt{h^2 + g^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{h^2 + g^2 + 1}} \right\} \quad (2.25)$$

тут  $h = \frac{\partial z}{\partial u}$  – похідна по напрямку  $u$ ,  $g = \frac{\partial z}{\partial v}$  – похідна по напрямку  $v$ . Тому з розгляду системи реконструкції (2.5), (2.6) видно, що це приводить до відтворення навколо осі  $OZ$  на кут  $\varphi$  (а), поверхня  $z = f(u, v)$  (б) і локалізації джерела світла  $(L_{S0}, L_{S1})$  в тривимірному просторі  $ZUY$  (в)

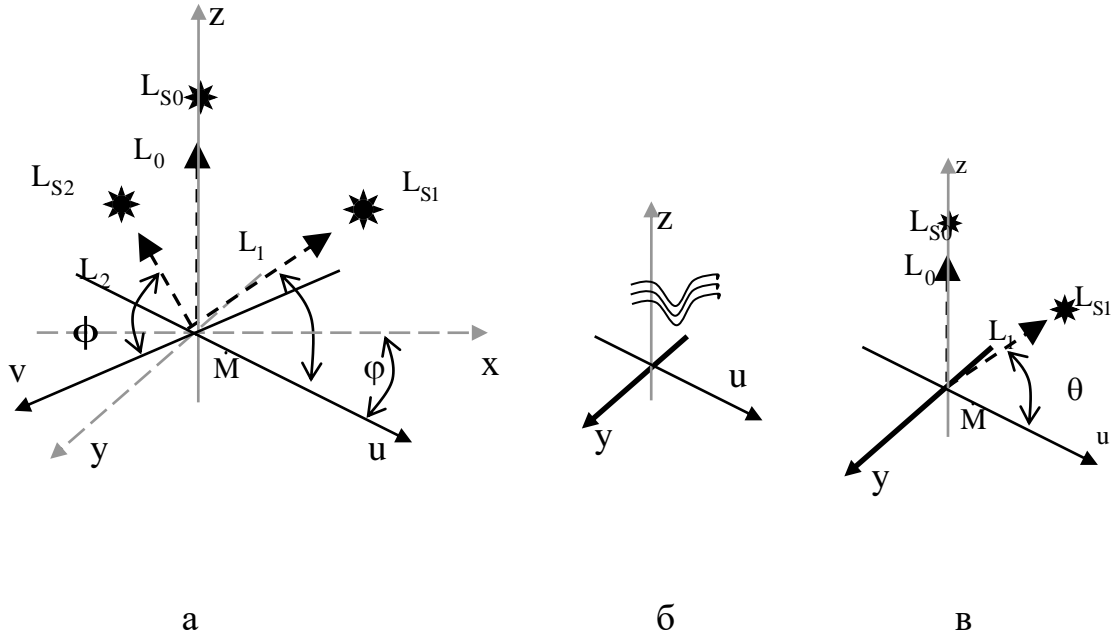


Рисунок – 2.8. Геометрична інтерпретація локалізації джерела світла  $(L_{S0}, L_{S1}, L_{S2})$  в тривимірному просторі при повороті системи координат

$$h = \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a)\cos\theta}, \quad (2.26)$$

$$g = \operatorname{tg}\phi - \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a)\cos\phi}. \quad (2.27)$$

З розгляду (2.26) видно, що вона визначається  $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1T}(L_{1T})$ . Нехай в реконструкції за стереозображенням теж застосовано напрямок освітлення  $L_{1T}$  (2.24), який  $L_{1T} = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}) = (0, 45, 0, 45, 0, 77)$ . Таким чином для спрощення наступної реконструкції за стереозображенням замість горизонтальної похідної  $p$  (2.22) доцільно реконструювати похідну  $h$  (2.26). Для продовження такої реконструкції розглянемо необхідні математичні засоби. Вважаємо, що наступну реконструкцію виконують коли поверхня задана в явній формі  $z = f(u, y)$ , як функція двох координат (рис. 2.8. б) одна з координат вертикальна координата в площині ХУ, а друга координата має в площині ХУ напрямок  $u$  (рис. 2.8 в).

Використовуючи таку систему координат вважаємо, що наступну реконструкцію виконують коли вертикальна похідна  $q$  реконструюється за (2.23), а похідна  $h$  за виразом (2.26).

Нехай реконструйовані похідні  $q$  та  $h$ . Розглянемо особливості реконструкції глибини на основі реконструйованих похідних. Нехай  $\Delta x$  – крок дискретизації по  $x$ ,  $\Delta y$  – крок дискретизації по  $y$ . Нехай напрямок  $u$  вибрано так, що  $\Delta u = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$  – крок дискретизації по  $u$ .

Перехід до дискретних координат  $\{i, k\}$  дозволяє здійснити наступне:

- на основі (2.26) визначити масиви похідних  $h_{ik}$ , де  $i = \overline{1, I}$ ;  $k = \overline{1, K}$ ;
- на основі (2.23) визначити масиви похідних  $q_{ik}$ , де  $i = \overline{1, I}$ ;  $k = \overline{1, K}$ .

Глибину  $z_{ik}$  знаходимо дискретною апроксимацією інтегрального накопичення) похідних  $h$ ,  $q$ , починаючи від опорної точки, яку вибираємо на площині

$$z_{mn} = z_{11} + \Delta y \sum_{k=m}^n q_{km} + \Delta u \sum_{i=1}^m h_{i,i}, \quad (2.28)$$

де  $z_{11}$  – опорна точка. Глибину в опорній точці вважаємо відомою. Таким чином показано, що оцінка глибини поверхні знаходиться інтегральним накопиченням реконструйованої похідної  $q$ , та інтегральним накопиченням реконструйованої похідної  $h$  починаючи від одної з точок поверхні, яку приймають за опорну до кожної точки апертури.

### **2.3. Удосконалення методу оцінки глибини поверхневого дефекту за одним зображенням, що базується на Ламбертівській моделі відбиття світла**

З представленого матеріалу в п 2.2. видно, що інформації стереозображення достатньо для тривимірної реконструкції. Але виникає питання чи можна провести тривимірну реконструкцію використовуючи лише одне зображення? Отримання одного зображення простіше конструктивно. Нехай для реконструкції по одному зображенню обрано поверхневі дефекти: тріщини та пітинги.

Мета дослідження – розробити метод та алгоритм тривимірної реконструкції поверхні дефекту, тривимірно реконструювати цю поверхню за результатами аналізу одного цифрового зображення поверхні дефекту.

Спочатку розглянемо відновлення форми та глибини пітинга.

### 2.3.1. Двоетапна інформаційна технологія тривимірної реконструкції пітинга

Розгляд першого етапу ІТ представлено в п. 1.4.1. Для визначення глибини пітинга обрано його вертикальний переріз. Визначені параметри  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$  та  $I_a$  моделі  $I_\lambda = I_{\lambda 2}$ , (2.1) для випадку  $L = L_2 = (0, \cos \varphi, \sin \varphi)$ . Для обчислення інтенсивності фону  $I_a$  використані затінені точки поверхні пітинга. Для визначення дифузного коефіцієнта використана точка дефекту, в якій має місце  $q(x_0, y_0) = p(x_0, y_0) = 0$ . Використовуючи таку точку та її властивість у виразі (2.1) отримуємо  $\iota = (I_{\lambda 0} - I_a) / \sin \varphi$ , де  $I_{\lambda 0} = I_\lambda(x_0, y_0)$ . Для забезпечення спрощення моделі відбиття, що полягає у зменшенні похибки реконструкції, обумовленої горизонтальними флуктуаціями глибини пітинга, проводиться низькочастотна фільтрація зображення у горизонтальному напрямку. Тому на відфільтрованому сегменті зображення  $\bar{I}m_{\Delta P}$ , з якого виділено вертикальний переріз пітингу, діє спрощувальне припущення: глибина пітинга  $z(x, y)$  є незмінна на горизонтальному відрізку  $[x_0, x_0 + d]$ , що формально можна подати як  $p(x, y) = 0$ , де  $x \in [x_0, x_0 + d]$ . Використовуючи це в моделі (2.1), а також визначені величини фону  $I_a$  і зваженого дифузного коефіцієнта  $\iota$ , отримаємо квадратичне рівняння (1.13), яке дозволяє обчислити його корені  $q_{1,2}$  програмно. Масив кореня  $q_1(y)$  є реконструкцією вертикальної похідної. В профільованій зоні реконструкцію перерізу поверхні пітинга виконують інтегральним накопиченням вертикальної похідної, починаючи від нижнього краю пітинга.

Етап 2. Другий етап ІТ [109] полягає у реалізації наступних чотирьох алго

ритмів: створення штучної моделі пітинга; оптимального зміщення штучної моделі по горизонтальному напрямку; оптимального стиснення лівого (правого) сегмента штучної моделі. Розглянемо кожен з цих алгоритмів.

Алгоритм штучної моделі полягає у реалізації наступних трьох операцій. Спочатку у отриманому перерізі  $Z$  визначаються нетипові розподіли порівняно з іншими перерізами пітинга, які проходить через точку максимальної глибини, а потім здійснюється їх лінійна корекція.

Далі на основі скоректованого вертикального перерізу  $z$  поверхня пітинга утворюється шляхом виконання таких двох операцій: обертанням його скоректованого вертикального перерізу  $z = f(k) = f(i_{\max}, k)$  відносно вертикальної осі  $Oz$ , яка проходить через точку максимальної глибини  $(i_{\max}, k_{\max})$  і має таку форму  $Z = f(\rho)$ , де  $\rho = \sqrt{(i - i_{\max})^2 + (k - k_{\max})^2}$ , та розтягом  $Z = f(\rho)$  у горизонтальному напрямку оператором інтерполяції.

Алгоритм оптимального зміщення полягає в наступному. Задаючись експериментальними оцінками фону  $\hat{I}_a$  і інтенсивності відбиття  $\hat{I}_{\lambda O}$ , за дифузною моделлю відбиття (1.8), де компоненти вектора нормалі  $p, q$  розраховано по зміщеній моделі пітинга  $z(s)$ , синтезуємо штучне зображення моделі пітинга  $I_s$ . Визначаємо оцінку абсолютної похибки  $\Delta I = I_p - I_s$ , де  $I_p$  – реальне зображення пітинга. Інтегральним накопиченням квадрата  $\Delta I$  по всіх точках, які належать пітингу, визначаємо квадратичну форму  $F_s$ . Для уточнення моделі  $z(s)$  шукаємо мінімум квадратичної форми  $F_s$ , який обчислюється з параметром  $s = s_{\text{opt}}$ . Знайдений параметр  $s_{\text{opt}}$  використовується в адаптивній корекції у сегментах штучної моделі  $z = f_2(s_{\text{opt}}, l)$  і  $z = f_2(s_{\text{opt}}, r)$ . Для уточнення квадратичних форм застосуванням селектуючих одиничних функцій  $P_g$ , де  $g$  приймає значень  $s$ , або  $l$ , або  $r$ , враховано просторову селекцію  $F_g = S_g^{-1} \sum_i \sum_k P_{gik} (I_{pik} - I_{gik})_{gik}^2$ , де  $I_g$  штучне зображення моделі пітинга,  $S_g$  – площа одиничних значень функції  $P_g$ .

Просторова селекція є двох видів. Одна з них закладена в структуру алгоритмів ІТ, а друга використовується для вилучення з квадратичної форми точок артефактів (форма пітинга пошкоджена і радикально відрізняється від очікуваної).

### **2.3.2. Двоетапна інформаційна технологія тривимірної реконструкції горизонтальної тріщини**

Для реконструкції оцінки глибини тріщини в роботі [110] запропонована двоетапна ІТ.

Етап 1. Операції першого етапу ІТ тривимірної реконструкції горизонтальної тріщини формально подібні операціям першого етапу ІТ тривимірної реконструкції пітинга.

Етап 2. Другий етап ІТ полягає у реалізації наступних чотирьох алгоритмів: створення центрального сегмента горизонтальної тріщини; створення штучної моделі лівого (правого) кінця горизонтальної тріщини; оптимального стиснення лівого (правого) кінця штучної моделі. Розглянемо кожен з цих алгоритмів.

Алгоритм створення центрального сегмента горизонтальної тріщини. Горизонтальним зміщенням доповненого перерізу горизонтальної тріщини  $z = f(y) = f(x_{\max}, y)$ , де  $y \in [-y_s, y_s]$  утворюється поверхня центрального сегменту горизонтальної тріщини  $z = f(x, y) = f(x_{\max}, y)$ , де  $y \in [-y_s, y_s]$ ,  $x \in [x_l, x_r]$ .

Операції алгоритму оптимального стиснення лівого (правого) кінця горизонтальної тріщини формально подібні операціям алгоритму оптимального стиснення лівого (правого) сегмента штучної моделі пітинга. З порівняння ІТ для пітинга та горизонтальної тріщини видно, що вони подібні. Тому їх практичне застосування можна розглянути для однієї з наведених ІТ.

## **2.4. Висновки**

У розділі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з розробленням методів, алгоритмів та створення на їх основі інформаційних

технологій для зменшення впливу похибок та артефактів на реконструкцію форми і визначення глибини дефектів при її використанні для моніторингу технічного стану металевих конструкцій. Зокрема, отримано такі результати:

1. Вперше запропоновано новий метод тривимірної реконструкції дефекту на основі інформації про тріаду та затінене зображення поверхні, застосовуючи наперед задані вертикальний та два бокові напрямки освітлення з використанням ламбертівської моделі відбиття світла, що дозволило усунути вплив артефактів на процес відтворення форми дефекту та мінімізувати похибку визначення його глибини.

2. Удосконалено метод тривимірної реконструкції форми і глибини дефекту за тріадою сформованих зображень, використовуючи довільно задані напрямки освітлення поверхні, що дає можливість автоматизувати процес відтворення дефекту.

3. Вперше запропоновано новий метод визначення напрямку освітлення на основі інформації про зображення поверхні тріади площин з відомими векторами нормалі та затіненим зображенням поверхні з використанням ламбертівської моделі відбиття світла, що дозволило реалізувати тривимірну реконструкцію форми і глибини дефекту за тріадою зображень. Проведено аналіз точності кутових параметрів напрямку світла для запропонованого методу і встановлено абсолютну похибку розрахункової частини алгоритму визначення похідних вектора нормалі, яка становить  $\pm 0,028$ .

4. Вперше запропоновано новий метод та алгоритм тривимірної реконструкції за двома зображеннями, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла, та гарантує відсутність впливу загородження пікселів на процес відновлення форми і глибини дефекту.

5. Вперше запропоновано нову двоетапну інформаційну технологію тривимірної реконструкції дефектів, зокрема тріщин та пітингів, за одним зображенням. Для корекції точності реконструкції використано згенероване на інформаційному ресурсі ламбертівській моделі відбиття світла зображення дефекту.

## РОЗДІЛ 3

### ОЦІНКА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ГЛИБИНИ ДЕФЕКТУ ПРИ ТРИВИМІРНІЙ РЕКОНСТРУКЦІЇ

#### **3.1. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень в залежності від бокових напрямків освітлення**

В неруйнівному контролі конструкцій, уражених корозією, для прогнозування ресурсу їх безаварійної роботи важливе значення має встановлення форми та глибини пітингів або тріщин, які утворилися на поверхні конструкцій в процесі експлуатації [113]. Одним з методів отримання тривимірної форми таких дефектів є метод 3D реконструкції за тріадою зображень (п. 2.1.1), де для фотозйомки зображень використовуються – вертикальний та два бокові напрямки освітлення.

Як правило визначення глибини дефекту відбувається з певною похибкою, яка в першу чергу обумовлена спотворенням зображень викликаним неточністю встановлення кожного з трьох напрямків освітлення поверхні дефекту.

При практичній реалізації цієї реконструкції необхідно врахувати таку похибку. Це складне завдання. Тому щоб досягти його успішного виконання слід розбити вирішення цієї проблеми на простіші етапи і аналізувати зазначену похибку по частинах. На першому етапі такого аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням кожного з двох бокових напрямків освітлення від технологічно запланованого значення.

Проведемо оцінку похибки визначення похідних поверхні тріщини при її реконструкції за тріадою зображень в залежності від бокових напрямків освітлення [114, 115].

В рамках поставленої мети будуть вирішені дві задачі – оцінки похибок 3D реконструкції похідних поверхні тріщини в залежності від бокових напрямків освітлення, а також буде з'ясовано, в якій мірі цей тип похибок можна контролювати сучасними кутомірними засобами, що дозволить конструктивно



зменшити їх до необхідного рівня і покращити точність 3D реконструкції.

На першому етапі аналізу точності реконструкції на основі тріади зображень доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_1 = (\tilde{L}_{x1}, \tilde{L}_{y1}, \tilde{L}_{z1})$  від технологічно запланованого  $L_1$  для фотозйомки зображення  $I_{\lambda 1}$ . На другому етапі аналізу точності проаналізуємо похибку, яка індукована відхиленням другого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_2 = (\tilde{L}_{x2}, \tilde{L}_{y2}, \tilde{L}_{z2})$  від технологічно запланованого  $L_2$  для фотозйомки зображення  $I_{\lambda 2}$ .

Розглянемо похибку реконструкції похідної  $p$ , яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_1$ . При такому боковому освітленні отримане зображення  $I_{\lambda 1}$  стає функцією параметрів  $P$ ,  $Q$ , а реконструкцію похідної отримаємо з виразу

$$p(P, Q) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1(P, Q)}{L_{x1e}}. \quad (3.1)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції параметра  $p$  розклад функції (3.1) в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} p(P, Q) = & p(P_e, Q_e) + (P - P_e) \frac{\partial p(P, Q_e)}{\partial P} \Big|_{P=P_e} + (Q - Q_e) \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \Big|_{Q=Q_e} + \\ & (P - P_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(P, Q_e)}{\partial P^2} \Big|_{P=P_e} + (Q - Q_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(P_e, Q)}{\partial Q^2} \Big|_{Q=Q_e} + \\ & + \frac{1}{2!} (P - P_e)(Q - Q_e) \frac{\partial^2 p(P, Q)}{\partial P \partial Q} \Big|_{P=P_e, Q=Q_e} + \dots \end{aligned} \quad (3.2)$$

Приймаючи  $P = P_e$ ,  $Q = Q_e = 0$  визначимо значення часткових похідних другого та третього членів розкладу (3.2)

$$\left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = \frac{P_e - p}{L_{x1e} (P_e^2 + 1)^{3/2}}, \quad \left[ \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = \frac{-q}{L_{x1e} \sqrt{1 + P_e^2}}. \quad (3.3)$$

Нехтуючи в виразі (3.2) малими членами починаючи від четвертого, отримуємо наближення розвинення в ряд Тейлора, з якого, з використанням підставлення (3.3), визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної

похідної

$$\Delta p_{PQ} = p(P_e, 0) - p(P, Q) = \Delta p_P + \Delta p_Q,$$

де похибки

$$\Delta p_P = (P_e - P) \left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e}, \quad \Delta p_Q = -Q \left[ \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0}. \quad (3.4)$$

Наступний аналіз точності виконується коли параметр  $P_e$  приймає значення  $P_e = -1$ . Тоді джерело світла  $L_1 = (\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}})$ . З врахуванням сказаного отримаємо

$$\left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=-1} = -\frac{1}{2}[1+p], \quad \left[ \frac{\partial p(-1, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = -q. \quad (3.5)$$

Відносна похибка обрахунку горизонтальної похідної з використанням (3.4) і (3.1) дорівнює

$$\delta p = \delta p_P + \delta p_Q, \quad (3.6)$$

де

$$\delta p_P = \frac{(1+P)(1+p)}{2p}, \quad \delta p_Q = Q \frac{q}{p}. \quad (3.7)$$

З виразу (3.6) видно, що для підвищення точності реконструкції доцільно працювати з мінімальним відхиленням напрямку освітлення від запланованого.

Поступаючи аналогічно визначимо відносну похибку обрахунку вертикальної похідної, яка індукована відхиленням другого бокового напрямки освітлення

$$\delta q = \delta q_Q + \delta q_P, \quad (3.8)$$

де

$$\delta q_Q = \frac{(1+Q)(1+q)}{2q}, \quad \delta q_P = P \frac{p}{q}. \quad (3.9)$$

При розгляді вертикальної тріщини  $q \approx 0$ . Як видно з (3.6)  $|\delta p_P| \gg |\delta p_Q|$  і тому  $k_d \delta p_{PQ} \approx \delta p_P$ . Таким чином необхідно оцінити похибку  $\delta p_P$ , яка є функ-

цією параметра  $P$  та горизонтальної похідної  $p$ . Щоб дослідити величину похибки  $\delta r_P$  у діапазоні горизонтальних похідних  $[-p_1, p_1]$  розглянемо переріз вертикальної тріщини, який описується залежністю  $z = \eta(i\Delta x - a)^2$ , тут  $\Delta x$  – крок дискретизації по горизонтальній координаті  $x$ ,  $\eta$  – постійний параметр.

Розглянемо приклад кількісної оцінки відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної тріщини. На рис. 3.1. подано комп'ютерне моделювання сегмента вертикальної тріщини (а) та розподіл його горизонтальної похідної (б). Оскільки для проведення реконструкції глибини тріщини необхідно забезпечити значний діапазон  $D = [-0,97; 0,97]$  відтворення горизонтальної похідної, тому необхідно дослідити умови реконструкції в цьому діапазоні докладніше і з'ясувати чи достатньою є точність у крайніх точках. З виразу (3.6) слідує, що  $\delta r = \delta r_P(\theta, p)$ .

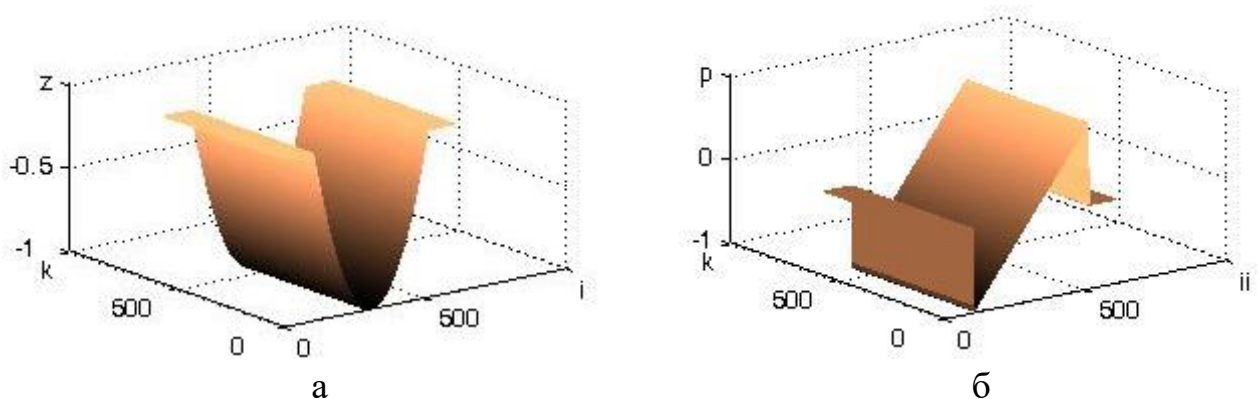


Рисунок 3.1 – Сегмент вертикальної тріщини (а) та його розподіл горизонтальної похідної (б)

Отриманий у вигляді двовимірного масиву розподіл відносної похибки визначення горизонтальної похідної  $\delta r$  представлено на рис. 3.2 (точки в яких можна реконструювати похідну  $p$  представлено світло сірим кольором, а де не виконується умова  $|\delta r_P(\theta, p)| \leq 0,1$  – чорним). З рис. 3.2 видно, що для розширення діапазонів реконструкції доцільно працювати з мінімальним відхиленням напрямку освітлення від технологічно запланованого, тобто  $\theta = 45^\circ$ . Зауважимо, що практична реалізація такої операції мінімізації відхилення напрямку освітлення потребує додаткових технологічних зусиль необхідних для

корекції точності розташування напрямків освітлення. Надалі приймаємо, що оцінка похибки визначення вертикальної похідної тріщини, обумовлена відхиленням напрямку освітлення  $\theta$  від технологічно запланованого  $45^\circ$ , скоректо

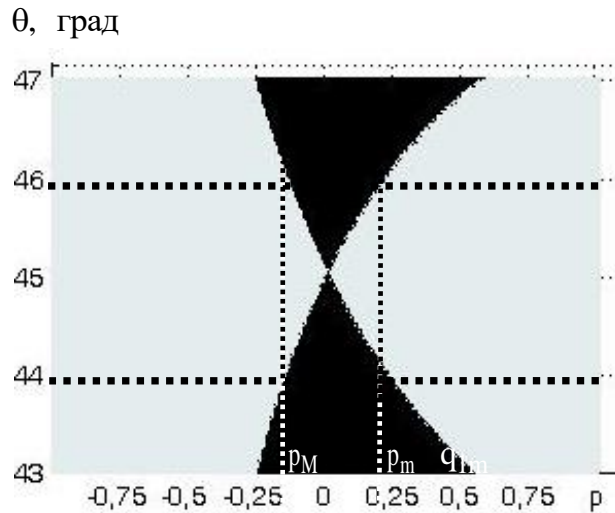


Рисунок 3.2 – Розподіл відносної похибки визначення горизонтальної похідної  $\delta r_p(\theta, \rho)$  та діапазони реконструкції у випадку  $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$

вана конструктивно так, що  $|\delta r_p(\theta, \rho)| \leq 0,1$ , де  $\theta \in [44^\circ, 46^\circ]$ . Завдяки сучасним вітчизняним кутомірам виробництва МІКРОТЕХ [116] можна створити джерело світла з таким відхиленням напрямку освітлення для використання при 3D реконструкції. В цьому випадку для реконструкції з точністю  $|\delta r_p| \leq 0,1$  будемо мати два діапазони реконструкції горизонтальної похідної  $D_- = [-0,97; -0,14]$ , та  $D_+ = [0,23; 0,97]$ .

При 3D реконструкції оцінку глибини тріщини знаходимо інтегральним накопиченням похідної  $r$ , починаючи від одного з країв тріщини (див. рис. 3.1а). Зважаючи на те що по абсолютній довжині діапазон  $D_-$  більший за діапазон  $D_+$  (рис. 3.2,  $|r_M| < r_m$ ) глибину симетричного об'єкта реконструкції, яким є дана тріщина, краще реконструювати у діапазоні  $D_-$ .

Таким чином розраховані похибки визначення похідних досліджуваної поверхні обумовлені відхиленням бокового напрямку освітлення  $L_1$  та  $L_2$ .

### 3.2. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою її зображень в залежності від відхилень у вертикальному напрямку освітлення

Розглянемо похибку, яка індукована відхиленням напрямку освітлення  $\tilde{L}_0 = (\tilde{L}_{x0}, \tilde{L}_{y0}, \tilde{L}_{z0})$  від технологічно запланованого вертикального  $L_0$  для фотозйомки зображення  $I_{\lambda 0}$ . Зауважимо, що за рахунок змін напрямку освітлення  $\tilde{L}_0$  сформоване зображення  $I_{\lambda 0}(L_0)$  спотворюється і стає  $I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0)$ . Тому реконструкція похідної  $p$  змінюється лише за рахунок впливу параметра  $\eta_1(I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0))$ , а реконструкція похідної  $q$  змінюється лише за рахунок впливу параметра  $\eta_2(I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0))$ .

Спочатку розглянемо похибку реконструкції похідної  $p$ , яка індукована відхиленням напрямку освітлення  $\tilde{L}_0$ . Вектор  $\tilde{L}_0$  набуває форми

$$\tilde{L}_0 = \left( \frac{-P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}}, \frac{-Q_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}} \right).$$

При відсутності відхилення освітлення від технологічно запланованого у точці  $P_0 = P_{e0} = 0$ ,  $Q_0 = Q_{e0} = 0$  похідна  $p$  приймає наступне значення

$$p = p(0,0) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1(0,0)}{L_{x1e}}. \quad (3.10)$$

У випадку коли маємо відхилення освітлення від технологічно запланованого зображення  $I_{\lambda 0}$  стає функцією параметрів  $P_0, Q_0$ . Вираз (3.10) запишемо у такому вигляді

$$p(P_0, Q_0) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1(P_0, Q_0)}{L_{x1e}}. \quad (3.11)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції параметра  $p$  розклад функції (3.11) в ряд Маклорена

$$p(P_0, Q_0) = p(0,0) + P_0 \left[ \frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} + Q_0 \left[ \frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} + P_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 p(P_0, 0)}{\partial P_0^2} \right]_{P_0=0} + Q_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 p(0, Q_0)}{\partial Q_0^2} \right]_{Q_0=0} + \frac{1}{2!} P_0 Q_0 \left[ \frac{\partial^2 p(P_0, Q_0)}{\partial P_0 \partial Q_0} \right]_{P_0=0, Q_0=0} + \dots \quad (3.12)$$

Наступний аналіз точності виконується з технологічно запланованим напрямком  $L_1$ , в точці з  $P = P_{e1}$ ,  $Q = Q_{e1} = 0$ . Тоді  $L_1 = (\frac{-P_{e1}}{\sqrt{P_{e1}^2 + 1}}, 0, \frac{1}{\sqrt{P_{e1}^2 + 1}})$ .

Для оцінки другого і третього членів розкладу (3.12) шляхом диференціювання отримуємо

$$\left[ \frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -\frac{p^2 P_{e1} + p}{P_{e1}}, \quad \left[ \frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -\frac{q P_{e1} + q}{P_{e1}}. \quad (3.13)$$

Нехтуючи в виразі (3.12) малими членами, отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з якого, з використанням підставлення виразів (3.13), визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta r_{PQ} = p(P_0, Q_0) - p(0, 0) = \Delta r_P + \Delta r_Q, \quad (3.14)$$

де похибки

$$\Delta r_P = P_0 \left[ \frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0}, \quad \Delta r_Q = Q_0 \left[ \frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0}.$$

Для оцінки точності реконструкції параметра  $q$  поступимо аналогічно розклавши функцію  $q(P_0, Q_0)$  в ряд Маклорена

$$\begin{aligned} q(P_0, Q_0) = & q(0, 0) + P_0 \left[ \frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} + Q_0 \left[ \frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} + P_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 q(P_0, 0)}{\partial P_0^2} \right]_{P_0=0} + \\ & Q_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 q(0, Q_0)}{\partial Q_0^2} \right]_{Q_0=0} + \frac{1}{2!} P_0 Q_0 \left[ \frac{\partial^2 q(P_0, Q_0)}{\partial P_0 \partial Q_0} \right]_{P_0=0, Q_0=0} + \dots \end{aligned} \quad (3.15)$$

Наступний аналіз точності виконується з технологічно запланованим напрямком  $L_2$ , в точці з  $P = P_{e2} = 0$ ,  $Q = Q_{e2}$ . Тоді

$$L_2 = (0, \frac{-Q_{e2}}{\sqrt{Q_{e2}^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{Q_{e2}^2 + 1}}).$$

(3.15) шляхом диференціювання отримуємо

$$\left[ \frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -\frac{q P_{e2} + p}{Q_{e2}}, \quad \left[ \frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -\frac{q^2 Q_{e2} + q}{Q_{e2}}. \quad (3.16)$$

Нехтуючи в виразі (3.15) малими членами, отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з якого, з використанням підставлення (3.16) визначимо загальну оцінку точності реконструкції вертикальної похідної

$$\Delta q_{PQ} = q(P_0, Q_0) - q(0, 0) = \Delta q_P + \Delta q_Q, \quad (3.17)$$

де похибки  $\Delta q_P = P_0 \left[ \frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0}$ ,  $\Delta q_Q = Q_0 \left[ \frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0}$ .

Продовжимо наступний аналіз точності реконструкції похідної  $p$  з параметром  $P_{e1} = -1$ . Підставивши  $P_e = -1$  в (3.13) отримаємо

$$\left[ \frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -p^2 + p, \quad \left[ \frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -qp + q. \quad (3.18)$$

Підставивши (3.18) у (3.14) визначимо відносну похибку обрахунку горизонтальної похідної

$$\delta p = \delta p_P + \delta p_Q = P_0(1-p) + Q_0q \frac{1-p}{p}. \quad (3.19)$$

Приймаючи  $Q_{e2} = -1$  визначимо відносну похибку обрахунку вертикальної похідної

$$\delta q = \delta q_Q + \delta q_P = Q_0(1-q) + P_0p \frac{1-q}{q}. \quad (3.20)$$

З виразів (3.19) і (3.20) слідує, що похибки формально подібні. Тому необхідно та достатньо провести аналіз точності для однієї з них  $\delta p_Q$ . Нехай задана абсолютна похибка  $\pm \Delta Q$  визначення параметра  $Q_0$  як відхилення від запланованого номінального значення  $-\Delta Q \leq Q_0 \leq \Delta Q$ .

Тоді знак похибки  $\delta p_Q$  буде залежати від параметрів  $Q_0$ ,  $p$ ,  $q$ . Нехай задано кількісну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної  $-\delta p_{Q0} \leq \delta p_Q \leq \delta p_{Q0}$ . Розглянемо цю умову у такій формі

$$-\delta p_{Q0} \leq \frac{Q_0}{g_Q} \leq \delta p_{Q0}, \quad (3.21)$$

де  $g_Q = \frac{p}{(1-p)q}$ . В залежності від знаку похибки  $\delta p_Q$  розглянемо два випадки

формування умови (3.21)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q \leq g_Q \delta p_{Q_0}, \text{ коли } Q_0 = \Delta Q \text{ і } g_Q > 0, \text{ або коли } Q_0 = -\Delta Q \text{ і } g_Q > 0 \\ -\Delta Q \geq \delta p_{Q_0} g_Q, \text{ коли } Q_0 = -\Delta Q \text{ і } g_Q < 0, \text{ або коли } Q_0 = \Delta Q \text{ і } g_Q < 0. \end{array} \right. \quad (3.22)$$

Таким чином коли задані відносна похибка  $\delta p_{Q_0}$  та абсолютна похибка  $\pm \Delta Q$  для встановлення належності точки  $(p, q)$  до робочих діапазонів реконструкції необхідно і достатньо визначити параметр  $g(p, q)$  і проаналізувати чи виконується одна з умов (3.22).

Проведемо кількісну оцінку діапазонів реконструкції похідних  $p, q$  на основі умов (3.22) та абсолютної похибки параметра  $Q_0$  ( $P_0$ ) для конкретної системи реконструкції і реального пристрою вертикального променя, зображеного на рис. 2.3.

Нехай СТРТЗ має наступні технічні характеристики:  $\delta p_{P_0} = \pm 0,1$ ,  $\delta p_{Q_0} = \pm 0,1$ ,  $\delta q_{P_0} = \pm 0,1$ ,  $\delta q_{Q_0} = \pm 0,1$ .

Побудуємо залежність  $\Delta P = P_0 \leq 0,1/(1-p)$ , як залежність  $\theta = \arcsin g P_0$  від величини горизонтальної похідної  $p$  (рис. 3.3). З рис. 3.3 видно, що при кутах  $\theta$ , які  $87,5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , реконструкція горизонтальної похідної відбувається з заданою відносною похибкою  $\delta p_{P_0} = 0,1$  в межах діапазону реконструкції горизонтальної похідної  $D_p = [-0,97; 0,97]$ .

Результати розрахунків розподілу  $Q_0$  з кількісним аналізом виконання умов (3.22)

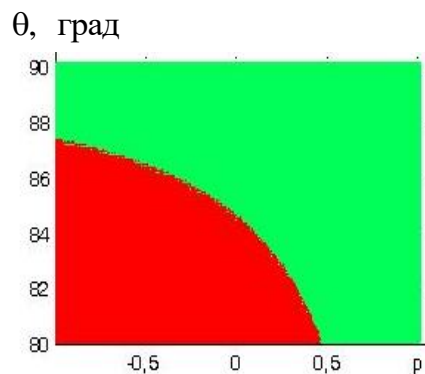


Рисунок 3.3 – Залежність кута  $\theta$  від горизонтальної похідної  $p$



представлено на рис. 3.4. Тут точки  $(p,q)$  в яких можна реконструювати похідну  $p$  коли виконується  $0,01 \leq Q_0$  представлено площиною  $Q_0 = 0,01$ , а точки  $(p,q)$ , в яких виконується  $Q_0 \leq -0,01$  представлено площиною  $Q_0 = -0,01$ . З рис. 3.4 видно, що між площинами, де реконструкція виконується з заданою точністю  $\epsilon$  зони значень точок  $(p,q)$ , де точність реконструкції не відповідає заданій.

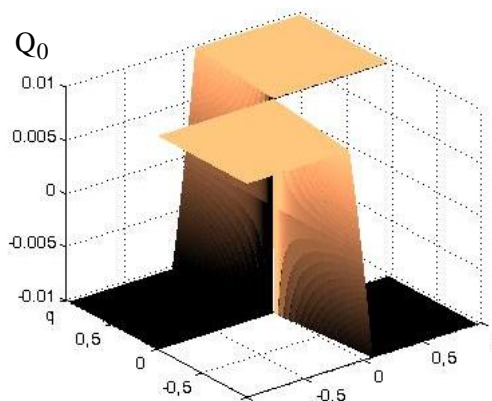


Рисунок 3.4 – Частково обмежений розподіл відхилення  $Q_0(p,q)$

Щоб краще селектувати зони реконструкції з заданою точністю і заборонені зони реконструкції розподіл відхилення  $Q_0$  представлено у бінарній формі.

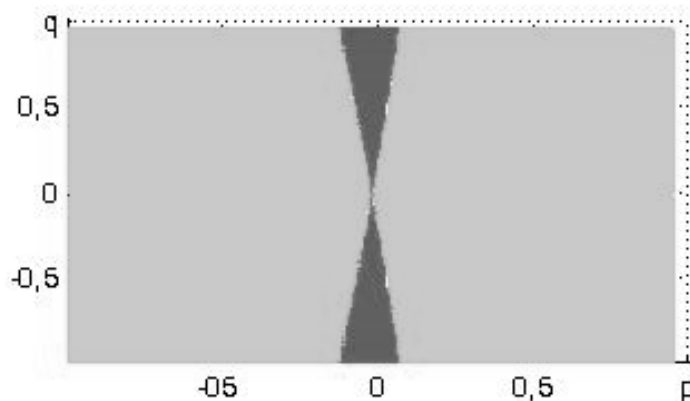


Рисунок 3.5 – Бінарний розподіл відхилення  $Q_0(p,q)$

На рис. 3.5 точки в яких можна реконструювати похідні  $p$  та  $q$  представлено сірим кольором, а точки в яких не можна реконструювати похідні  $p$  та  $q$  чорним. Видно, що в околі  $p=0$  діапазон реконструкції горизонтальної похідної  $D_p$  стає подвійним, а початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної  $D_q$  звужується. Для кількісної оцінки похибок розглянемо сегмент бінарного розподілу похідних  $p$  та  $q$  в забороненій зоні, який представлено на рис. 3.6.

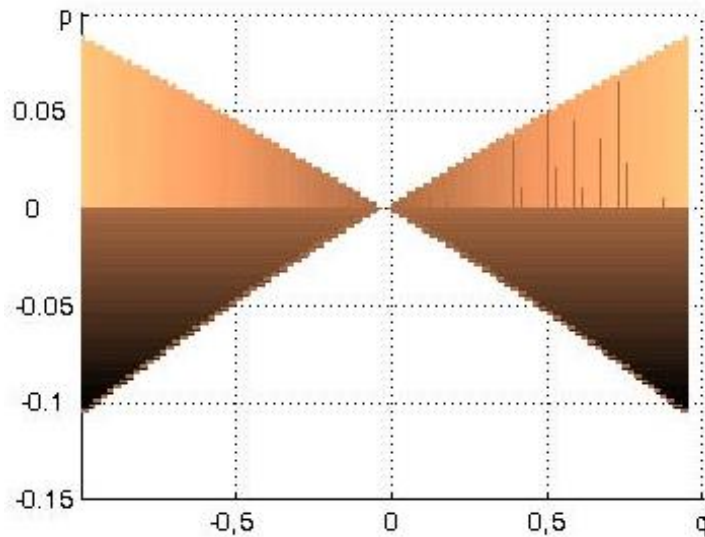


Рисунок 3.6 – Сегмент бінарного розподілу  $Q_0(p, q)$  в якому є заборонена зона реконструкції

З рис. 3.6 видно, що діапазон реконструкції горизонтальної похідної  $D_p$  стає  $D_{p-} = [-0,97; p_-]$ , де  $-0,1 \leq p_-(q) < 0$ ,  $D_{p+} = [p_+; 0,97]$ , де  $0 \leq p_+(q) \leq 0,08$ . Розширення діапазонів реконструкції відбувається при мінімальному відхиленні похідної  $q$  від 0, а екстремальне звуження діапазонів відбувається при умові, що  $q = \pm 0,97$ . Також видно, що коли  $-0,1 \leq p \leq 0,08$  початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної  $D_q$  стає таким  $D_{q-} = [-q_-; q_-]$ , де  $q_-(p) < 0,97$ . Екстремальне звуження діапазону  $D_{q-}$  відбувається коли  $p \rightarrow 0$ .

Таким чином встановлено, що при запланованих технічних характеристиках СТРТЗ завдяки появі забороненої зони реконструкції заплановані діапазони реконструкції  $D_p$ ,  $D_q$  зменшено.

### 3.3. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності

Тривимірна реконструкція за тріадою зображень. В системі освітлення маємо три: джерела світла:  $L_{S0}$ ,  $L_{S1}$  і  $L_{S2}$ , які формують зображення з

інтенсивністю відбиття  $I_{p\lambda 0}$ ,  $I_{p\lambda 1}$  і  $I_{p\lambda 2}$ . Розглянемо ілюмінаційну модель зображення з контрольованим кутом освітлення та визначимо її параметри  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$  та  $I_a$  з тріади зображень

$$I_{\lambda 0} = I_a + I_{p\lambda 0} k_d (L_{x0} N_x + L_{y0} N_y + L_{z0} N_z),$$

$$I_{\lambda 1} = I_a + I_{p\lambda 1} k_d (L_{x1} N_x + L_{y1} N_y + L_{z1} N_z),$$

$$I_{\lambda 2} = I_a + I_{p\lambda 1} k_d (L_{x2} N_x + L_{y2} N_y + L_{z2} N_z).$$

Щоб усунути залежність від параметра  $I_a$  визначимо його штучно, затінюючи зразок з дефектом. Приймаємо, що  $I_{p\lambda 1} = I_{p\lambda 2}$ . Тоді отриману систему трьох рівнянь шляхом алгебраїчних перетворень, трансформуємо у таку форму:

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1}{L_{x1e}}, \quad q = \frac{L_{z2e}}{L_{y2e}} - \frac{\eta_2}{L_{y2e}}, \quad (3.23)$$

де  $\eta_1 = k \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}$ , тут  $k = \frac{I_{p\lambda 1}}{I_{p\lambda 0}} = \frac{I_{p\lambda 2}}{I_{p\lambda 0}}$ ,  $\eta_2 = k \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}$ .

Щоб спростити реконструкцію (3.23) та, як буде показано далі, покращити точність реконструкції, приймаємо, що  $k = L_{z1e} = L_{z2e}$ . Внаслідок цього величина  $p$  з виразу (3.23) приймає такий вигляд

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \delta I_{\lambda 01}, \quad (3.24)$$

де  $\delta I_{\lambda 01} = \frac{I_{\lambda 0} - I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 0} - I_a} = \frac{\delta I_{01}}{\delta I_{0a}}$ , тут  $\delta I_{01} = \frac{I_{\lambda 0} - I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 0}}$ ,  $\delta I_{0a} = \frac{I_{\lambda 0} - I_{\lambda a}}{I_{\lambda 0}}$ . При

такому  $k$  з виразів (2.3) -(2.5) отримуємо  $L_{x1e} = L_{y2e}$ . Внаслідок цього величина  $q$  з виразу (3.23) приймає такий вигляд

$$q = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \delta I_{\lambda 02}, \quad (3.25)$$

де  $\delta I_{\lambda 02} = \frac{I_{\lambda 0} - I_{\lambda 2}}{I_{\lambda 0} - I_a}$ . Таким чином у випадку  $I_{\lambda 0} \gg I_a$  реконструкція (3.24) і

(3.25) виконується на основі зважених відносних похибок зображень. За рахунок використання диференціального каскаду вплив фону зменшено. Як видно

реконструкція (3.24), є модифікацією реконструкції (2.5), а реконструкція (3.25) є модифікацією реконструкції (2.6).

Оцінімо похибки модифікованої реконструкції похідних  $p$  (3.24),  $q$  (3.25), яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_1$  (3.1) від технологічно запланованого  $L_1$  при якому формується зображення  $I_{\lambda_1}$ . На другому етапі аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням другого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_2$  (3.2) від технологічно запланованого  $L_2$  для фотозйомки зображення  $I_{\lambda_2}$ .

Зауважимо, що за рахунок змін напрямку освітлення  $\tilde{L}_1$  зображення  $I_{\lambda_1}(L_1)$  спотворюється і стає  $I_{\lambda_1}(\tilde{L}_1)$ , а за рахунок змін напрямку освітлення  $\tilde{L}_2$  зображення  $I_{\lambda_2}(L_2)$  спотворюється і стає  $I_{\lambda_2}(\tilde{L}_2)$ . Тому реконструкція похідної  $p$  (3.24) змінюється лише за рахунок зміни параметра  $\eta_1(I_{\lambda_1}(\tilde{L}_1))$ , а реконструкція похідної  $q$  (3.25) змінюється лише за рахунок зміни параметра  $\eta_2(I_{\lambda_2}(\tilde{L}_2))$ .

Розглянемо похибку реконструкції похідної  $p$ , яка індукована відхиленням першого бокового напрямку освітлення  $\tilde{L}_1$ . Вектор  $\tilde{L}_1$  знайдемо з (1.28)

$$\tilde{L}_1 = \left( \frac{-P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}} \right)$$

Видно, що для технологічно запланованого  $L_1$ , який визначено в точці з  $P = P_e$ ,  $Q = Q_e = 0$  зображення  $I_{\lambda_1}$ , а також величина  $\delta I_{\lambda_1 01}$  є функцією параметрів  $P_e, Q_e$  а реконструкція похідної  $p$  має вигляд

$$p = p(P_e, Q_e) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \delta I_{\lambda_1 01}(P_e, Q_e)$$

За рахунок використання напрямку освітлення  $\tilde{L}_1 = \tilde{L}_1(P, Q)$  зображення  $I_{\lambda_1}$  також стає функцією параметрів  $P, Q$ . Внаслідок чого реконструкцію похідної представимо наступним чином

$$p(P, Q) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \delta I_{\lambda_1 01}(P, Q). \quad (3.26)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції  $p$  розклад функції (3.26) в ряд Тейлора (3.2). Наступний аналіз точності виконується з параметром  $Q_e = 0$ . Для оцінки  $p = p(P, Q)$  шляхом його диференціювання та підставлення компонентів вектора  $N$  отримуємо

$$\left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \frac{P_e - p}{(P_e^2 + 1)^{3/2}}; \quad \left[ \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} \frac{-q}{\sqrt{1 + P_e^2}}$$

На основі чого абсолютна похибка загальної оцінки точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta p_{PQ} = p(P_e, 0) - p(P, Q) = \Delta p_P + \Delta p_Q,$$

де похибки

$$\Delta p_P = (P_e - P) \left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e}, \quad \Delta p_Q = -Q \left[ \frac{\partial p(P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0}$$

Підставивши  $P_e = -1$  в (3.3) отримаємо

$$\left[ \frac{\partial p(P, 0)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = -\frac{1+p}{2\sqrt{2}}, \quad \left[ \frac{\partial p(-1, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = -\frac{q}{\sqrt{2}}. \quad (3.27)$$

На основі (3.27) відносна похибка обрахунку горизонтальної похідної

$$\delta p = \delta p_P + \delta p_Q, \quad (3.28)$$

де

$$\delta p_P = \frac{(1+P)(1+p)}{2\sqrt{2}p}, \quad \delta p_Q = Q \frac{q}{\sqrt{2}p}.$$

Якщо порівняти вирази (3.6) і (3.28), то видно, що відносна похибки реконструкції в (3.28) менша  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  рази.

Поступаючи аналогічно визначимо відносну похибку обрахунку вертикальної похідної, яка викликана змінами напрямку освітлення  $L_2$ .

$$\delta q = \delta q_Q + \delta q_P,$$

де

$$\delta q_Q = \frac{(1+Q)(1+q)}{2\sqrt{2}q}, \quad \delta q_P = P \frac{p}{\sqrt{2}q}.$$

Система тривимірної реконструкції. Нехай СТРТЗ має наступні технічні характеристики:  $\delta p_{P0} = \pm 0,1$ ,  $\delta p_{Q0} = \pm 0,1$ ,  $\delta q_{P0} = \pm 0,1$ ,  $\delta q_{Q0} = \pm 0,1$ . Проведемо кількісну оцінку робочих діапазонів реконструкції горизонтальної похідної при використанні СТРТЗ та ПБП ( п. 2.1.1.2.).

Результати розрахунків розподілу  $Q_0$  представлено на рис. 3.7.

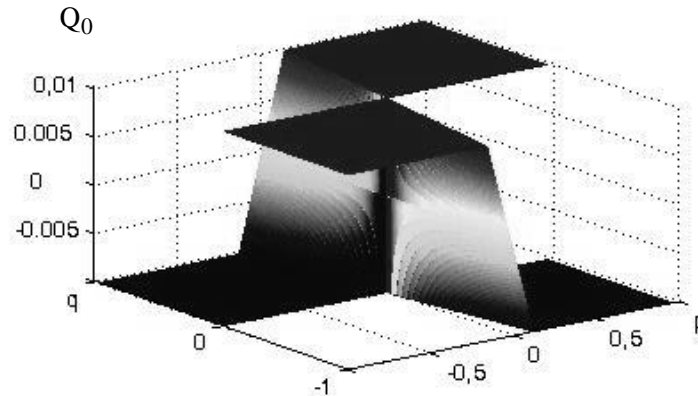


Рисунок 3.7 – Частково обмежений розподіл відхилення  $Q_0(p, q)$

Тут точки  $(p, q)$  в яких можна реконструювати похідну  $p$ , коли виконуються умови  $0,01 \leq Q_0$  і  $Q_0 \leq -0,01$ , представлено площинами  $Q_0 = \pm 0,01$ . З рис. 3.7 видно, що між площинами, де реконструкція виконується з заданою точністю є зони значень точок  $(p, q)$ , де точність реконструкції не відповідає заданій. Щоб краще селектувати зони реконструкції з заданою точністю і заборонені зони реконструкції, розподіл відхилення  $Q_0$  представлено у бінарній формі.

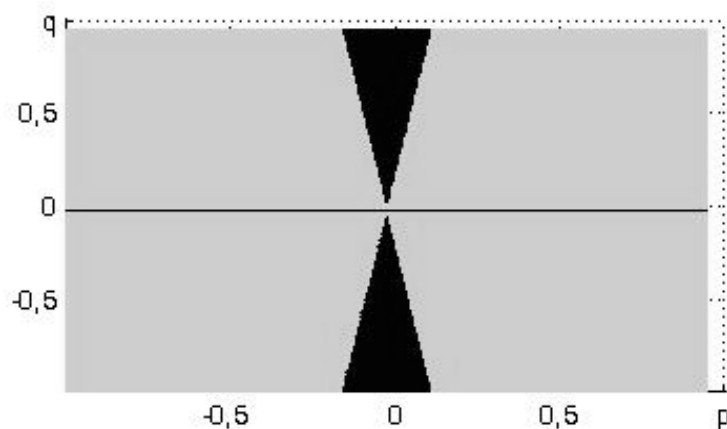


Рисунок 3.8 – Бінарний розподіл відхилення  $Q_0(p, q)$

На рис. 3.8 точки в яких можна реконструювати похідні  $p$  та  $q$  представлено сірим кольором, а точки в яких не можна реконструювати похідні  $p$  та  $q$  чорним.

З рис. 3.8 видно, що в околі  $p=0$  діапазон реконструкції горизонтальної похідної  $D_p$  стає подвійним, а початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної  $D_q$  звужується. Для кількісної оцінки пошкоджень діапазонів  $D_p$ ,  $D_q$  розподіл похідних  $p$  та  $q$  в забороненій зоні представлено у вигляді сегмента на рис. 3.9.

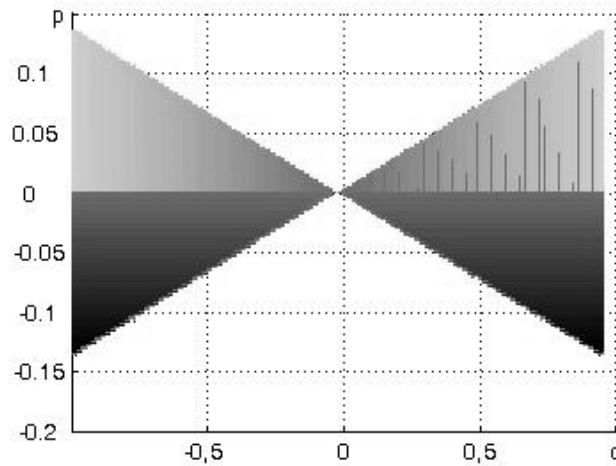


Рисунок 3.9 – Сегмент бінарного розподілу  $Q_0(p, q)$  в якому є заборонена зона реконструкції

З рис. 3.9 видно, що діапазон реконструкції горизонтальної похідної  $D_p$  стає  $D_{p-} = [-0,97; p_-]$ , де  $-0,13 \leq p_-(q) < 0$ ,  $D_{p+} = [p_+; 0,97]$ , де  $0 \leq p_+(q) \leq 0,13$ . Розширення діапазонів реконструкції відбувається при мінімальному відхиленні похідної  $q$  від 0, а екстремальне звуження діапазонів відбувається коли  $q = \pm 0,97$ . Також видно, що коли  $-0,13 \leq p \leq 0,13$  початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної  $D_q$  стає наступним  $D_{q-} = [-q_-; q_-]$ , де  $q_-(p) < 0,97$ . Екстремальне звуження діапазону  $D_{q-}$  відбувається лише при виконанні умови коли  $p \rightarrow 0$ .

Таким чином встановлено, що при запланованих технічних характеристиках СТРПЗ завдяки появі забороненої зони реконструкції заплановані діапазони реконструкції  $D_p$ ,  $D_q$  зменшуються. Застосуємо отримані оцінки якості реконструкції похідних при використанні ПБП і ПВП для оцінки точності прогнозу тріщиностійкості. Опис зародження і росту втомної тріщини та вплив її

параметрів на тріщиностійкість наведені у працях [3, 19, 20]. Для встановлення зв'язку між параметрами тріщиностійкості та отриманими оцінками якості реконструкції похідних застосуємо наступний чотирьох етапний підхід.

1. Нехай на поверхні досліджуваної пластини виникла тріщина типу «розрив» [3], внаслідок того, що пластину розтягнуто в випробувальній машині ортогональним до ходу тріщини навантаженням  $\sigma$ . В цьому випадку поле напружень визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень [3] (1.7). Точність прогнозу тріщиностійкості визначається відносною похибкою обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень  $\delta K_{\sigma}$  (1.25), який визначається відносною похибкою  $\delta z_V$  (1.26), яка виникає за рахунок неточності 3D реконструкції довжини тріщини.

2. Визначимо загальну оцінку відносної похибки розрахунку довжини тріщини на основі параметрів тривимірної реконструкції та проведеного аналізу точності тривимірної реконструкції.

2.1. Визначимо довжину тріщини. Нехай маємо тріщину типу «розрив» [3]. Нехай  $\alpha$  – кут нахилу тріщини в площині XOY. Зауважимо, що для оцінки довжини тріщини  $z_{\max}$  вона може бути представлена перерізом у площині XOZ або перерізом у площині YOZ. Коли  $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ , то тріщина наближена до вертикальної тріщини в якій  $q \rightarrow 0$ . В цьому випадку тріщину доцільно описувати перерізом у площині XOZ. Коли  $\alpha \rightarrow 0$ , то тріщина наближена до горизонтальної тріщини в якій  $p \rightarrow 0$ . В цьому випадку тріщину доцільно описувати перерізом у площині YOZ. Якщо  $\frac{3\pi}{4} > \alpha > \frac{\pi}{4}$ , то тріщина має виразніші ознаки вертикальності. В іншому випадку тріщина має виразніші ознаки горизонтальності. Для випадку, де домінують ознаки вертикальної тріщини, представимо аналітичну модель перерізу тріщини  $z_{Cr}(x, y)$ , де  $y=0$  у площині XOZ у такій формі



$$z_{CrP}(x, 0) = \begin{cases} -z_{\max} + \begin{cases} -k(x - x_V), & x_e \leq x \leq x_V \\ k(x - x_V), & x_r \geq x > x_V \\ 0, & x_e > x \cup x > x_r \end{cases} \end{cases} \rightarrow p = \begin{cases} \begin{cases} -k \\ k \\ 0 \end{cases} \end{cases}, \quad (3.29)$$

де  $x_e = -x_s + x_V$ ,  $x_r = x_s + x_V$ , тобто тріщина симетрична. На основі (3.29) визначимо глибину тріщини як

$$z = \int_{x_u}^{x_r} p dx = p(x_r - x_u), \quad (3.30)$$

де  $x_u \in [x_V, x_r]$ , тому довжина тріщини

$$z_{\max} = p(x_r - x_V). \quad (3.31)$$

2.2. Визначимо оцінку точності реконструкції глибини тріщини на основі абсолютної похибки горизонтальної похідної  $\Delta p_{PQ}$

$$\Delta z_{\max} = \int_{x_V}^{x_r} \Delta p_{PQ} dx = (\Delta p_P + \Delta p_Q)(x_r - x_V). \quad (3.32)$$

2.3. На основі (3.31) та (3.32) визначимо загальну оцінку точності реконструкції довжини тріщини

$$\delta z_V = \delta p_P + \delta p_Q,$$

де  $\delta p_P$  і  $\delta p_Q$  описується виразом (3.28). Маємо, що  $q=0$ , тому  $\delta p_Q = 0$ .

3. При прогнозі тріщиностійкості при використанні запропоновано СТРПЗ, яка має технічні характеристики  $\delta p_{P0} = \pm 0,1$  похибка визначення довжини тріщини приймає наступне значення

$$\delta z_V = \pm 0,1. \quad (3.33)$$

На основі цього за виразом (1.25) точність прогнозу тріщиностійкості складає  $\delta K_{\sigma} = \pm 0,05$ .

4. На основі проведеного аналізу точності тривимірної реконструкції (див. рис. 3.8., рис. 3.9.), та використання СТРПЗ з похибкою (3.33) дозволяється здійснювати реконструкцію з гарантованими похибками у діапазонах  $D_p$ ,  $D_q$  з яких вилучена заборонена зона.

### 3.4. Кількість інформації інформаційної технології тривимірної реконструкції за тріадою зображень

Для визначення КІ необхідно визначити її параметр – похибку реконструкції глибини вертикальної тріщини на основі похідної  $p$ . Визначимо похибку реконструкції похідної  $p$ , яка індукована відхиленням напрямків освітлення  $\tilde{L}_0$  та  $\tilde{L}_1$  від технологічно запланованих значень. Коли існує відхилення бокового (вертикального) напрямку освітлення  $\tilde{L}_1$  ( $\tilde{L}_0$ ) від технологічно запланованого зображення  $I_{\lambda 0}$  ( $I_{\lambda 1}$ ) стає функцією параметрів  $P_0, Q_0$  ( $P, Q$ ), а реконструкцію похідної отримаємо з виразу

$$p(P_0, Q_0, P, Q) = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_l(P_0, Q_0, P, Q)}{L_{x1e}}. \quad (3.34)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції параметра  $p$  розклад функції (3.34) в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} p(P_0, Q_0, P, Q) = & p(0, 0, P_e, Q_e) + P_0 \left[ \frac{\partial p(P_0, 0, P_e, Q_e)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} + Q_0 \left[ \frac{\partial p(0, Q_0, P_e, Q_e)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} \\ & + (P - P_e) \left[ \frac{\partial p(0, 0, P, Q_e)}{\partial P} \right]_{P=P_e} + (Q - Q_e) \left[ \frac{\partial p(0, 0, P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=Q_e} + \\ & + P_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 p(P_0, 0, P_e, Q_e)}{\partial P_0^2} \right]_{P_0=0} + Q_0^2 \frac{1}{2!} \left[ \frac{\partial^2 p(0, Q_0, P_e, Q_e)}{\partial Q_0^2} \right]_{Q_0=0} + \\ & + (P - P_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(0, 0, P, Q_e)}{\partial P^2} \Big|_{P=P_e} + (Q - Q_e)^2 \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 p(0, 0, P_e, Q)}{\partial Q^2} \Big|_{Q=Q_e} + \\ & + \frac{1}{2!} P_0 Q_0 \left[ \frac{\partial^2 p(P_0, Q_0, P_e, Q_e)}{\partial P_0 \partial Q_0} \right]_{P_0=0, Q_0=0} + \frac{1}{2!} P_0 (Q - Q_e) \frac{\partial^2 p(0, 0, P, Q)}{\partial P_0 \partial Q} \Big|_{P_0=0, Q=Q_e} + \\ & + \frac{1}{2!} (P - P_e)(Q - Q_e) \frac{\partial^2 p(0, 0, P, Q)}{\partial P \partial Q} \Big|_{P=P_e, Q=Q_e} + \dots \end{aligned} \quad (3.35)$$

Для оцінки другого і третього членів розкладу (3.35) приймаємо, що їх аналіз точності виконується з технологічно запланованим напрямком  $L_1$ , в точці з  $P = P_e$ ,  $Q = Q_e = 0$ . На основі цього, для оцінки другого і третього членів розкладу (3.35) шляхом диференціювання отримуємо

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial p(P_0, 0, P_e, Q_e)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} &= -\frac{p^2 P_e + p}{P_{e1}}, \\ \left[ \frac{\partial p(0, Q_0, P_e, Q_e)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} &= -\frac{qp P_e + q}{P_e}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Для оцінки четвертого і п'ятого членів розкладу (3.35) шляхом диференціювання отримуємо

$$\left[ \frac{\partial p(0, 0, P, Q_e)}{\partial P} \right]_{P=P_e} = \frac{P_e - p}{L_{x1e}(P_e^2 + 1)^{3/2}}, \quad \left[ \frac{\partial p(0, 0, P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=0} = \frac{-q}{L_{x1e}\sqrt{1+P_e^2}}. \quad (3.37)$$

Нехтуючи в виразі (3.35) малими членами, одержимо наближення розв'язання в ряд Тейлора, з якого, з використанням підставлення цих виразів в (3.35), визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta p = p(P_0, Q_0, P, Q) - p(0, 0, P_e, Q_e) = \Delta p_{Pv} + \Delta p_{Qv} + \Delta p_{P1} + \Delta p_{Q1} \quad (3.38)$$

де похибки

$$\Delta p_{Pv} = P_0 \left[ \frac{\partial p(P_0, 0, P_e, Q_e)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0}, \quad (3.39)$$

$$\Delta p_{Qv} = Q_0 \left[ \frac{\partial p(0, Q_0, P_e, Q_e)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0}.$$

$$\Delta p_{P1} = (P_e - P) \left[ \frac{\partial p(0, 0, P, Q_e)}{\partial P} \right]_{P=P_e}, \quad (3.40)$$

$$\Delta p_{Q1} = -Q \left[ \frac{\partial p(0, 0, P_e, Q)}{\partial Q} \right]_{Q=Q_e=0}.$$

Наступний аналіз точності виконується, коли параметр  $P_e$  приймає значення  $P_e = -1$ . Тоді джерело світла має координати  $L_1 = \left( \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$ .

Підставивши  $P_e = -1$  в (3.36) на основі (3.38)-(3.40) визначимо відносну похибку обчислення горизонтальної похідної

$$\delta p = \delta p_{Pv} + \delta p_{Qv} + \delta p_{P1} + \delta p_{Q1}, \quad (3.41)$$

де

$$\delta p_{Pv} = P_0(1 - p). \quad (3.42)$$

$$\delta p_{Qv} = Q_0 q \frac{1-p}{p}. \quad (3.43)$$

$$\delta p_{Pl} = \frac{(1+P)(1+p)}{2p}. \quad (3.44)$$

$$\delta p_{Ql} = Q \frac{q}{p}. \quad (3.45)$$

Коли проводиться реконструкція вертикальної тріщини, в якій  $q=0$ , тоді (3.41) набуває вигляду

$$\delta p = \delta p_{Pv} + \delta p_{Pl}, \quad (3.46)$$

а абсолютна похибка обрахунку горизонтальної похідної  $\Delta p = \Delta p_{Pv} + \Delta p_{Pl}$ .

Визначимо оцінку точності реконструкції глибини тріщини на основі абсолютної похибки обрахунку горизонтальної похідної  $\Delta p$

$$\Delta z = \int_{x_u}^{x_r} \Delta p dx = (\Delta p_{Pv} + \Delta p_{Pl})(x_r - x_u), \quad (3.47)$$

де  $x_u \in [x_v, x_r]$ . На основі (3.31) та (3.47) визначимо загальну оцінку точності реконструкції глибини тріщини

$$\delta z = \delta p_{Pv} + \delta p_{Pl} = \delta p. \quad (3.48)$$

На основі (3.48) оцінимо КІ, яка отримується при 3D реконструкції вертикальної тріщини. В цьому випадку горизонтальний переріз вертикальної тріщини можна представити у вигляді одномірного сигналу  $z = f(x)$  (3.29). В відповідності з теоремою відліків при проведенні реконструкції застосуємо крок дискретизації  $\Delta x = \frac{1}{2F_x}$ . Якщо СОЗ, яка має апертуру  $L_x = N\Delta x$ , то кількість

інформації [141] рівна:

$$I = L_x \Delta f_x \log\left(1 + \frac{1}{\delta^2}\right), \quad (3.49)$$

де  $\Delta f$  – частотна смуга коливань параметру  $z = f(x)$ ,  $\delta = \delta z$  – похибка отримання сигналу. На основі (3.29) довжина тріщини  $L_x = x_r - x_s$ . Зауважимо, що

$\Delta f_x = 2F_x$ . Спектр трикутного імпульсу, представленого (3.29), коли  $x_V = 0$ , описується виразом [140]

$$S(\omega) = -2z_{\max} L_x \sin c^2 \beta, \quad (3.50)$$

де  $\beta = \omega L_x / 2$ . Коли  $\beta = 2,5\pi$ , то

$$\sin c^2 \beta = 0,016.$$

На основі цього приймаємо  $\beta = 3\pi$ , тоді

$$f = \frac{3}{L_x}.$$

Оскільки  $\Delta f_x = 2f$  отримаємо наближення

$$\Delta f_x = \frac{6}{L_x}. \quad (3.51)$$

Підставивши (3.51) у вираз (3.49) отримаємо

$$I = 6 \log(1 + \delta p^{-2}). \quad (3.52)$$

Розрахуємо КІ для вертикальної тріщини. Спираючись на технічні характеристики ПВП та ПБП в розрахунку відносної похибки  $\delta p$  приймаємо, що  $P_0 = 0,01$ ,  $P = 0,01$ . На рис. 3.10 представлено розподіл КІ в залежності від горизонтальної похідної  $p$

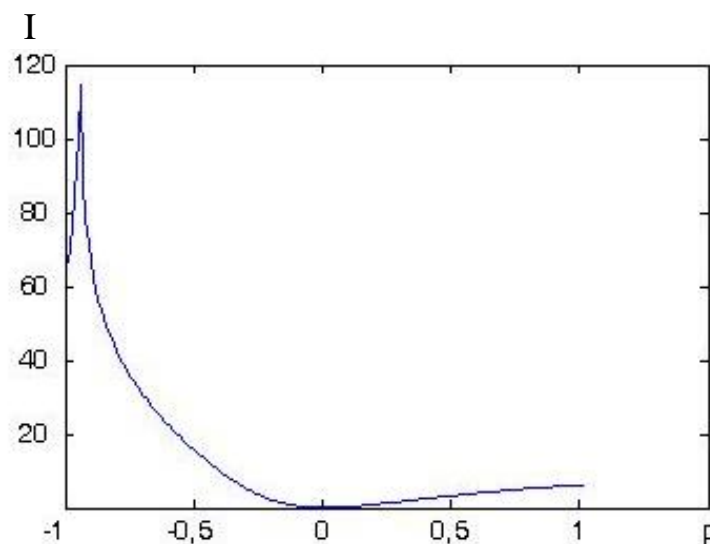


Рисунок 3.10 – Залежність КІ I від горизонтальної похідної  $p$

Як видно з розподілу доцільно працювати в околі максимуму і уникати мінімуму. Розглянемо які додаткові операції необхідно внести у ІТ, щоб працювати в околі максимуму КІ. Для цього пропонуємо такий докроковий алгоритм. У систе-

мі обробки за даними представленими на рис. 3.10 визначимо похідну  $p_{\max}$ , де залежність досягає максимуму. За її значенням оцінимо кут  $\theta_{\max} = \arctg p_{\max}$ . Нехай фотозйомкою отримано базове зображення тріщини  $I_{\lambda 0+}$  та інтенсивність фону. Фотозйомкою під кутом освітлення  $\theta_{1+}$  отримаємо зображення  $I_{\lambda 1+}$ . У системі обробки за формулою (2.5) визначимо похідну  $p_{k_1}$  і за її значенням оцінимо кут  $\theta_2 = \arctg p_{k_1}$ . Другий крок алгоритму полягає у повороті в площині [ZX] джерел світла  $L_0, L_1$  (див. рис. 2.1 та вираз (2.5)) на кут  $\Delta\theta$ . Встановлюємо кут повороту освітлення  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_{\max}$  і повторно знімаємо зображення  $I_{\lambda 0}, I_{\lambda 1}$ . За отриманою інформацією за виразом (2.5), можна обчислити значення похідної  $p_{k_2}$  і оцінити кут  $\phi = \arctg p_{k_2}$ . Далі необхідно скоригувати  $\phi = \phi + \Delta\theta$ , та отримати точнішу оцінку горизонтальної похідної  $p_{k_3} = \tg\phi$ .

### **3.5. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за її стереозображенням, індукційована відхиленням напрямків освітлення від технологічно запланованих значень**

Представимо аналіз точності методу тривимірної реконструкції поверхні за стереозображенням (п. 2.2.).

Як правило визначення глибини дефекту відбувається з певною похибкою, яка в першу чергу обумовлена спотворенням зображень викликаним неточністю встановлення кожного з двох напрямків освітлення поверхні дефекту.

При практичній реалізації цієї реконструкції необхідно врахувати таку похибку. Це складне завдання. Тому щоб досягти його успішного виконання і спростити слід залучити до вирішення цієї проблеми результати аналізу точності, якій представлено в п. 3.1.

Проведемо оцінку похибки визначення похідних поверхні при її реконструкції за парою зображень в залежності від вертикального та бокового напрямку освітлення.

Нехай в системі освітлення застосовано напрямки освітлення  $L_0 = (0,0,1)$ ,  $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ . Застосуємо в наступному аналізі точності систему координат ZUY (рис. 2.8.в). В цій системі одна з координат вертикальна координата  $u$  в площині XY, а друга координата має в площині XY напрямок  $v$ , який співпадає з  $U = (L_{x1}, L_{y1})$  (рис. 2.8 в). Схема оцінки точності є такою.

1. Оскільки  $U$  відоме, то в цьому випадку похідна  $h$  реконструюється за виразом (2.26). 2. Похідна  $q$  реконструюється за виразом (2.23). 3. Виконується реконструкція глибини  $z$  (2.28). 4. На основі глибини  $z$  виконується визначення похідної  $g = \frac{\partial z}{\partial v}$  – по напрямку  $v$  (рис. 2.8 а). 5. У просторі XYZ для опису вектора  $L$  скористаємось формою (1.28). Поворот прямокутної системи координат у просторі XYZ навколо осі OZ на кут  $\varphi$  приводить до тривимірного простору ZUV (рис. 2.8а). Цей поворот системи координат, реалізований для ПВП та ПБП, залишає незмінними параметри  $P$  і  $Q$  вектора  $L$ , який представляє (вертикальний або боковий) напрямок світла в тривимірному просторі ZUV, а також похибки  $\Delta P$  і  $\Delta Q$ . 6. Виконаємо підставлення  $h = p$ ,  $g = q$ . 7. На основі п. 5, п. 6 кількісну оцінку робочих діапазонів реконструкції похідних  $h$  і  $g$  отримаємо використовуючи дані попереднього аналізу точності для СТРТЗ представлені на рис. 3.3, рис. 3.5, рис. 3.6, рис. 3.8 та рис. 3.9.

Таким чином реконструйовані дані похідних  $h$  і  $g$  можна аналізувати на відсутність появи заборонених значень застосувавши кількісну оцінку робочих діапазонів реконструкції похідних  $p$  і  $q$  в СТРТЗ.

### **3.6. Оцінка похибки визначення глибини пітинга при тривимірній реконструкції за його 2D зображенням**

В неруйнівному контролі конструкцій, уражених пітинговою корозією останнім часом для опису та відновлення форми пітинга використовують методи тривимірної реконструкції [2-5, 13, 124, 125]. Одним з методів отримання тривимірної форми предмету на основі аналізу його зображень є запропонований

в [109] метод 3D реконструкції, який оснований на ламбертівській моделі відбиття світла від поверхні конструкції Як правило визначення глибини пітинга відбувається з певною похибкою. Аналіз похибки обрахунку глибини тріщини, яка індукована відхиленням напрямку світла від технологічно запланованого, наведений у роботі [123]. Представлений аналіз є специфічним бо орієнтований на тріщину. Специфіка аналізу не дозволяє використати представлені результати для пітинга. З розгляду умов реалізації алгоритму 3D реконструкції за 2D зображенням видно, що оцінка глибини пітинга, окрім визначення напрямку освітлення, потребує врахування впливу на її похибку таких параметрів ламбертівської моделі відбиття, як інтенсивність фону та дифузного коефіцієнта відбиття поверхні.

Представлені у підрозділі результати подані на основі робіт [139, 121, 122].

Реконструкцію глибини пітинга [109] розглянуто в два етапи. На першому знайдемо переріз пітинга  $z$  у найбільш інформативній зоні, де він проходить через точку максимальної глибини. На другому, базуючись на отриманій оцінці перерізу  $z$ , визначено повномасштабну оцінку 3D поверхні пітинга шляхом апроксимації поверхні сегментами сфери. Як видно з наведеної тривимірної реконструкції в її основі лежить визначення вертикального перерізу пітинга. Проаналізуємо точність реконструкції вертикальної похідної в вертикальному перерізі пітинга. Використовуючи для освітлювання пітинга джерело світла з такими параметрами, що  $L = (0, \cos \varphi, \sin \varphi)$ , отримаємо його зображення. На обробленому низькочастотним фільтром у горизонтальному напрямку сегменті зображення, з якого виділено вертикальний переріз пітингу, діє спрощувальне припущення, що  $p(x, y) = 0$ . В цьому випадку квадратичне рівняння реконструкції вертикальної похідної представлено виразом (1.13), а його корні стандартно визначаються як  $q_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a} \sqrt{b^2 - 4ac}$ . Для спрощення сприйняття в наступному аналізі індексацію нехтуємо і приймаємо  $q_{1,2} \rightarrow q$ . Проаналізуємо точність реконструкції вертикальної похідної  $q$ , як функції параметрів напрямку освітлення, фону  $I_a$  та зваженого дифузного коефіцієнту



1. Будемо вважати, що параметр  $q$  є функцією кута освітлення, тобто  $q = q(\varphi)$ . Використавши підстановку  $Q = \text{ctg}\varphi$  у випадку  $\pi/2 \geq \varphi > 0$ , отримаємо нові значення параметрів  $a = \xi^{-2} - \frac{Q^2}{Q^2 + 1}$ ;  $b = 2\frac{Q}{1 + Q^2}$ ;  $c = \xi^{-2} - \frac{1}{Q^2 + 1}$ , де параметр  $\xi$  описано у виразом (1.13). Таким чином отримано функцію  $q = q(Q)$ , розклад якої в ряд Маклорена є таким

$$q(Q) = q(0) + Qq'(0) + Q^2 \frac{1}{2!} q''(0) + \dots, \quad (3.53)$$

де  $q(0) = \sqrt{\xi^2 - 1}$ . Щоб визначити значення функції  $q'(0)$  її будемо розглядати, як складну функцію, для якої, при диференціюванні, виникають похідні  $a'(Q)$ ,  $c'(Q)$ ,  $[b^2]'(Q)$ ,  $b'(Q)$ . При визначенні цих похідних слід звернути увагу, що вони також теж є складними функціями, бо параметри  $a(Q^2)$ ,  $b^2(Q^2)$ ,  $c(Q^2)$  залежать від  $Q^2$ , і тому при диференціюванні з'являється коефіцієнт  $2Q$ . Внаслідок цього  $a'(0) = c'(0) = [b^2]'(0) = 0$ . Підставляючи ці обчислені результати отримуємо  $q'(0) = -b'(0)/2a(0) = -\xi^2$ . Тоді вираз (3.53) з врахуванням одержаного, а також нехтуючи малими членами, починаючи з третього, отримуємо як

$$q(Q) = \sqrt{\xi^2 - 1} - Q\xi^2. \quad (3.54)$$

Крім впливу на напрямок освітлення фотозйомки у площині YOZ, який формується параметром  $Q$  (1.28) існують незаплановані зміни напрямку освітлення у площині XOZ. Проаналізуємо, як зміни освітлення впливаю на реконструкцію вертикальної похідної. Оскільки вертикальний кут освітлення у площині XOZ замість  $\theta = \pi/2$  стає іншим відбувається зміна параметра  $P$ . Нехай такі умови фотозйомки виконуються для дифузного об'єкта. В цьому випадку вертикальну похідну  $q$  необхідно реконструювати користуючись виразом (1.8). Нехай для дифузного об'єкта в зоні наступної реконструкції  $p=0$ . Можна показати, що шляхом алгебраїчних перетворень з виразу (1.8)

отримується квадратичне рівняння корні якого є функцією  $q_{1,2} = f(P, Q)$ , від двох незалежних змінних, параметрів  $P, Q$ . Цю функцію можна розкласти в ряд Маклорена [108]. Зауважимо, що в даному випадку в (1.29) замість функції  $\dot{r}_{1,2} = f(P, Q)$  представлено функцію  $q_{1,2} = f(P, Q)$ . Визначимо основні значущі члени ряду (1.29). Шляхом диференціювання  $f(P, 0)$  по параметру  $P$  отримуємо

$$\frac{\partial}{\partial P} f(P, 0) \Big|_{P=0} = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial P^2} f(P, 0) \Big|_{P=0} = -\frac{\xi^2}{\sqrt{\xi^2 - 1}}. \quad (3.55)$$

Підставляючи значення похідних (3.55), а також значення вертикальної похідної  $q(0, 0) = \sqrt{\xi^2 - 1}$  (з застосуванням позначення  $q(P, Q) = f(P, Q)$ ), похідної  $\frac{\partial}{\partial Q} f(0, Q) \Big|_{Q=0} = -\xi^2$  у вираз (1.29) та нехтуючи малозначущими членами отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з застосуванням позначення  $q(P, Q) = f(P, Q)$ , у такому вигляді [139]

$$q(P, Q) = \sqrt{\xi^2 - 1} - Q\xi^2 - \frac{P^2\xi^2}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} + \dots \quad (3.56)$$

Наступний етап отримання наближення розвинення в ряд Маклорена полягає у порівнянні другого та третього члена (3.56). Зробимо це з врахуванням технічних характеристик ПБП (абсолютні похибки рівні  $\Delta P_0 = \pm 0,01$ ,  $\Delta Q_0 = \pm 0,01$ ). Наведені кількісні значення параметрів дозволяють нехтувати третім членом. Таким чином остаточно отримуємо

$$q(Q) = \sqrt{\xi^2 - 1} - Q\xi^2. \quad (3.57)$$

Щоб провести аналіз впливу умов освітлення на якість реконструкції вертикальної похідної приймемо що існує похибка формування запланованого значення параметра  $Q$ , тобто  $Q_1 = Q + \Delta Q$ . Зміни параметра  $Q$  викликають зміни напрямку освітлення

$$L = \left(0, \frac{-Q}{\sqrt{Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{Q^2 + 1}}\right) \rightarrow \left(0, \frac{-Q_1}{\sqrt{Q_1^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{Q_1^2 + 1}}\right),$$

де  $Q_1 = -\text{ctg}\varphi_1$ , тут  $\varphi_1$  – фактичний кут напрямку світла в площині YOZ. В цьому випадку вираз (3.54) набуває вигляду  $q(Q_1) = \sqrt{\xi^2 - 1} - Q\xi^2 - \Delta Q\xi^2$ . Виходячи з отриманого виразу та виразу (3.57), визначимо загальну оцінку якості реконструкції вертикальної похідної, а саме її абсолютну похибку

$$\Delta q = q(Q_1) - q(Q) = -\Delta Q\xi^2. \quad (3.58)$$

Використовуючи абсолютну похибку реконструкції вертикальної похідної пітинга (3.58) визначимо оцінку якості реконструкції глибини пітинга  $\Delta z_U$ . Ця оцінка знаходиться інтегральним накопиченням абсолютної похибки  $\Delta q$  при  $\xi = \xi(x_e, y)$ , де  $x_e$  – горизонтальна координата перерізу, починаючи від одного з країв пітинга  $z_e(x_e, y_e)$  до точки максимальної глибини пітинга  $z(x_e, y_U)$  (далі в цьому аналізі для спрощення координату  $x_e$  опущено)

$$\Delta z_U = \Delta Q \int_{y_e}^{y_U} \xi^2(y) dy, \quad (3.59)$$

де  $\xi = \xi(I_\lambda(y))$  обчислюється з виразу (1.13). Зображення  $I_\lambda$  можна отримати штучно, змодельовавши процес відбиття від поверхні. Для цього задамося диференціальною аналітичною моделлю вертикального перерізу пітинга  $q=q(y)$ . В цьому випадку відповідна аналітична модель зображення вертикального перерізу пітинга, визначена виразом (1.8), має вигляд

$$I_\lambda = I_a + \iota \frac{qQ + 1}{\sqrt{(Q^2 + 1)(q^2 + 1)}}, \quad (3.60)$$

де  $y \in [y_e, y_U]$ . Будемо вважати, що в (3.60) параметр  $\iota = I_{p\lambda} k_d$  та інтенсивність фону  $I_a$  представлені дійсними значеннями. З виразу (3.60) випливає, що параметр  $\xi$  має такий вигляд

$$\xi = \sqrt{(Q^2 + 1)(q^2 + 1)} / (qQ + 1). \quad (3.61)$$

Підставивши вираз (3.61) в формулу (3.59) отримаємо

$$\Delta z_U = \Delta Q(Q^2 + 1) \int_{y_e}^{y_U} \frac{q^2 + 1}{(qQ + 1)^2} dy. \quad (3.62)$$

Нехай  $Q \ll 1$ . В перерізі диференціальна аналітична модель пітинга

$$q = ky, \quad (3.63)$$

де  $y_U = 0$ ,  $y_e < 0$ . За таких умов (3.62) приймає вигляд

$$\Delta z_U = \Delta Q \int_{y_e}^0 (k^2 y^2 + 1) dy. \quad (3.64)$$

Виконуючи операцію інтегрування в (3.64), остаточно отримуємо значення абсолютної похибки визначення глибини пітинга

$$\Delta z_U = -\Delta Q \left[ \frac{1}{3} k^2 y_e^3 + y_e \right]. \quad (3.65)$$

За прийнятих умов (3.63) глибина пітинга складає

$$z_{\max} = \int_{y_e}^0 ky dy = -\frac{1}{2} k y_e^2. \quad (3.66)$$

На основі (3.65) та (3.66) відносна похибка  $\delta z_U$  визначення глибини пітинга рівна

$$\delta z_U = \frac{\Delta z_U}{z_{\max}} = -2\Delta Q \frac{q_e^2 + 3}{3q_e}, \quad (3.67)$$

де  $q_e = -ky_e > 0$ . Результати розрахунків розподілу  $\delta z_U$  з кількісним аналізом виконання умови  $|\delta z_U| \leq 0,1$  представлено на рис. 3.11а. Тут точки  $(\Delta Q, q)$ , в яких не можна реконструювати похідну  $q$ , коли виконується умова  $\delta z_U > 0,1$ , представлено площиною  $\delta z_U = 0,1$ , а точки  $(\Delta Q, q)$ , в яких виконується умова  $\delta z_U < -0,1$ , представлено площиною  $\delta z_U = -0,1$ . З рис. 3.11а видно, що між площинами реконструкція виконується з заданою точністю, а також існують зони значень точок  $(\Delta Q, q)$ , де точність реконструкції не відповідає заданій. Щоб краще виділити зони реконструкції з заданою точністю і заборонені зони, розподіл відносної похибки визначення глибини пітинга  $\delta z_U$  представлено у бінарній формі на рис. 3.11б. На цьому рисунку точки, в яких можна реконструювати похідні  $q$ , представлено сірим кольором, а точки, в яких не можна реконструювати  $q$  – чорним. З цього рисунку слідує, що для заданої точності  $|\Delta Q| < 0,04$  діапазон точок в яких можна реконструювати похідні  $q$  об

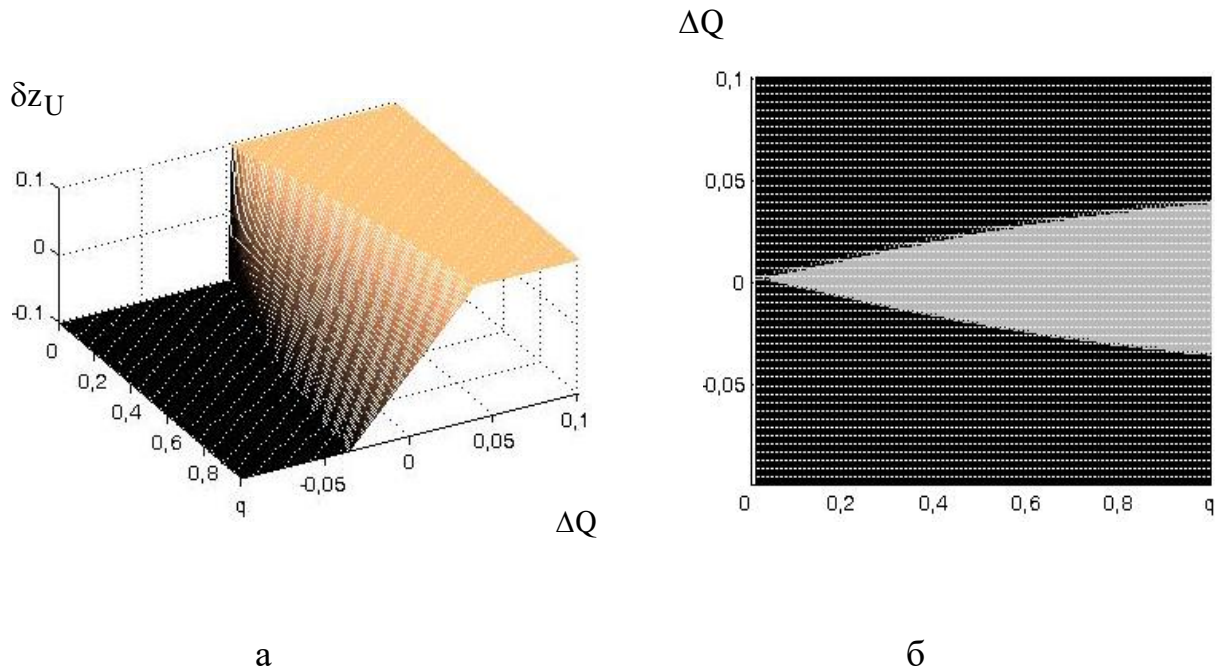


Рисунок 3.11 – Обмежений розподіл відносної похибки визначення глибини пітинга для випадку  $|\delta z_U| \leq 0,1$  (а) та її бінарний вигляд (б)

межено знизу. Щоб визначити існуючі обмеження цього діапазону зверху представимо вираз (3.67) у такій формі

$$q_e^2 + 1,5bq_e + 3 = 0,$$

де  $b = \delta z_U / \Delta Q$ . Задаючись похибкою  $\Delta Q$ , яку можна технічно забезпечити в оптичному пристрої і  $\delta z_U = 0,1$ , знайдемо корні цього рівняння  $q_{e1}$ ,  $q_{e2}$  та діапазон безвартної реконструкції вертикальної похідної

$$D = q_{e1} / q_{e2} = y_{e1} / y_{e2}.$$

З одержаних залежностей  $q_{e1} = f_1(\Delta Q)$ ,  $q_{e2} = f_2(\Delta Q)$ ,  $D = f_3(\Delta Q)$ , які приведені на рис. 3.12, можна зробити висновок, що для того щоб забезпечити практично безвартну реконструкцію глибини пітинга з похибками  $|\delta z_U| \leq 0,1$  і  $|\Delta Q| \leq 0,01$  (практична реалізація такої оптики представлена в п 2.1.1.2) параметри системи обробки зображень повинні лежати в діапазоні мінімального  $q_e \in [0,2, 14,8]$  і відповідно  $D=74$ .

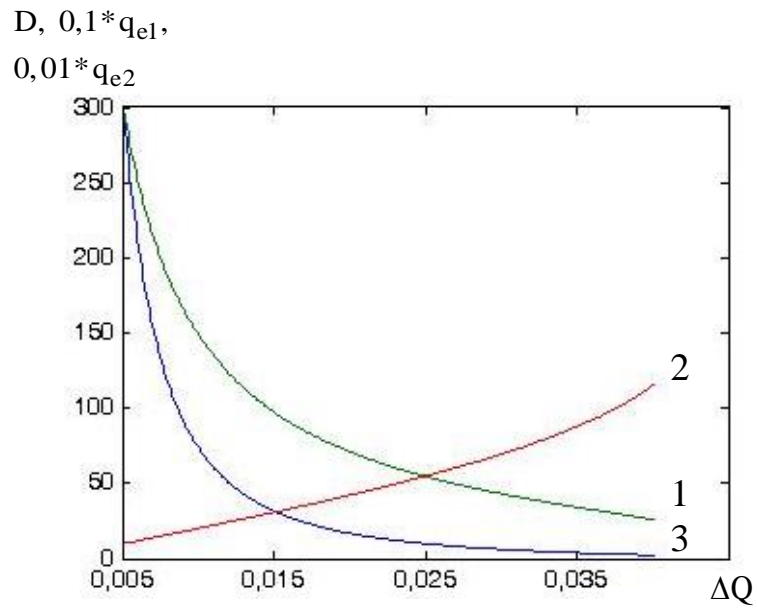


Рисунок 3.12 – Залежність параметрів максимального значення  $q_{e1}$  (крива 1) мінімального  $q_{e2}$  (крива 2) та діапазону  $D$  (крива 3) від величини абсолютної похибки  $\Delta Q$

Визначимо абсолютну похибку реконструкції глибини вертикального перерізу пітинга  $\Delta q$ , яка обумовлена впливом параметрів фону та дифузного коефіцієнту. Нехай під час реконструкції отримана оцінка параметрів  $I_{a0}, \tau_0$ , а дійсні значення цих параметрів є  $I_a, \tau$ . Нехай реконструкцією отримана оцінка  $q(I_{a0}, \tau_0)$ . Застосуємо для оцінки точності розклад функції  $q = f(I_a, \tau)$  в ряд Тейлора

$$f(I_a, \tau) = q_0 + \sum_{u,k=1}^2 \frac{\Delta^k u}{k!} \left\{ \frac{\partial^k}{\partial u^k} f(I_a, \tau) \right\}_{\substack{I_a=I_{a0} \\ \tau=\tau_0}} + \frac{\Delta I_a \Delta \tau}{2!} \left\{ \frac{\partial}{\partial I_a} \frac{\partial}{\partial \tau} f(I_a, \tau) \right\}_{\substack{I_a=I_{a0} \\ \tau=\tau_0}} + \dots, \quad (3.68)$$

де  $q_0 = q(I_{a0}, \tau_0)$ ,  $u \in \{I_a, \tau\}$  і  $\Delta u \in \{\Delta I_a, \Delta \tau\}$ . Для оцінки  $q = f(I_a, \tau)$  (3.68) шляхом диференціювання знаходиться

$$\Delta q_{I_a} = \Delta I_a \left\{ \frac{\partial}{\partial I_a} f(I_a, \tau) \right\}_{\substack{I_a=I_{a0} \\ \tau=\tau_0}} \approx \delta_{I_a} \eta \xi_0^3 \varepsilon, \quad (3.69)$$

де  $\delta_{I_a} = (I_a - I_{a0}) / I_a$  – відносна похибка оцінки фону,  $\eta = I_{a0} / \tau_0$ ;

$\xi_0 = \tau_0 / (I_{\lambda 0} - I_{a0})$ ;  $\varepsilon = (\xi_0^2 - 1)^{-1/2} - 2Q$ . Аналогічно знаходимо

$$\Delta q_t = \Delta t \left\{ \frac{\partial}{\partial t} f(I_a, t) \right\} \Big|_{I_a=I_{a0}}^{t=t_0} \approx \delta_t \xi_0^2 \varepsilon, \quad (3.70)$$

де  $\delta_t = (t - t_0)/t$  – відносна похибка оцінки зваженого дифузійного коефіцієнта. Оскільки в виразах (3.69) та (3.70) фігурує параметр  $\xi_0$ , використовуючи умову  $p=0$ , визначимо цей параметр

$$\xi_0 = \frac{\sqrt{q^2 + 1}}{\sin \varphi - q \cos \varphi}. \quad (3.71)$$

Нехтуючи в виразі (3.68) малими членами, отримуємо наближення розвинення в ряд Тейлора, з якого, з використанням підставлення (3.69), (3.70), визначимо загальну оцінку якості реконструкції вертикальної похідної  $\Delta q(I_a, t) = q(I_a, t) - q(I_{a0}, t_0) = \Delta q_{I_a} + \Delta q_t$ . На основі цього визначено відносну похибку обрахунку вертикальної похідної

$$\delta q = \delta q_{I_a} + \delta q_t, \quad (3.72)$$

де  $\delta q_{I_a} = \delta_{I_a} \eta \varepsilon \xi_0^3 / q$  і  $\delta q_t = \delta_t \xi_0^2 \varepsilon / q$  – відповідно відносна похибка визначення вертикальної похідної під впливом фону та зваженого дифузійного коефіцієнту. Кількісну оцінку  $\delta q$  отримано для випадку коли кут освітлення приймає  $60^\circ$ ,  $\eta = 0,1$  і діє припущення, що  $\delta_{I_a} = \delta_t$ . На рис. 3.13 представлено розподіл відносної похибки визначення вертикальної похідної  $\delta q$  в залежності від  $\delta_{I_a}$  та  $q$ . В точках  $(\delta_{I_a}, q)$ , в яких похибка  $\delta q(\delta_{I_a}, q) < -0,15$ , отримання достовірних результатів визначення вертикальної похідної приймається неможливим. З кількісних розрахунків оцінки похибки визначення глибини пітинга ці точки вилучено, а на рис. 3.13 представлено площиною  $\delta q = -0,15$ . Для вибору найбільш прийнятних параметрів реконструкції необхідно працювати з експлуатаційно привабливим значенням відносної похибки фону  $\delta_{I_a} = -0,1$ . Коли відносна похибка фону  $\delta_{I_a} = -0,1$ , встановлено діапазон реконструкції  $D = [1,47; 2,9]$ . Як видно отримано незначний діапазон реконструкції  $D$ . Тому для розширення меж діапазону реконструкції  $D$  пропонується наступний

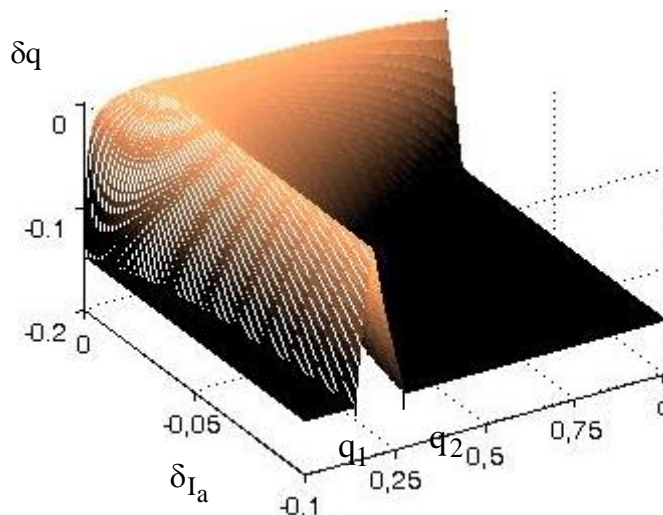


Рисунок 3.13 – Залежність відносної похибки визначення вертикальної похідної  $\delta q$  від  $\delta I_a$  та  $q$

двокроковий алгоритм. Нехай при використанні кута  $\varphi_1$  забезпечується діапазон  $D_{\varphi_1}$ . Нехай реконструйовано оцінку  $\tilde{q} \notin D_{\varphi_1}$ . Залишаємо положення площини зразка  $XOY$  незмінним і нахиляємо джерело освітлення по відношенню до площини  $XOY$  під кутом  $\varphi_2$ , таким, що забезпечує

$$\Delta q(I_a, t) = \Delta q_{I_a} + \Delta q_t = 0. \quad (3.73)$$

Підставивши складові  $\Delta q_{I_a}$ ,  $\Delta q_t$  в рівняння (3.73) отримаємо

$$(\xi_0^2(q) - 1)^{-1/2} - 2Q = 0. \quad (3.74)$$

Щоб визначити кут  $\varphi_2$  підставимо значення параметрів  $\xi_0$ ,  $Q$  і  $q$  в (3.74) та проведемо алгебраїчні перетворення одержаного виразу, що у підсумку дасть рівняння четвертого степеня  $4Q^4 + 8Q^3\tilde{q} + 3\tilde{q}^2Q^2 + 2\tilde{q}Q - 1 = 0$ . Даний вираз дозволяє обчислити в системі МАТЛАБ його корені  $Q_{1,2,3,4}$ . Один з коренів дозволяє встановити кут нахилу джерела світла  $\varphi_2$ , необхідний для отримання зображення  $I_{\lambda_0}(\varphi_2)$ , на основі якого можна провести реконструкцію вертикальної похідної  $q$  з заданою точністю. Під час застосування цього алгоритму було використано два діапазони реконструкції  $D_{\varphi_1}$ ,  $D_{\varphi_2}$ , на базі



яких було створено розширений діапазон  $D_{\cup} = D_{\varphi 1} \cup D_{\varphi 2}$ . Оскільки для проведення реконструкції глибини пітинга необхідно забезпечити значний діапазон реконструкції вертикальної похідної  $q$ , то необхідно дослідити умови реконструкції в діапазоні  $D_{\cup}$  докладніше і з'ясувати чи достатньо створеного діапазону  $D_{\cup}$  для проведення реконструкції глибини пітинга.

Щоб з'ясувати необхідні умови формування та розширення діапазону реконструкції розрахуємо кількісну оцінку відносної похибки визначення вертикальної похідної  $\delta q$  за виразами (3.71), (3.72). Оцінку  $\delta q$ , як функції  $\delta q = \delta q(\varphi, q)$  отримано для випадку, коли  $\eta = 0,1$  і діє припущення, що  $\delta I_a = \delta I_t = 0,1$ . У вигляді двовимірного масиву цей розподіл відносної похибки визначення вертикальної похідної  $\delta q$  представлено на рис. 3.14 а, в якому точки

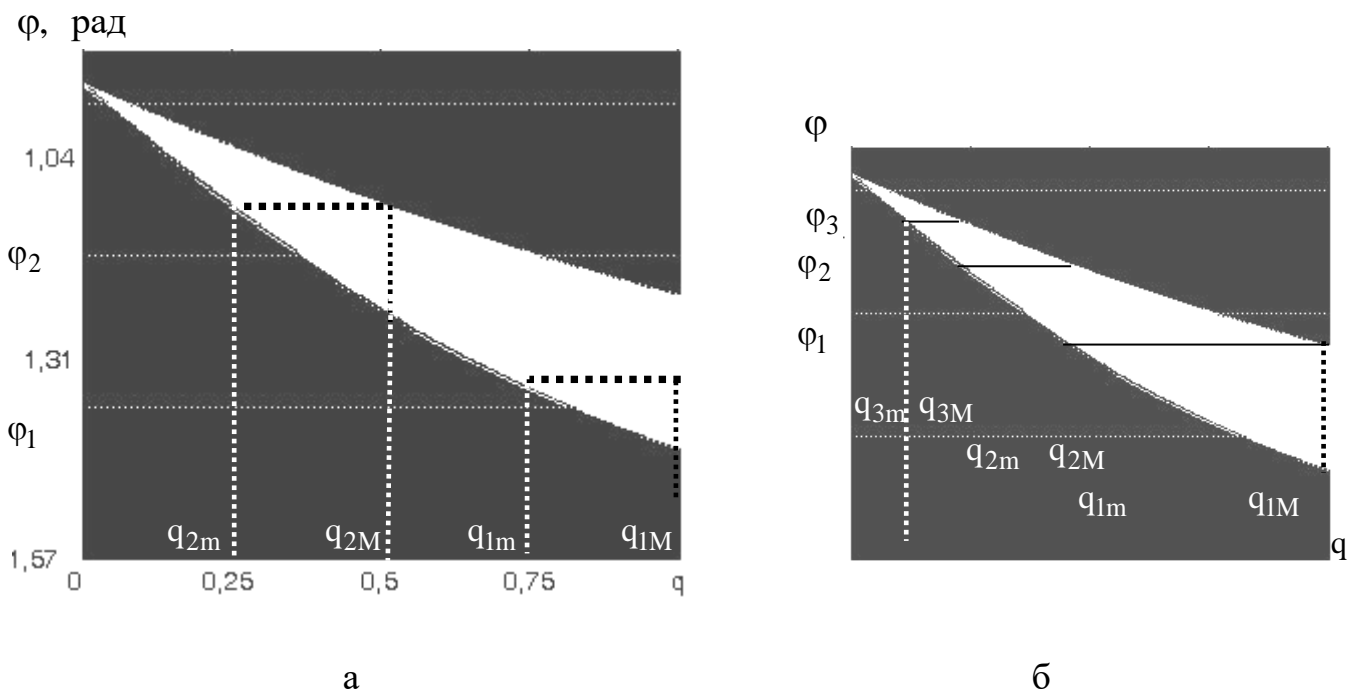


Рисунок 3.14 – Розподіл відносної похибки визначення вертикальної похідної  $\delta q(\varphi, q)$  та приклад двокрокового алгоритму (а). Приклад неперервного діапазону реконструкції (б)

в яких можна реконструювати похідну  $q$  представлено білим кольором, а де не виконується умова  $|\delta q(\varphi, q)| < 0,15$  – чорним. Спираючись на розподіл віднос

ної похибки  $\delta q$  на рис. 3.14 а пунктиром наведені параметри двокрокового алгоритму. Діапазон реконструкції  $[q_{im}, q_{iM}]$ , де  $i=1,2$  відповідає куту  $\varphi_i$ . Як видно в діапазоні  $[q_{2M+1}, q_{1m-1}]$  отримання достовірних результатів визначення вертикальної похідної неможливе.

Щоб уникнути появи діапазону, де заборонено реконструкцію, пропонується застосування освітлення в таких напрямках, які гарантують перекриття діапазонів реконструкції та оптимальне розміщення початкового діапазону. Такий приклад наведено на рис. 3.14 б, де кути  $\varphi_i$  де  $i=1,2,3$  вибрано таким чином, що діапазони реконструкції  $D_{\varphi_i} = [q_{im}, q_{iM}]$ , перекриваються  $D_{\varphi_1} \cap D_{\varphi_2} \neq \emptyset$ ,  $D_{\varphi_2} \cap D_{\varphi_3} \neq \emptyset$ , і тому отримано неперервний діапазон  $[q_{3m}, q_{1M}]$ . Для оптимального розширення загального діапазону при фіксованій кількості кутів  $\varphi_i$  кути пропонується вибрати таким чином, щоб діапазони реконструкції доповнювали один одного  $D_{\varphi_1} \cup D_{\varphi_2} = [q_{2m}, q_{1M}]$ ,  $D_{\varphi_2} \cup D_{\varphi_3} = [q_{3m}, q_{2M}]$ . Зауважимо, що практична реалізація такої операції доповнення потребує додаткових аналітичних та технологічних зусиль необхідних для корекції точності розташування напрямків освітлення.

### 3.7. Висновки

1. В ІТ тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень з метою підвищення надійності застосування її реконструйованого інформаційного ресурсу в технічній діагностиці, використовуючи два підходи аналізу, отримано такі результати.

При аналізі точності розраховано похибки визначення похідних поверхні дефекту, обумовлені відхиленням кожного з трьох напрямків освітлення від технологічно запланованого значення, та встановлені діапазони реконструкції похідних з гарантованою точністю реконструкції. Вперше запропонований алгоритм тривимірної реконструкції поверхні, де реконструкція похідних

визначається по відносним похибкам зображень. Порівняно з попередньою версією 3D реконструкції за тріадою зображень новий метод має в  $\sqrt{2}$  кращу точність реконструкції похідних.

При інформаційному аналізі оцінюється КІ необхідна для визначення поверхні. Для вертикальної тріщини КІ формується похибкою реставрації горизонтальної похідної. Похибка обумовлена спільним впливом відхилення двох напрямків освітлення від технологічно запланованих значень. Розрахований розподіл КІ від горизонтальної похідної має максимум. На цій основі запропонований алгоритм тривимірної реконструкції поверхні. За попередньою версією 3D реконструкції за тріадою зображень визначається горизонтальна похідна. На її основі та на основі відомої горизонтальної похідної максимуму КІ встановлюємо кут повороту освітлення і повторно знімаємо зображення. Знову обчислюємо значення похідної та робимо її кутову корекцію на значення кута повороту.

2. В тривимірній реконструкції поверхні за парою зображень представлено алгоритм операцій, які дозволяють аналізувати точність реконструкції на основі інформації похибок тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень, що дало можливість отримати похибки визначення похідних поверхні обумовлені відхиленням вертикального та бокового напрямків освітлення від технологічно запланованих значень.

3. В тривимірній реконструкції пітинга за одним зображенням розраховано похибки визначення вертикальної похідної в перерізі пітинга, обумовлені відхиленням напрямку освітлення від технологічно запланованого значення, та встановлено діапазон реконструкції максимальних значень вертикальної похідної з гарантованою точністю реконструкції. Розраховано похибки визначення вертикальної похідної індуковані відхиленням параметрів ламбертівської моделі відбиття світла, таких як фон та дифузний коефіцієнт, від дійсних значень та діапазон 3D реконструкції значень вертикальної похідної і методика його збільшення.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПІТИНГІВ

Розділ присвячено застосуванню розроблених в дисертації методів тривимірної реконструкції пітингів за їх 2D зображеннями для оцінки характеристик пітинготривності.

#### 4.1. Інформаційна технологія оцінки тривимірної поверхні пітинга за тріадою зображень поверхні матеріалу

Один із методів неруйнівного контролю пітинготривності елементів трубопроводів [126-129, 111, 113], пов'язаний з дослідженням металографічних зображень, на яких зафіксовано стан поверхні елементів окремих ділянок трубопроводів на їх окремих ділянках [130-132, 101, 48]. Як правило, в результаті обстеження трубопроводу одержуємо великі масиви зображень з дефектами. Візуальна їх неавтоматизована обробка достатньо трудомістка і здебільш несе інформацію про характеристики пітингів лише у площині зображення. Адаптація та застосування сучасних методів тривимірної реконструкції зображень до конкретних задач металографії дають можливість значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени. Зокрема про тривимірну їх структуру, а також оцінити глибину пітинга за його двовимірними зображеннями.

Система отримання і обробки інформації зображень матеріалів з аналізом тривимірної структури поверхні повинна містити джерело світла (систему керування положенням джерела світла) та оптичну систему (наприклад, фотокамери високої роздільної здатності). Досліджуваний зразок освітлюють джерелом некогерентного світла. Відбите від його поверхні світло сприймається фотокамерою і передається для аналізу в комп'ютер. Під час відновлення тривимірної структури поверхні об'єктів, відбите світло від яких потрапило у

фотокамеру, розглядають дифузне і дзеркальне відбиття [100, 133, 134]. Оскільки об'єкти з дифузним відбиттям мають однакову світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, простіші для аналізу та відновлення тривимірної інформації зображень, тому розглянемо їх. Аналізуватимемо тільки ділянки, вкриті продуктами корозії.

Серед інформаційних технологій тривимірної реконструкції (до яких входять тривимірна реконструкція за стереозображенням [48] та за моделлю відбиття [101, 102]) перспективнішим є відновлення форми пітинга за тріадою зображень (п 2.1.1.1).

Очевидно, що на практиці постає питання як застосувати розроблені методи та алгоритми неруйнівного контролю стану поверхні, ураженої корозійними пітингами, а зокрема тривимірно реконструювати пітинга, та оцінювати його глибину за результатами аналізу тріади цифрових зображень його поверхні.

Алгоритм фотозйомки поверхні корозійного фітинга (основні елементи техніки освітлення представлені на рис. 2.1, рис. 2.2, рис. 2.3, рис. 2.4) та тривимірної реконструкції складається з таких операцій: вимкнено джерела світла  $L_{S1}, L_{S2}$ ; увімкнено джерело світла  $L_{S0}$ ; відбувається фотозйомка зображення  $I_{\lambda 0} = I_{\lambda 0}(L_{S0})$  фіксованою камерою П; сформоване штучне затінення зразка з пітингом; здійснюється фотозйомка затіненого зображення  $I_{\lambda 0} = I_a$  камерою П; знято затінення; вимкнено джерела світла  $L_{S0}, L_{S2}$ ; увімкнено джерело світла  $L_{S1}$ ; відбувається фотозйомка зображення  $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1}(L_{S1})$  камерою П; вимкнено джерело світла  $L_{S0}, L_{S1}$ ; увімкнено джерело світла  $L_{S2}$ ; фотозйомкою формується зображення  $I_{\lambda 2} = I_{\lambda 2}(L_{S2})$  камерою П; двокроковим алгоритмом, який описано в п. 2.1.4. обчислюємо похідні  $p, q$  згідно з (2.9), (2.10), (2.29, 2.30), оцінено глибину пітинга  $z_{ik}$  за виразом (2.31). Для апробації алгоритму реконструкції 3D пітинга використовували фотоінформацію отриману на електрозварній трубі для газонафтопродуктогонів (марка сталі: 17ГС). Для фотозйомки пітинга, дислокованого на трубі, використовували кольорову фотокамеру 10mp CANON EOS 40D Body. Під час

першої фотозйомки тріади зображень забезпечували напрямок освітлення джерелом світла з такими координатами  $L_0 = (0,0,1)$ ,  $L_{1+} = (0,17;0;0,98)$ ,  $L_{2+} = (0;0,17;0,98)$ , що відповідає куту  $\theta = \phi = 80^\circ$ . Отримали тріаду зображень  $I_{\lambda 0}(L_0), I_{\lambda +}(L_{1+}), I_{\lambda 2+}(L_{2+})$ , де  $\{I_{\lambda m} | \lambda \in \{r, g, b\}; m \in \{0, 1+, 2+\}\}$ . Зауважимо, що обстеження компонент  $\{I_{\lambda m} | \lambda \in \{r, g, b\}\}$  виявило, що кольорові компоненти практично пропорційні одна одній, а найбільшу інтенсивність має червона компонента  $I_{rm}$ . На основі отриманої інформації (червона компонента) за виразами (2.29 і 2.30) системою обробки розрахували масиви параметрів  $s, t$ . В масивах  $s, t$  знайдемо максимальний елемент  $s_{ik, \max}$ . У точці  $(i, k)$  обчислили значення похідної  $p_{ik, \max}$  і визначили кут  $\theta_1 = 65^\circ$ , за яким уточнили значення кута освітлення  $\theta_{\max} = 70^\circ$ , необхідного для повторної фотозйомки зображень  $I_{\lambda 1}, I_{\lambda 2}$ . Таким чином, під час повторної фотозйомки забезпечували напрямок освітлення джерелом світла з такими координатами:  $L_1 = (0.34;0;0,94)$ ,  $L_2 = (0;0,34;0,94)$ . Отримали тріаду зображень  $I_{\lambda m}(L_m)$ , де  $\{I_{\lambda m} | \lambda \in \{r, g, b\}\}$ ,  $m=0,1,2$ . Рис. 4.1а– с ілюструє напівтонову проекцію  $I_{gm}$ , кольорових зображень пітинга. Окрім того, на одному з них (рис. 4.1,с) розташована метрична біла смуга з міліметровими рисками. Зіставляючи розміри об'єктів у міліметрах і пікселях, можна оцінити один з параметрів реконструкції, зокрема крок  $\Delta x = \Delta y = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ mm/pixel}$ .

Для визначення інтенсивності фону  $I_a$  використовували інформацію з базового зображення  $I_{\lambda 0}$  зі штучним затіненням пітинга прямокутником, просторове положення якого над пітингом, а отже і положення тіні, контролювали системою обробки. На рис. 4.1d зображена напівтонова проекція  $I_{ga}$ .

На основі компонент  $I_{rm}$ ,  $m=0,1,2$ , а також оцінки червоної компоненти інтенсивності фону  $I_{ra}$  за запропонованим алгоритмом системою обробки інформації реконструювали оцінки похідних

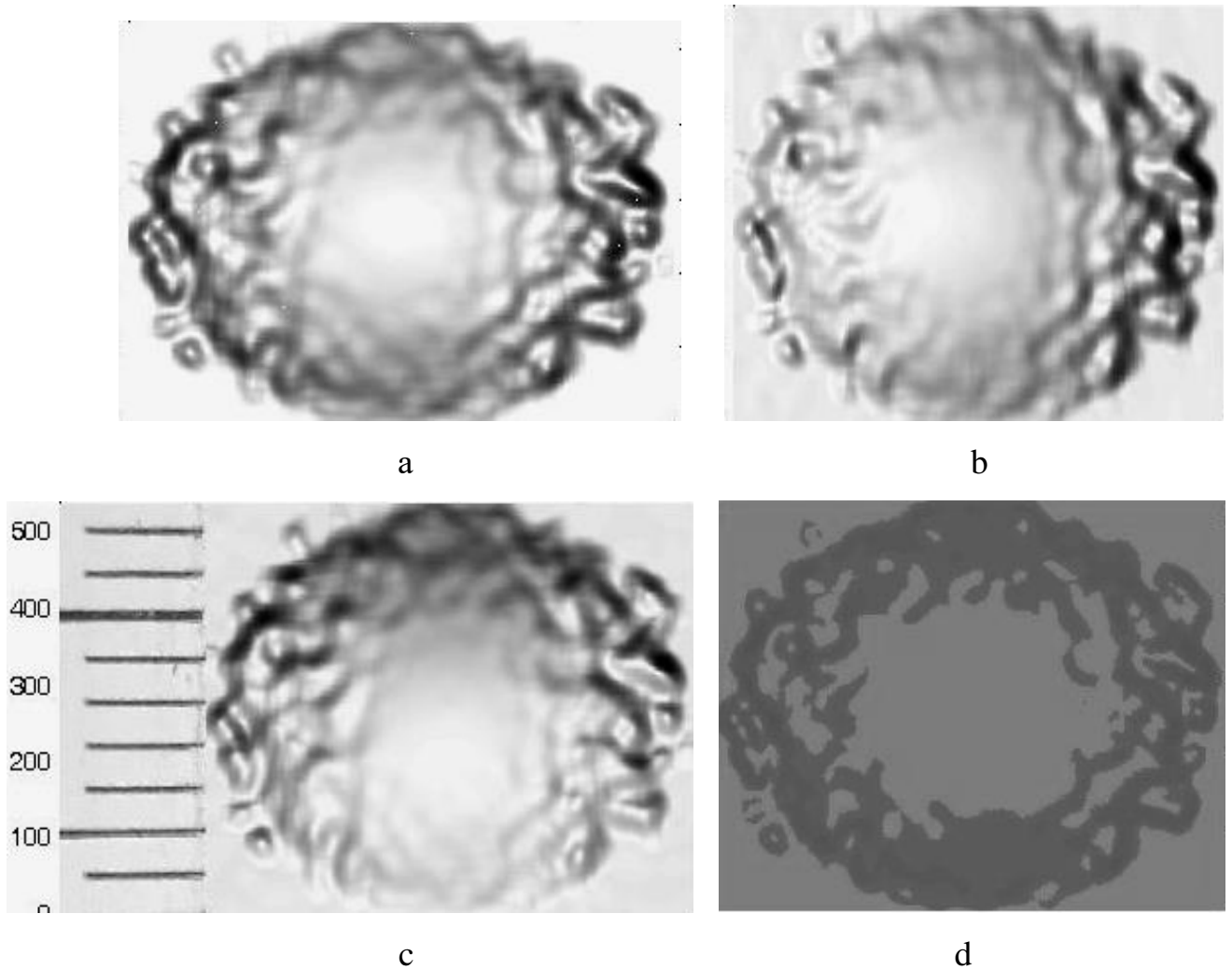


Рисунок 4.1 – Тріада зображень пітинга під різними кутами освітлення (a, b, c) та інтенсивність фону (d)

$$p_{ik} = 2,74 - \frac{I_{r1,ik} - I_{ra,ik}}{0,34 (I_{r0,ik} - I_{ra,ik})}, \quad (4.1)$$

$$q_{ik} = 2,74 - \frac{I_{r2,ik} - I_{ra,ik}}{0,34 (I_{r0,ik} - I_{ra,ik})},$$

де  $i = \overline{1,732}$ ,  $k = \overline{1,532}$ .

За реконструйованими масивами значень похідних  $p$ ,  $q$  (4.1), кроком  $\Delta x$  та апріорі заданим значенням  $z_{11} = 0$  за виразами (2.31) у системі обробки інформації реконструювали масив глибини пітингового пошкодження в досліджуваній точці. Результати реконструкції подано на рис. 4.2.

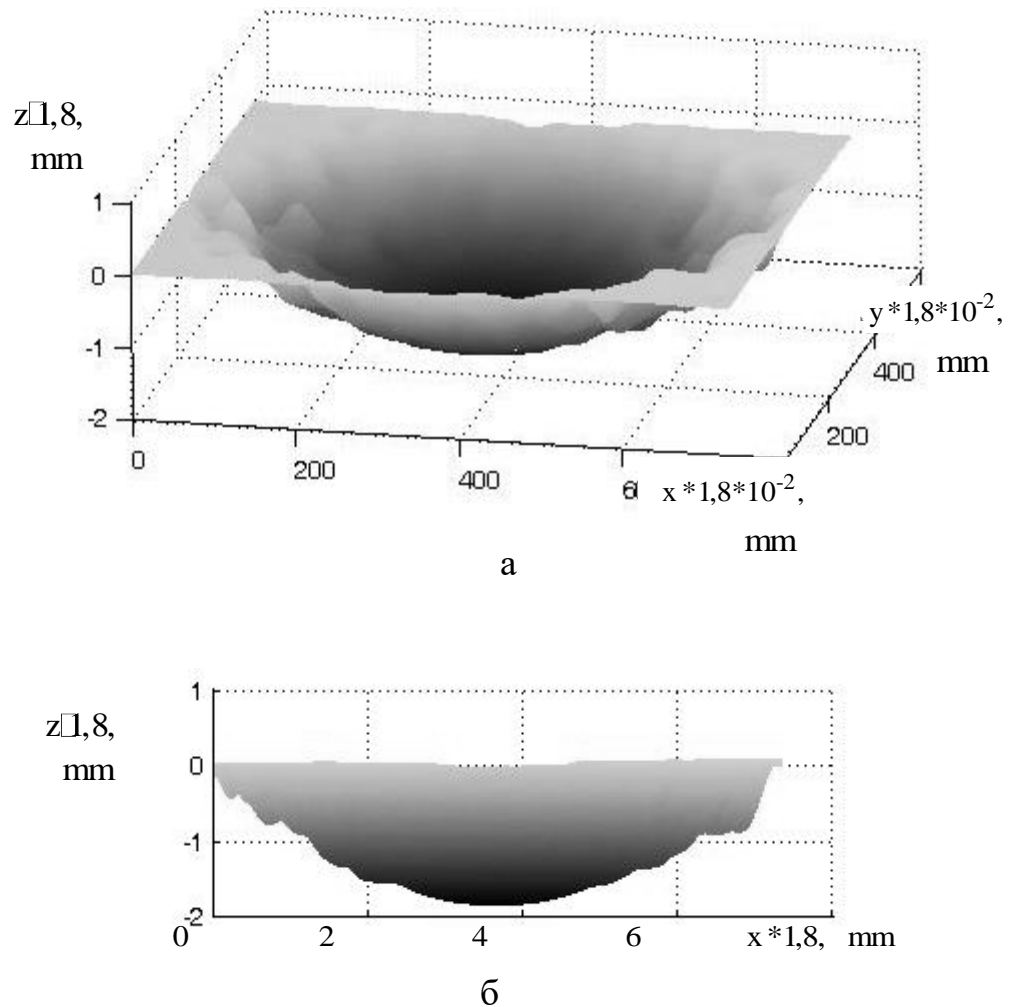


Рисунок 4.2 – Реконструйований пітинг (а – перспектива огляду зверху, б – проекція в площині [XZ])

#### 4.2. Інформаційна технологія тривимірної реконструкції пітингів за 2D зображенням

Існує цілий ряд систем обробки зображень, що застосовуються при розв'язанні прикладних завдань неруйнівного контролю стану елементів конструкцій, уражених корозійними дефектами, і в тому числі пітингами. Особливість таких СОЗ полягає в тому, що в них використовуються різні ІТ [1, 2, 4, 124, 125, 135, 104]. Так один з напрямків досліджень дефектостійкості трубопроводу ґрунтується на візуальній неавтоматизованій обробці зображень [127]. Така ІТ є достатньо трудомістка і здебільш дає інформацію про



характеристики дефектів лише у площині зображення. СОЗ з застосуванням автоматизованих ІТ тривимірної реконструкції у випадку неруйнівного контролю дефектотривності елементів трубопроводів, дають можливість значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени, зокрема про їх тривимірну структуру, а також оцінити глибину дефекту, за його двовимірними зображеннями. Такі системи з аналізом тривимірної структури поверхні повинні містити джерело світла та фотокамеру. Досліджуваний зразок освітлюють джерелом некогерентного світла. Відбите від його поверхні світло сприймається фотокамерою і передається для аналізу в комп'ютер. Під час відновлення тривимірної структури поверхні об'єктів, відбите світло від яких потрапило у фотокамеру, розглядають як дифузне так і дзеркальне відбиття [99, 134]. Оскільки об'єкти з дифузним відбиттям мають однакову світлову інтенсивність у всіх напрямках спостереження, тому в роботі розглянемо їх 3D реконструкцію. Аналізуватимемо тільки ділянки, вкриті продуктами корозії. Серед інформаційних технологій тривимірної реконструкції (до яких входять 3D реконструкція за стереозображенням [1, 104] та за моделлю відбиття [2, 136, 106, 137] перспективним, з позиції технологічності реалізації ІТ, видається відновлення форми пітинга за одним зображенням [137].

Метою даного підрозділу є перевірка нової ІТ неруйнівного контролю стану поверхні, ураженої корозійними пітингами, а зокрема тривимірною реконструювати пітинг, та оцінити його глибину за результатами аналізу цифрового зображення його поверхні на основі двоетапної процедури.

Опис двоетапної інформаційної технології представлено у п. 2.4.1.

Представимо розроблену ІТ оцінки глибини пітинга за зображенням поверхні матеріалу на рис. 4.3. Для 3D реконструкції використовували фотоінформацію (напрямок освітлення джерелом світла  $L = (0; 0,88; 0,47)$ , кут  $\varphi = 0,49$ ) пітинга, дислокованого на трубі зі сталі марки: 17ГС. На зображенні пітинга І горизонтальну дислокацію фрагмента реконструкції  $I_p$ , візуально окреслено білою штриховою лінією, і проведена його низькочастотна фільтрація

у горизонтальному напрямку (масив  $\bar{I}_p$ ). Вертикальний відрізок (одномірний масив початкових даних  $\bar{I}_{\Delta k} = \bar{I}_{214, \bar{k}}$ ), який належить масиву  $\bar{I}_p$ , спільно з експериментально визначеними оцінками фону  $\hat{I}_a$  і інтенсивності відбиття  $\hat{I}_O$  та кута  $\varphi$  використали для розрахунку масиву значень вертикальної похідної  $q_1$ . Співставляючи на зображенні (за межами зображення I) розміри об'єктів в міліметрах (метризована біла смуга з міліметровими рисками) і пікселях оцінено крок дискретизації  $\Delta y = \Delta x$ . Інтегральним накопиченням вертикальної похідної  $q_1$  з кроком  $\Delta y$  було розраховано масив оцінок глибини пітинга  $Z = Z_{\underline{k}}$ , де  $\underline{k} \in [1, 183]$  (рис. 4.3, верхній блок операторів з товстою чорною лінією) звідки визначено максимальну глибину пітинга  $z_{\max} = 0,78 \text{ mm}$  коли  $\underline{k}_{\min} = 152$ . Зв'язок між вертикальною координатою  $k$  зображення I та координатою оцінок глибини пітинга має таку форму  $-\underline{k} = k - 343$ . На основі цього на зображенні I точка центру пітинга, точка максимальної глибини пітинга це  $(i_{\max}, k_{\max}) = (215, 191)$ . Другий етап розробленої ІТ полягає у реалізації чотирьох алгоритмів (рис. 4.3): Структура алгоритму штучної моделі представлена в блоці операторів з товстою чорною лінією і полягає в операції корекції перерізу пітинга та створення штучної моделі.

Корекція перерізу пітинга  $Z = Z_{\underline{k}}$ . У розподілі оцінок глибини пітинга  $Z = Z_{\underline{k}}$  спостерігається локальний мінімум, коли  $\underline{k} \in [10, 36]$ . Перевіримо наявність цього мінімуму на інших точках зображення пітинга I. Ці точки шукаємо в кільці з центром в точці  $(215, 191)$  та радіусами  $r=116$  (внутрішній),  $R=142$  (зовнішній), що відповідають  $\underline{k} = 10, 36$ . Видно, що цей мінімум нетиповий для переважної більшості точок кільця. Для корекції виявленого нетипового розподілу  $Z$  застосована лінійна інтерполяція  $z(\underline{k}) = -0,11\underline{k} + 0,12$ ;

Далі на основі скоректованого вертикального перерізу  $z$  поверхня пітинга утворюється двома операціями: обертанням його скоректованого вертикального перерізу  $z = f(k) = f(i_{\max}, k)$  відносно вертикальної осі  $Oz$ , яка проходить через

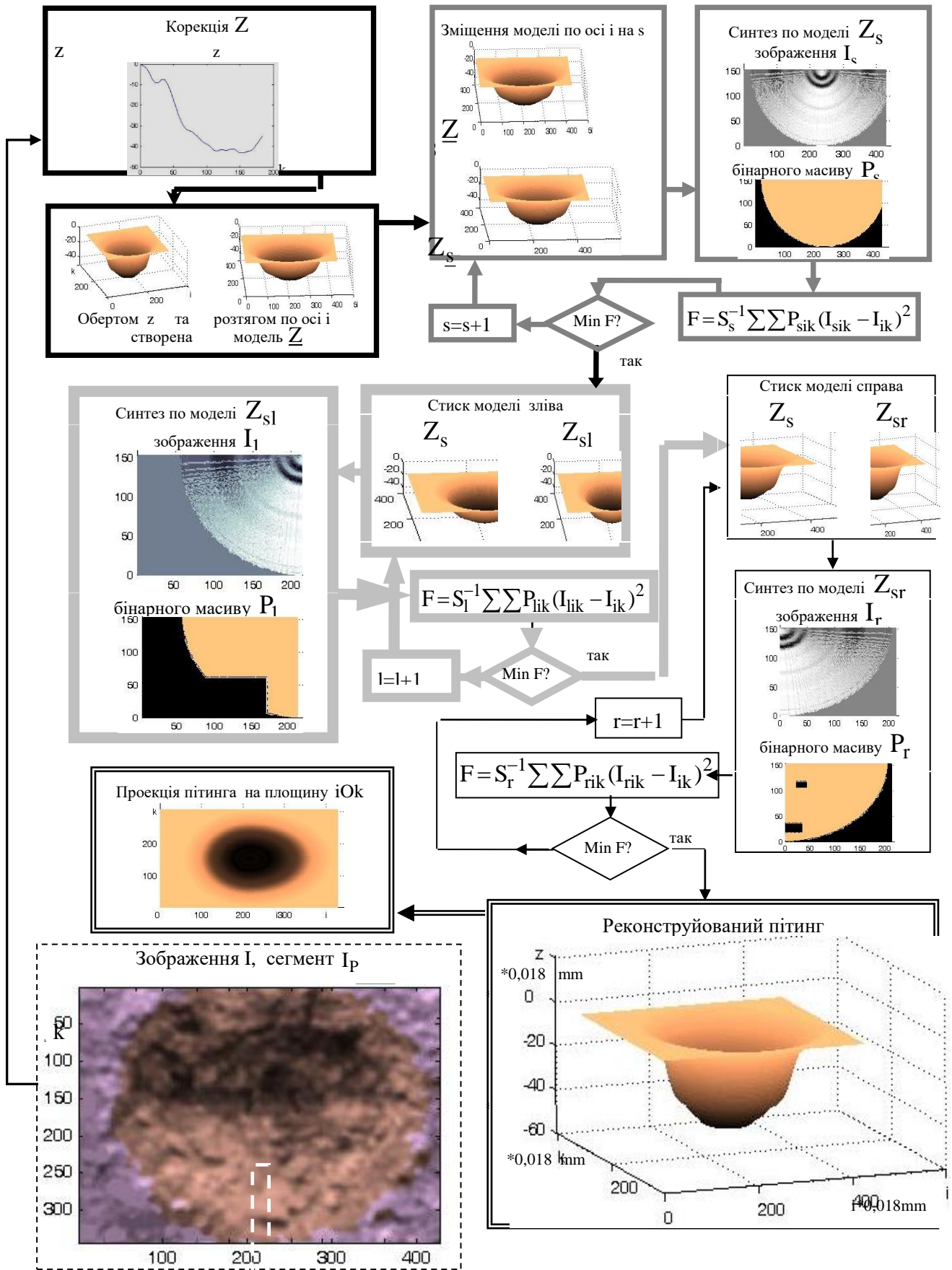


Рисунок 4.3 – IT оцінки глибини пітинга за зображенням поверхні матеріалу.

точку максимальної глибини  $(i_{\max}, k_{\max})$  і має таку форму  $Z=f(\rho)$ , де  $\rho = \sqrt{(i - i_{\max})^2 + (k - k_{\max})^2}$ , та розтягом  $Z=f(\rho)$  у горизонтальному напрямку оператором інтерполяції. Структура алгоритму зміщення подана в блоці операторів з темно-сірою лінію. На основі моделі пітинга  $Z$  виконується зміщення моделі  $Z_s$ , задаючись похідними  $Z_s$ , оцінками фону  $\hat{I}_a$  і інтенсивності відбиття  $\hat{I}_{\lambda O}(k_d)$  за дифузною моделлю відбиття в СОЗ синтез зображення  $I_s$  і по всіх незатінених точках, визначаємо квадратичну форму  $F$ . Заходимо мінімум  $F$ . Аналогічну структуру має алгоритм оптимального стиску зліва  $\eta_l$ , це блок операторів з світло сірою лінію (справа  $\eta_r$ , блок операторів з тонкою чорною лінію). Результат реконструкції реального пітинга, дислокованого на газопроводі, наведено подвійною чорною лінією.

### **4.3. Програмна реалізація методу оцінки глибини поверхні за її стереозображенням, створеного на платформі ламбертівської моделі відбиття**

Продовжимо розгляд методу та алгоритму тривимірної реконструкції поверхні за її стереозображенням, алгоритмічні засади, якого представлені в п. 2.2.2. За одержаними виразами (2.33), (2.34) програмними засобами МАТЛАБ [111] можна реконструювати похідні  $p$ ,  $q$ . Перед проведенням програмної реалізації алгоритму тривимірної реконструкції поверхні необхідно провести заходи по покращенню точності тривимірної реконструкції. Як правило визначення тривимірної форми предмету відбувається з певною похибкою.

Похибка складається з трьох складових: перша, яка виникає лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції, друга, обумовлена неточністю фотозйомки зображень і третя, обумовлена неточністю визначення зваженого дифузного коефіцієнта відбиття та фону. Спотворення зображень викликане неточністю встановлення напрямків освітлення поверхні.

Оцінка такої похибки складне завдання. Тому щоб досягти його успішного виконання слід розбити вирішення цієї проблеми на простіші етапи і аналізувати

зазначену похибку по частинах. На першому етапі такого аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка виникає лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції. На другому етапі такого аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка викликана неточністю встановлення напрямків освітлення поверхні

Розглянемо, як програмно реалізувати алгоритм тривимірної реконструкції поверхні за її стереозображенням, оцінити похибки 3D реконструкції похідних поверхні, які виникають в розрахунковій частині алгоритму реконструкції, а також показати, в якій мірі цей тип похибок можна контролювати в системі тривимірної реконструкції, що дозволить алгоритмічно зменшити їх до необхідного рівня і покращити точність 3D реконструкції.

Зауважимо, що стосовно сфери неруйнівного контролю похибка обрахунку глибини тріщини важлива для прогнозу тріщиностійкості, оскільки ця похибка приймає участь в формуванні параметрів, які є підґрунтям для прогнозу тріщиностійкості. Тому в процесі реконструкції, яка буде проведена, сфокусуємо увагу на її визначенні.

Акцент дослідження буде сфокусований на компенсації похибок, які виникають в розрахунковій частині алгоритму реконструкції.

Розв'язок поставлених задач пропонується почати з залучення аналітичної моделі тріщини (1.24) і на цій основі провести комп'ютерне моделювання зображення тріщини.

Перехід до дискретизаційних координат  $\{i,k\}$  і обмежений діапазон значень поверхні  $z_{ik}$  дозволяють здійснити наступне:

- штучно створити модель тріщини  $z_{ik}$ ;
- на основі масиву  $z_{ik}$  визначити масиви похідних  $p_{ik}, q_{ik}$ .

Виконання попередніх умов є підґрунтям до дискретного запису зображень  $I_{\lambda 0} = I_{\lambda 0}(p_{ik}, q_{ik})$ ,  $I_{\lambda 1} = I_{\lambda 1}(p_{ik}, q_{ik})$ . Зауважимо що на стадії комп'ютерного моделювання нехтуємо значенням інтенсивності фону  $I_a$ , а також додатково приймаємо, що дифузний коефіцієнт  $k_d$  є незмінним для змодельованого зразка з

тріщиною  $z_{ik}$ . Крім того, не враховуватимемо вплив операції квантування. На додаток зауважимо, що вплив точності встановлення напрямків світла  $L_0, L_1$  в зображеннях (2.21) на реконструкцію на даному етапі не враховані.

Для реконструкції висоти поверхні проведемо визначення оцінок похідних  $p$  і  $q$  на основі інформації про зображення  $I_{\lambda_0}, I_{\lambda_1}$  та користуючись (2.33), (2.34). Шляхом інтегрування виконаємо остаточну 3D реконструкцію глибини тріщини.

Перед початком комп'ютерної реконструкції висоти поверхні в системі обробки отримано оцінку похідних вектора нормалі поверхні у вигляді масивів  $\underline{p}_{ik}, \underline{q}_{ik}, \forall i = \overline{1, I}; \forall k = \overline{1, K}$ . Зауважимо, що реконструкція похідних отримана з абсолютними похибками

$$\begin{aligned}\Delta p_{ik} &= \underline{p}_{ik} - p_{ik}, \\ \Delta q_{ik} &= \underline{q}_{ik} - q_{ik}.\end{aligned}\tag{4.2}$$

Приймаючи за опорну точку початок координат, реконструйована глибина тріщини приймає значення

$$z_{ik} = \underline{z}_{ik} + \Delta x \sum_{j=2}^i \underline{p}_{jk},\tag{4.3}$$

$$\text{де } \underline{z}_{ik} = \Delta y \sum_{m=2}^k \underline{q}_{im}.$$

Розглянемо оптимізаційні заходи покращення реконструкції (4.3).

Однією з очікуваних причин неякісної реконструкції металографічного зображення тріщини, яку потрібно враховувати є завади, які вносить приймач зображення. Вони виникають через вплив неточності встановлення просторових параметрів положення джерела світла. Але на даному етапі досліджень приймемо, що процедура формування інтенсивності зображення тріщини (2.21), є ідеальна і не вносить спотворення. Оцінка глибини, в значній мірі залежить від інтенсивності фону та дифузного коефіцієнта відбиття поверхні. Але на даному етапі досліджень приймемо, що процедура визначення фону та дифузного коефіцієнту відбиття поверхні є ідеальна і також не вносить спотворення.

І нарешті ще однією очікуваною причиною неякісної реконструкції металографічного зображення тріщини є завади, що вносить сам метод реконструкції.

Визначимо аналітично вплив завад методу на якість реконструкції глибини тріщини за парою зображень. Під час розгляду впливу завад методу необхідно акцентувати увагу на якість реконструкції довжини тріщини  $z_{\max}$ .

Користуючись виразом (4.3) оцінку глибини тріщини  $z_{ik}$  представимо у такій формі

$$z_{ik} = z_{ik} + \Delta z_{ik},$$

де

$$\Delta z_{ik} = \Delta z_{1k} + \Delta x \sum_{n=2}^i \Delta p_{nk} \quad (4.4)$$

- абсолютна похибка реконструкції глибини. Перший доданок у виразі (4.4) приймає наступне значення

$$\Delta z_{1k} = \Delta y \sum_{m=2}^k \Delta q_{1m}. \quad (4.5)$$

Нехай на поверхні з тріщиною в точках  $(1, m)$ ,  $\forall m = \overline{2, K}$  є площина. Для мінімізації похибок першого доданку (4.5) необхідно скоректувати реконструйовану вертикальну похідну  $q_{1k}$  систематичною похибкою  $\Delta q_{sis}$

$$q_{1k,s} = q_{1k} - \Delta q_{sis}, \quad (4.6)$$

що змінить перший доданок наступним чином

$$\Delta z_{1k,s} = \Delta y \sum_{m=2}^k (\Delta q_{1m} - \Delta q_{sis}).$$

Щоб розрахувати систематичну похибку  $\Delta q_{sis}$  покладемо  $\Delta z_{1k,s} = 0$ , з чого одержуємо

$$\Delta q_{sis} = \frac{1}{k-1} \sum_{m=2}^k \Delta q_{1m}.$$

Такий вигляд має оцінка систематичної похибки, яка розрахована по точкам площини реального металографічного зображення, де присутні

флуктуації поверхні. У ідеалізованому випадку площина не має флуктуацій поверхні, тому  $\Delta q_{lm} = \Delta q_p$ . З цього випливає, що  $\Delta q_{sis} = \Delta q_p$ .

Припустимо, що корекція проведена і таким чином перший доданок у (4.4) дорівнює нулю.

Розглянемо другий доданок у виразі (4.4), зробивши наступні припущення:

- вертикальна координата  $k$  фіксована;
- в точках  $(i, k)$ ,  $\forall i = \overline{2, i_1}$  маємо площину поверхні з тріщиною;
- в точках  $(i, k)$ ,  $\forall i = \overline{i_{l+1}, i_r}$  існує поверхня тріщини.

Виберемо точку  $(i, k)$ , в якій існує поверхня тріщини. В цьому випадку другий доданок у виразі (4.4) набуває форми

$$\Delta z_{ik} = \Delta z_{ik}' + \Delta z_{ik}'', \quad (4.7)$$

де  $\Delta z_{ik}' = \Delta x \sum_{j=2}^{i_1} \Delta p_{jk}$  – абсолютна похибка реконструкції глибини в точках

площини;  $\Delta z_{ik}'' = \Delta x \sum_{j=i_1+1}^i \Delta p_{jk}$  – абсолютна похибка реконструкції глибини

тріщини в точці  $(i, k)$ .

Для мінімізації похибок першого доданку у виразі (4.7) необхідно скоректувати реконструйовану горизонтальну похідну  $\underline{p}_{ik}$  систематичною похибкою  $\Delta p_{sis}$

$$\underline{p}_{ik,s} = \underline{p}_{ik} - \Delta p_{sis}, \quad (4.8)$$

що змінить перший доданок наступним чином

$$\Delta z_{ik,s}' = \Delta x \sum_{j=2}^{i_1} (\Delta p_{jk} - \Delta p_{sis}).$$

Щоб розрахувати систематичну похибку  $\Delta p_{sis}$  покладемо аналогічно  $\Delta z_{ik,s}' = 0$ , з чого випливає

$$\Delta p_{sis} = \frac{1}{i_1 - 1} \sum_{j=2}^{i_1} \Delta p_{jk}.$$



Як було вже сказано раніше такий вигляд має оцінка систематичної похибки розрахована по точкам площини реального металографічного зображення, де присутні флуктуації поверхні. У ідеалізованому випадку площина не має флуктуацій поверхні, тому  $\Delta p_{jk} = \Delta p_p, \forall j = \overline{2, i_1}$ . З цього слідує, що  $\Delta p_{sis} = \Delta p_p$ .

Припустимо, що корекцію (4.8) проведено, так що перший доданок у (4.7) дорівнює нулю.

Нехай в точці  $(i_v, k)$  маємо вістря тріщини в якому  $z_{i_v k} = -z_{max}$ . В цьому випадку вираз (4.7), абсолютна похибка розрахунку довжини тріщини рівна

$$\Delta z_{max} = \Delta x \sum_{j=i_1+1}^{i_v} (\Delta p_{jk} - \Delta p_{sis}). \quad (4.9)$$

Нехай проведено реконструкцію поверхні тріщини. З врахуванням сказаного вираз (4.9) спрощується

$$\Delta z_{max} = \Delta x (\Delta p - \Delta p_p) (i_v - i_1 - 1). \quad (4.10)$$

Реконструкція приводить і до спрощення виразу (4.3)

$$z_{max} = -(p - \Delta p_p) \Delta x (i_v - i_1 - 1). \quad (4.11)$$

Підставивши (4.10) та (4.11) у вираз (1.26) відносна похибка розрахунку довжини тріщини рівна

$$\delta z_v = -\frac{\Delta p - \Delta p_p}{p - \Delta p_p}. \quad (4.12)$$

Оскільки похибка  $\Delta p_p$  визначається на площині, яка є незмінним елементом у будь якої тріщини, то основну увагу в аналізі похибки  $\delta z_v$  слід зосередити на її залежності від параметрів  $\Delta p, p$ , які є специфічними для кожної тріщини. Використовуючи опис тріщини (4.12) можна ввести наступний клас тріщин. Кожна тріщина має похідну  $p$ , що належить діапазону  $[0, p_s]$  з заданою точністю  $\delta z_{v, MAX} \geq \delta z_v$ . Якщо  $p \gg \Delta p_p$ , то

$$\delta z_v \approx -\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta p_p}{p}. \quad (4.13)$$

Як бачимо  $\delta z_V$  для кожної тріщини, яка належить класу тріщин (1.24), визначається відносною похибкою реконструкції горизонтальної похідної. Отриманий результат дозволяє здійснити наступне. Щоб визначити оцінку якості тривимірної реконструкції досліджуємо таку модель тріщини в якій забезпечили наявність горизонтальних похідних, які належать діапазону  $[0, p_s]$  з заданою точністю  $\delta z_{V, \text{MAX}} \geq \delta z_V$ . Одним з можливих потенційних варіантів такої моделі тріщини є модель тріщини, яка у розкритті описується виразом

$$z = k(x + y)^2 - z_{\text{max}} \leq 0,$$

де  $k = \text{const}$ . Видно, що у розкритті це тріщина з U подібним профілем. Програмно реалізувати таку модель тріщини розміщену у площині можна згідно з виразом

$$Z = \frac{z - |z|}{2}. \quad (4.14)$$

Оцінка якості тривимірної реконструкції тріщини.

Розглянемо тривимірну реконструкцію та оцінку її якості.

Спочатку програмно за квадратним рівнянням (2.34) реконструйовано вертикальну похідну у вигляді двох масивів коренів  $\underline{q}_{1,ik}$ ,  $\underline{q}_{2,ik}$ , а потім на основі цієї інформації за виразом (2.33) реконструйовано горизонтальну похідну у вигляді двох масивів  $\underline{p}_{1,ik}$ ,  $\underline{p}_{2,ik}$ .

Для позначення параметрів: вертикальної похідної  $q_1$ ,  $q_2$ , горизонтальної похідної  $p_1$ ,  $p_2$  та глибини  $z$  моделі тріщини застосуємо позначення  $u \in \{p_n, q_n, z\}$ ,  $n=1,2$ . Для оцінки якості тривимірної реконструкції для параметра  $n$  знайдемо абсолютну похибку

$$\Delta u_{ik} = \underline{u}_{ik} - u_{ik}, \quad (4.15)$$

та відносну похибку

$$\delta u_{ik} = \frac{\Delta u_{ik}}{u_{ik}}. \quad (4.16)$$

Зауважимо, що при програмній реалізації, щоб уникнути виникнення полюсів, коли  $u_{ik} = 0$ , знаменник в (4.16) представлено  $u_{ik} + 0,00001$ . Зауважимо, що в точках, в яких похибка  $|\delta u_{ik}| > 0,25$ , отримання достовірних результатів реконструкції не розглядається. Тому площина  $\delta u_{ik} = \pm 0,25$  викидається з розгляду.

Для визначення оптимального масиву вертикальної та горизонтальної похідної оберемо точки  $(i,k)$ , в яких має місце розкриття тріщини.

На підставі порівняння відносних похибок  $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}, \underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$  за статистичними критеріями, або за абсолютною величиною вибирається пара похідних  $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}$  або  $\underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$ , яка використовується для наступного проведення реконструкції.

На початку тривимірної реконструкції глибини тріщини проведемо мінімізацію абсолютної похибки реконструкції глибини  $\Delta z_{ik}$  (4.4). Для цього застосуємо дві операції:

- корекція (4.6) здійснює мінімізацію першого доданку в виразі (4.4);
- корекція (4.8) здійснює мінімізацію другого доданку в (4.4).

Після застосування цих корекцій отримуються скоректовані похідні  $\underline{q}_{ik,s}, \underline{p}_{ik,s}$ . На їх основі алгоритмом тривимірної реконструкції глибини тріщини (4.3) виконується відновлення  $z_{ik}$ .

Завершує оцінку якості тривимірної реконструкції реалізація визначення абсолютної та відносної похибки реконструкції глибини тріщини (4.16) та визначення відносної похибки реконструкції довжини тріщини (1.26).

Приклад програмного застосування представлено на рис. 4.4. На цьому рисунку зліва представлено результати основних операцій реконструкції, для всіх точок повної апертури, в якій визначена площина з тріщиною, а справа розподіли похибок в перерізі тріщини. Зауважимо, що для того щоб відрізнити похибки, а також з метою полегшення звертання та опису, інформація в перерізі тріщини розміщена у двох прямокутниках, обмежених штриховою лінією, а інформація у

точках повної апертури розміщена у прямокутниках, обмежених неперервною лінією.

Комп'ютерна модель тріщини  $Z$  використовувалась для визначення похідних  $p_{ik}$ ,  $q_{ik}$  та комп'ютерного генерування штучних зображень  $I_\lambda(L_m) = I_\lambda(L_m, p, q)$ , де  $m=0,1$ . Для розрахунку фотосигналів  $I_\lambda(L_m)$  додатково прийнято умови  $I_a = 0$ ,  $I_{p\lambda} k_d = 250$ .

Ці синтезовані об'єкти та їх проміжні продукти представлені на рис. 4.4 у спектрі жовто-коричневих відтінків.

ІТ реконструкції глибини поверхні пластини з тріщиною, на базі стереозображення містять наступні основні операції:

1. На основі,  $I_\lambda(L_0)$ ,  $I_\lambda(L_1)$  визначаються два кореня вертикальної похідної  $q_{1,ik}$ ,  $q_{2,ik}$ .

2. На основі  $q_{1,ik}$  ( $q_{2,ik}$ ) визначається горизонтальна похідна  $p_{1,ik}$  ( $p_{2,ik}$ ).

Реконструйовані похідні  $q_{2,ik}$  і  $p_{2,ik}$  представлені на рис. 4.4 у спектрі синіх та фіолетових відтінків.

3. За виразом (4.16) визначимо відносну похибку реконструкції вертикальної похідної  $\delta q_{n,ik}$ . Результати роботи програми по визначенню відносної похибки реконструкції вертикальної похідної  $\delta q_{2,ik}$  для всіх точок апертури подані на рис. 4.4, у лівій частині, а для кращої візуалізації точок, які належать самій тріщині, на рис. 4.4 справа, вгорі, у прямокутнику, обмеженому штриховою лінією, наведено розподіл похибки у перерізі розкриття тріщини (синій колір). Крім того тут наведено розподіл вертикальної похідної (зелений колір). Як бачимо у розподілі відносної похибки переважають від'ємні значення відносної похибки, які сконцентровані у правій частині тріщини. Ця особливість є аргументом на користь вибору реконструкції глибини за методом (4.3). На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції вертикальної похідної  $\delta q_{2,j}$  ( $j$  – вертикальна координата, а фіксована горизонтальна координата для спрощення індексації відсутня), та вертикальної

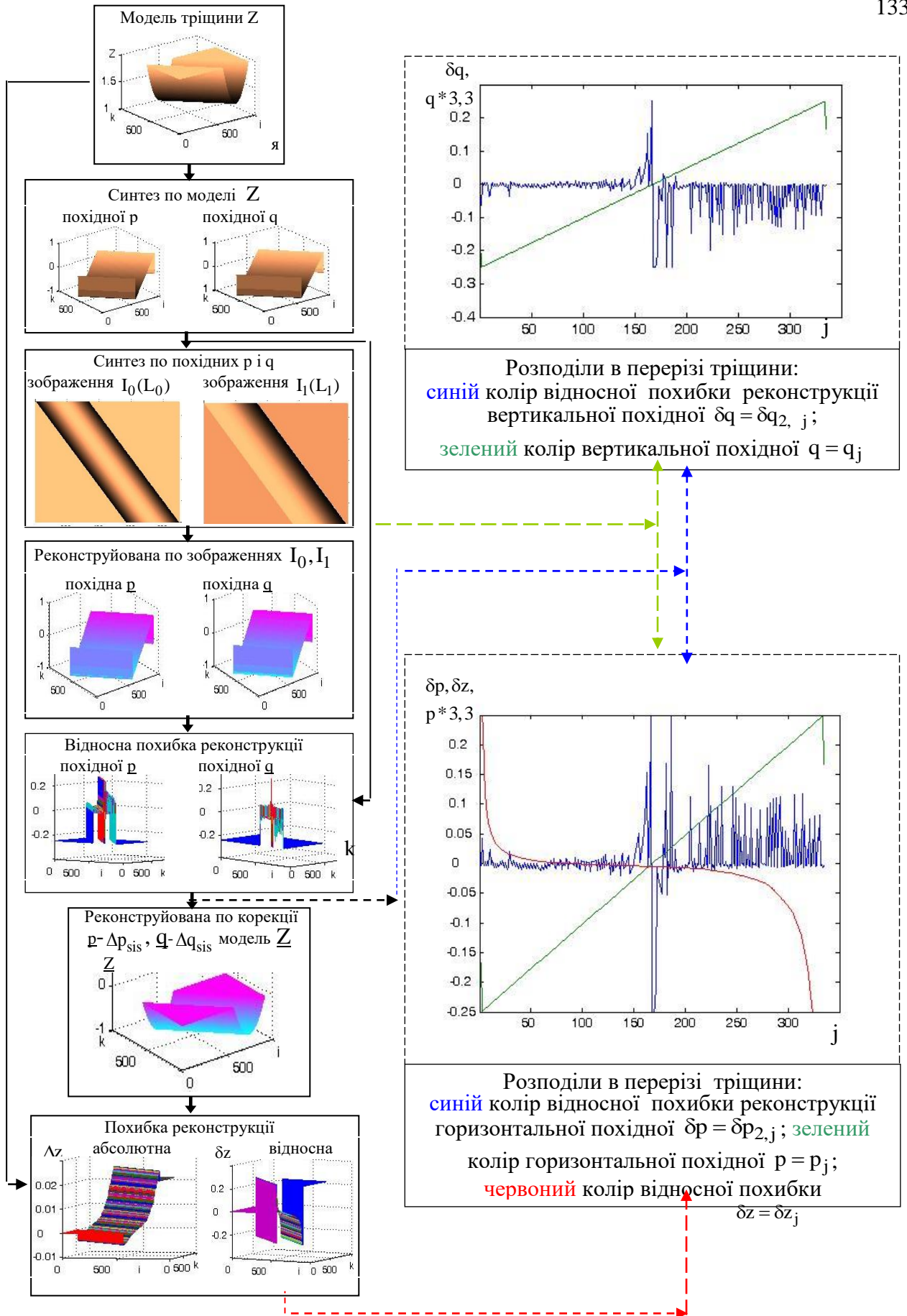


Рисунок 4.4 – Інформаційна технологія тривимірної реконструкції за стереозображеннями тріщини

похідної  $q_j$  встановлено, що у лівій частині тріщини  $q$  належить діапазону  $[-0,83; -0,005]$  з заданою точністю 0,25, а у правій частині тріщини  $q$  належить діапазону  $[0,09; 0,83]$  з такою ж точністю.

4. За виразом (4.16) визначимо відносну похибку реконструкції горизонтальної похідної  $\delta p_{n,ik}$ , де  $n=1,2$ . Результати роботи програми по визначенню відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної  $\delta p_{2,ik}$  для всіх точок апертури подані на рис. 4.4, у лівій частині. Аналогічно як і у випадку описаному вище для кращої візуалізації. точок, які належать самій тріщині на рис. 4.4, справа, у нижньому куті, у прямокутнику обмеженому, штриховою лінією, наведений розподіл похибки горизонтальної похідної у перерізі розкриття тріщини. (синій колір). Крім того тут наведено розподіл горизонтальної похідної (зелений колір) і розподіл відносної похибки реконструкції глибини (червоний колір). Видно, що у розподілі відносної похибки горизонтальної похідної переважають додатні значення відносної похибки, які сконцентровані у правій частині тріщини.

На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції горизонтальної похідної  $\delta p_{2,j}$  ( $j$  – горизонтальна координата, а фіксована вертикальна координата для спрощення індексації відсутня), та горизонтальної похідної  $p_j$  встановлено, що у лівій частині тріщини  $p$  належить діапазону  $[-0,83; -0,005]$  з заданою точністю 0,25, а у правій частині тріщини  $p$  належить діапазону  $[0,09; 0,83]$  з такою ж точністю.

5. З огляду розподілів відносної похибки, наведених в перерізі тріщини, видно, що вони мають однаковий діапазон координат. Ця властивість дозволила провести кількісне порівняння

$$a_j = |\delta q_{2,j} - \delta p_{1,j}|, \quad b_j = |\delta q_{1,j} - \delta p_{2,j}|.$$

По результатам роботи програми було встановлено, що різниці  $a_j \leq 10^{-12}$ ,  $b_j \leq 10^{-12}$ . Таким чином на підставі вставленого співпадіння масивів відносних

похибок у наступному етапі реконструкції можна використовувати будь яку пару похідних або  $\underline{q}_{1,ik}, \underline{p}_{1,ik}$  або  $\underline{q}_{2,ik}, \underline{p}_{2,ik}$ .

6. Інтерактивно на площині вибирається систематична похибка  $\Delta q_{sis} = \underline{q}_{10,10}$  і за виразом (4.6) розраховано корекцію вертикальної похідної  $\underline{q}_{1m,s}$ .

7. Інтерактивно на площині вибирається систематична похибка  $\Delta p_{sis} = \underline{p}_{10,10}$  і за виразом (4.8) розраховано корекцію горизонтальної похідної  $\underline{p}_{ik,s}$ .

8. Зважаючи на кращий діапазон реконструкції похідних та менші флуктуації відносних похибок у лівій частині тріщини (див. рис. 4.4, прямокутники обмежені штриховою лінією) доцільно наступну реконструкцію глибини тріщини провести використовуючи опорну точку – початок координат.

На основі одномірного масиву похідних  $\underline{q}_{1m,s}$ ,  $\forall m = \overline{2, K}$  (п. 6), та двомірного масиву похідних  $\underline{p}_{ik,s}$  (п. 7), за накопиченнями (4.3), визначається двомірний масив глибин  $\underline{z}_{ik}$  (рис. 4.4).

9. Для кількісної оцінки якості реконструкції 3D характеристик тріщини застосуємо наступні параметри: абсолютну і відносну похибку розрахунку глибини тріщини, які одержуємо відповідно за виразами (4.15) і (4.16).

Як видно з рис. 4.4 похибки визначення різних точок площини, розташовані зліва від тріщини не відрізняються і що важливо, мають внаслідок проведення корекції (п. 6, п. 7) нульове значення.

Абсолютна похибка зростає починаючи від від'ємних значень на лівому краї тріщини до додатних значень на правому краї, де спостерігається найбільше по абсолютній величині значення похибки. Найінтенсивніші зміни похибки спостерігаються біля країв тріщини. Вздовж тріщини розподіл абсолютної та відносної похибок практично незмінний. Така специфіка розподілу відносної похибки дозволяє продовжити його аналіз у перетині (див. рис. 4.4, нижній прямокутник обмежений, штриховою лінією). На основі спільного аналізу розподілів відносної похибки реконструкції глибини тріщини  $\delta z_j$ , та глибини  $z_j$  встановлено, що у лівій частині тріщини  $z$  належить діапазону реконструкції  $[0,011, -0,7]$ , а у правій

частині тріщини  $z$  належить вужчому діапазону  $[-0,092, -0,7]$ . В обох випадках за рахунок обмеження по точності  $\delta z_T = 0,25$ , формується верхня межа діапазону реконструкції.

Зауважимо, що для прогнозу тріщиностійкості з всього масиву відносних похибок найбільший інтерес представляють похибки визначення довжини тріщини, які відповідають нижній межі діапазону реконструкції  $z_U = -z_{\max} = -0,7$ . Програмно отримане наступне значення відносної похибки реконструкції довжини тріщини  $\delta z_U = -4,8 * 10^{-3}$ . Це дозволяє проводити прогноз тріщиностійкості з відносною похибкою  $\delta K = 9,6 * 10^{-3}$ .

В роботі була проведена порівняльна оцінка розроблених інформаційних технологій між собою. Дослідження швидкості реконструкції презентованих ІТ здійснювалось при отриманні зображень поверхні пітинга та тріщини. У таблиці 4.1 наведені результати порівняння презентованих ІТ за критерієм усунення

Таблиця 4.1. Порівняльна оцінка розроблених ІТ

N	ІТ тривимірної реконструкції	Недоліки	Переваги	Час хвилин
1	ІТ реконструкції за тріадою зображень (три технологічно задані напрямки освітлення поверхні)		не залежить від ДК, та усуває ЗП	7
2	ІТ тривимірної реконструкції за тріадою зображень (три довільні напрямки освітлення поверхні з оптичним контролем)		не залежить від ДК, та усуває ЗП але зменшує трудомісткість ІТ та розміри пристрою фотозйомки	4
3	ІТ тривимірної реконструкції за парою зображень при двох технологічно заданих напрямках освітлення	при тривимірній реконструкції пітинга ІТ блокується змінами ДК	не залежить від ДК при тривимірній реконструкції тріщини та усуває ЗП	5
4	ІТ тривимірної реконструкції за одним зображенням (при технологічно заданому напрямку освітлення)	ІТ блокується змінами ДК	усуває ЗП	3



артефактів: загороджених пікселів (ЗП), та зміни дифузного коефіцієнту (ДК) на поверхні дефекту. До уваги прийнято зменшення трудомісткості ІТ та зменшення розмірів пристрою фотозйомки. Як видно з табл. 4.1 запропоновані ІТ усувають вплив ЗП, а запропонована реконструкція (п. 4) дозволяє підвищити швидкість реконструкції в порівнянні з іншими, але може бути уражена змінами ДК.

В роботі була проведена порівняльна оцінка розроблених інформаційних технологій з існуючими на даний момент методами. Дослідження якості реконструкції презентованої ІТ здійснювалось на тестовому зображенні поверхні Bottle. У таблиці 4.2 наведені результати порівняння презентованої ІТ з відомими методами, яке проведено за критерієм pmse.

Таблиця 4.2 – Порівняння представленої ІТ з відомими методами

Метод реконструкції	Похибки реконструкції	Метод реконструкції	Похибки реконструкції
Вудхем	0,1142	Гетзман Сейтз	0,0952
Тсаї	0,1057	Горн	0,0921
Галл	0,1012	Дамілідіс	0,0915
Зенг	0,0972	Презентована ІТ	0,0891
Кашел Вайс	0,0961		

Як видно з таблиці 4.2, запропонована реконструкція дозволила підвищити якість реконструкції в середньому на 11,5% в порівнянні з відомими методами.

#### 4.4. Висновки

1. Вперше практично реалізовано нову інформаційну технологію 3D реконструкції профілю поверхні пітинга на основі інформації про тріаду та затінене зображення поверхні, застосовуючи наперед задані вертикальний та два бокові напрямки освітлення з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. Для фотозапису додаткових зображень, які є функціями кута освітлення, застосовано двокроковий алгоритм встановлення оптимального кута освітлення,

що дає змогу мінімізувати похибку визначення глибини пітинга. Наведений приклад практичного застосування інформаційної технології для тривимірної реконструкції поверхні реального пітинга трубопроводу.

2. Вперше практично реалізовано нову двоетапну інформаційну технологію тривимірної реконструкції пітингів, за одним зображенням. Для оптимальної корекції точності реконструкції по коректуючим параметрам використано згенероване на оптичній платформі ламбертівській моделі відбиття світла зображення пітинга. Для цього на першому етапі реалізовано 3D реконструкцію вертикального профілю пітинга, розташованого на поверхні матеріалу з інформації його 2D зображення, яка дозволяє провести наступний процес 3D реконструкції вертикальної похідної та з цієї інформації інтегрально знайти профіль пітинга. На другому етапі поворотом профілю пітинга, навколо вертикальної осі, яка проходить через точку максимальної глибини створюється трьохмірна модель пітинга. Експериментально перевірено роботоздатність запропонованої інформаційної технології для реконструкції пітингів, де для корекції застосовано такі параметри, як зсув моделі і косий стиск спочатку лівої, а потім правої частини моделі пітинга.

3. Програмно реалізовано новий метод 3D реконструкції за двома зображеннями, що базується на ламбертівській моделі відбиття світла. Алгоритм реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, придатної для штучного генерування зображень стереопари. Ця інформація дозволяє реконструювати похідні векторів нормалі. Проведено аналіз точності реконструкції використовуючи пластину з тріщиною та оцінено відносну похибку розрахункової частини алгоритму реконструкції глибини тріщини, яка становить  $\pm 0,5\%$ .

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з розробленням методів, алгоритмів та створення на їх основі інформаційних технологій для зменшення впливу артефактів на реконструкцію форми і визначення глибини дефектів при їх використанні для моніторингу технічного стану металевих конструкцій, уражених корозією. Зокрема, отримано такі результати:

1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку методів тривимірної реконструкції показав, що основними недоліками існуючих підходів є наявність на зображеннях дефектів зон загороджених пікселів та зон зі змінним дифузним коефіцієнтом відбиття поверхні. Показано, що одним з напрямків вдосконалення таких систем є використання при реконструкції ламбертівської моделі відбиття.

2. Вперше розроблено метод тривимірної реконструкції дефекту на основі інформації про тріаду та затінене зображення поверхні, застосовуючи наперед задані вертикальний та два бокові напрямки освітлення з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. На основі методу створено інформаційну технологію, яка усуває вплив артефактів на процес відтворення форми дефекту, а також дозволяє проводити завадостійку реконструкцію для довільно заданих напрямків освітлення поверхні.

3. Запропоновано новий метод визначення напрямку освітлення на основі інформації про зображення поверхні тріади площин з відомими векторами нормалі та затіненим зображенням поверхні з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. Метод дає можливість здійснювати дистанційний оптичний моніторинг напрямків світла в запропонованих інформаційних технологіях. Проаналізовано точність кутових параметрів напрямку світла для запропонованого методу і оцінено абсолютну похибку розрахункової частини алгоритму визначення похідних вектора нормалі, яка становить  $\pm 0,028$ .

4. Базуючись на ламбертівській моделі відбиття світла удосконалили метод тривимірної реконструкції за двома зображеннями. На основі методу

створено інформаційну технологію, яка усуває вплив загородження пікселів та зменшує вплив зміни дифузного коефіцієнта на процес відновлення форми і глибини дефекту в технічній діагностиці. Використовуючи пластину з тріщиною для штучно згенерованої пари зображень, проаналізували точність реконструкції з оцінкою відносної похибки розрахункової частини програми для визначення глибини тріщини, яка становить  $\pm 0,5\%$ .

5. Практично реалізовано нову двоетапну інформаційну технологію тривимірної реконструкції дефектів, зокрема тріщин та пітингів, за одним зображенням. Для корекції точності реконструкції використано згенероване на оптичній платформі ламбертівській моделі відбиття світла зображення дефекту. Експериментально перевірено роботоздатність запропонованої інформаційної технології для відтворення форми пітингів та оцінено її похибки.

6. Розроблені алгоритми та інформаційні технології реконструкції дефектів реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке прийнято для впровадження у філії БМФ “Укргазпромбуд”, АТ “Укртрансгаз” та Долинському ЛВ УМГ філії “Прикарпаттрансгаз” для неруйнівного контролю стану газопроводів, уражених корозійними пітингами та тріщинами.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. New York: Springer, 2010. 655 P.
2. Woodham R.J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*. 1980. 19(1). P.139–144.
- 3 Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou. Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction. *Machine Vision and Applications*. 2014. Vol. 25. Issue 1. P.199-210.
4. Q. Zhang, X. Su, L. Xiang, and X. Sun. 3-D shape measurement based on complementary gray-code light. *Opt. Lasers Eng.* 2012. Vol. 50. P. 574-579.
5. S. Zhang, D. Van Der Weide, and J. Oliver. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement. *Opt. Express*. 2010. Vol. 18. No. 9. P. 9684–9689.
6. Johannes Kopf, Fabian Langguth, Daniel Scharstein, Richard Szeliski, and Michael Goesele. Image-based rendering in the gradient domain. *ACM Transactions on Graphics*. 2013. Vol. 32(5). P. 273–278.
7. Y. Furukawa and J. Ponce. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *TPAMI*. 2010. Vol. 32(8). P. 1362–1376.
8. M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe. Poisson surface reconstruction. *In Symposium on Geometry Processing*. 2006. Vol. 12(6). P. 1012–1029.
9. M. Kazhdan and H. Hoppe. Screened poisson surface reconstruction. *ACM Trans. Graph.* 2013. Vol. 32(3). P. 1881–1887.
10. M. Jancosek and T. Pajdla. Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. *In CVPR*. 2011. Vol. 27(4). P. 657–667.
11. Qi Shan, Brian Curless, Yasutaka Furukawa, Carlos Hernandez, Steve Seitz. Occluding Contours for Multi-View Stereo. *In CVPR*. 2014. Vol. 23-28. P. 4002–4009
12. J. Geng. Structured-light 3d surface imaging: a tutorial. *Adv. Opt. Photon.* 2011. Vol. 3(2). P. 128–160.
13. Y. Liu, X. Su, and Q. Zhang. A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry. *Opt. Express*. 2011. Vol. 19(15). P. 14137–14144.

14. Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Shankar Sastry S. An Invitation to 3-D Vision. Springer, 2005. 552 p.
15. Rafael C. Gonzalez E., Woods R., Eddins L. S. Digital Image Processing Using MATLAB. Prentice Hall; 2003. 782 p.
16. Форсайт Д., Понс Ж. М. Компьютерное зрение. Современный подход Вильямс, 2004. 928 с.
17. Faugeras O. D. Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. Cambridge: Mass. The MIT Press, 1993. 612 P.
18. Moyung T.J. Incremental 3D reconstruction using stereo image sequences. PhD thesis. Waterloo. Canada. 2000. 477 P.
19. Triggs B. “Optimal estimation of matching constraints,” in 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments. European Workshop. Freiburg. Germany. Vol. 1506 of *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin. Springer Verlag. 1998. P. 63–77.
19. Laveau S., Faugeras O. Oriented projective geometry for computer vision. *In Proc.ECCV*. 1996. Vol. 1064 of *LNCS*. P. 147–156.
20. Hartley R.I. Theory and Practice of Projective Rectification. *International Journal of Computer Vision*. 1999. Vol. 35. No. 2. P. 115 – 127.
21. Zhang Z. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review. *Int. J. Computer Vision*. 1993. Vol. 27. No. 3. P. 161–195.
22. Chojnacki W. A. van den Hengel, Gawley D., Brooks M. A fast mle-based method for estimating the fundamental matrix. *IEEE ICIP*. 2001. P. 189-192.
23. Luong Q.-T., Faugeras O. D. The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis. *Int. J. ComputerVision*. 1996. Vol. 17. No. 1. P. 43 -75.
24. Torr P. H. S., Murray D.W. “The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix”.*Int. J. Computer Vision*. 1997. Vol. 24. No. 3. P. 271–300.
25. Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *IJCV*. 1989. №2(3). P. 283–310.

26. Matthies L., Szeliski R., Kanade T. Kalman filter-based algorithms for estimating depth from image sequences. *IJCV*. 1989. №3. P. 209–236.
27. Simoncelli E. P., Adelson E. H., Heeger D. J. Probability distributions of optic flow. *CVPR*. 1991. P. 310–315.
28. Kanade T. Development of a video-rate stereo machine. *Image Understanding Workshop*, Monterey, CA. Morgan Kaufmann Publishers. 1994. P. 549–557.
29. Bolles R. C., Baker H. H., Hannah M. J. The JISCT stereo evaluation. *In DARPA Image Understanding Workshop*. 1993. P. 263–274.
30. Kass M. Linear image features in stereopsis. *IJCV*. 1988. №1(4). P. 357–368.
31. Jones D. G., Malik J. A computational framework for determining stereo correspondence from a set of linear spatial filters. *In ECCV*. 1992. P. 395–410.
32. Birchfield S., Tomasi C. Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo. *In ICCV*. 1998. P. 1073–1080.
33. Shum H.-Y., Szeliski R. Stereo reconstruction from multiperspective panoramas. *In ICCV*. 1999. P. 14–21.
34. Szeliski R., Golland P. Stereo matching with transparency and matting. *IJCV*. 1999. №32(1). P. 45–61.
35. Szeliski R., Scharstein D. Symmetric sub-pixel stereo matching. *In ECCV*. 2002. №3(4). P. 283–310.
36. Bobick A. F., Intille S. S. Large occlusion stereo. *IJCV*. 1999. №33(3). P. 181–200.
37. Kang, S. B., Szeliski R., Chai J. Handling occlusions in dense multi-view stereo. *In CVPR*. 2001. P. 210–516.
38. Veksler O. Stereo matching by compact windows via minimum ratio cycle. *In ICCV*. 2001. Vol. 1. P. 540–547.
39. Shah J. A nonlinear diffusion model for discontinuous disparity and half-occlusion in stereo. *In CVPR*. 1993. P. 34–40.
40. Scharstein D. View Synthesis Using Stereo Vision. vol. 1583 of *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*.-Springer Verlag. 1999. P. 225–234.

41. Scharstein D., Szeliski R., Zabih R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *In IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*. 2001. №28(5). P. 1008-1020
42. Seitz P. Using local orientation information as image primitive for robust object recognition. *In SPIE Visual Communications and Image Processing IV*. 1989. Vol. 1199. P. 1630–1639.
43. Scharstein D., Briggs A. Real-time recognition of self-similar landmarks. *Image and Vision Computing*. 2001. №19(11). P. 763-772.
44. Scharstein D., Szeliski R. Stereo matching with non-linear diffusion. *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'96)*, San Francisco, 1996. P. 343–350.
45. Devernay F., Faugeras O. Computing Differential Properties of 3-D Shapes from Stereoscopic Images without 3-D Models. *IEEE in Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'1994)*. Seattle. WA. 1994. P. 208-213.
46. Yang, Y., Yuille A., Lu J. Local, global, and multilevel stereo matching. *In CVPR*. 1993. P. 274–279.
47. Quam L. H. Hierarchical warp stereo. *In Image Understanding Workshop*. New Orleans. Louisiana. 1984. Science Applications International Corporation. P. 149–155.
48. Синявський А.Т., Русин Б.П. Реалізація методу реконструкції мікроструктури поверхні за її стереозображенням з оптичних камер. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2005. № 2. С. 112-118.
49. Сигал И. Х., Иванова А. П. Введение в прикладное дискретное программирование. Москва: ФИЗМАЛИТ, 2002. 240 с.
- 50 Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: Построение и анализ. 2-е издание М. Издательский дом "Вильямс". 2005. 1296 с.
- 51 Belhumeur P. N. A Bayesian approach to binocular stereopsis. *IJCV*. 1996. №19(3). P. 237–260.
52. Thomas H. Cormen Algorithms Unlocked. MIT Press. 2013. 222 с.



53. Roy S., Cox I. J. A maximum-flow formulation of the N-camera stereo correspondence problem. *In ICCV*. 1998. P. 492–499.
54. Zhao H. Global optimal surface from stereo. *Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition*. 2000. Vol. 1. P. 101-104.
55. Рябоконт Д. Использование вращающихся камер для построения панорамных снимков и многокадровой стереорекострукции. *Управляющие системы и машины*. 2004. №1. С. 25-30.
56. Рябоконт Д. Пространственная реконструкция поверхностей по стереопаре изображений с помощью алгоритма поиска минимального сечения на графе. *Управляющие системы и машины*. 2004. №3. С. 47-51.
57. Рябоконт Д. Восстановление пространственной конфигурации объектов и сцен по их стереоизображениям *Управляющие системы и машины*. 2005. №1. С. 22-31.
58. Рябоконт Д. Стереорекострукция та візуалізація тривимірних сцен, що складаються з декількох шарів дальності *УкрОбраз* 2004. Праці 7-ої Всеукраїнської міжнародної конференції Оброблення сигналів та розпізнавання образів. 2004. С. 159–162.
59. Ryabokon D. The spatial reconstruction of earth surface by stereoimages *Праці конференції “Automatic Control in Aerospace” (ACA 2002)*. С. Петербург. 2004. С. 389–394.
60. Szeliski R., Zabih R., Scharstein D., Veksler O., Kolmogorov V., Agarwala A., Tappen M., Rother C. A. Comparative study of energy minimization methods for Markov random fields with smoothness-based priors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2008. №30(6). P. 1068-1080.
- 61 Bennett E., Uyttendaele M., Zitnick L., Szeliski R., Kang S. B. Video and image Bayesian demosaicing with a two color image prior. *ECCV* Springer-Verlag. 2006. Vol. 1. P. 508-521.
- 62 Cheng L., Caelli T. Bayesian stereo matching. *CVIU*. 2007. №106(1). P. 85–96.

- 63 Лисак Ю. В., Русин Б. П. Визначення параметрів випадкового марківського поля для розв'язання задачі погодження стереозображень *Радіоелектроніка та телекомунікації: Вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2008. № 618. С. 180-183.
64. Elias R., Lagani R. Projective Geometry for Three-Dimensional Computer Vision. *School of Information Technology and Engineering University of Ottawa*. Ottawa. 2005. 551 p.
65. Wildes R. Direct recovery of three-dimensional scene geometry from binocular stereo disparity. *On Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991. Vol. 13. No.8. P. 761-774.
66. Woodfill J., Herzen B. Real-time stereo vision on the PARTS reconfigurable computer. *IEEE Workshop in FPGAs for Custom Computing Machines*. 1997. P. 242-250.
67. Chang, C., Chatterjee S., Kube P.R. On an Analysis of Static Occlusion in Stereo Vision. *In: Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*. 1991. P. 722-723.
68. Fua P. A. Parallel Stereo Algorithm that Produces Dense Depth Maps and Preserves Image Features. *Machine Vision and Application*. 1993. Vol. 6. No. 1. P. 432-441.
69. Dhond U.R., Aggarwal J.K. Analysis of the stereo correspondence process in scenes with narrow occluding objects. *Pattern Recognition*. 1992. Vol. 1. P. 470-473.
70. Konolige, K. Small Vision Systems: Hardware and Implementation. Eighth International. *Symposium on Robotics Research*. Hayama. Japan. 1997. P. 750-758.
71. Matthies L. H., Kelly A., Litwin T. Obstacle Detection for Unmanned Ground Vehicles: A. Progress Report. *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*. Detroit. MI. 1995. P. 66-71
72. Little J.J., Gillett W. E. Direct evidence for occlusion in stereo and motion. *Image and Vision Comput.* 1990. №8(4). P. 326 -340.
73. Silva C., Santos-Victor J. Intrinsic Images for Dense Stereo Matching with Occlusions. *European Conf. Computer Vision*. 2000. Vol. 1. P. 100-114.

74. Yuille A. L., Poggio T. A Generalized Ordering Constraint for Stereo Correspondence. *Artificial Intelligence Lab 777. MIT. Cambridge. Mass. 1984. P. 234-242.*
75. Nagel H. H., Enkelmann W. An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences. *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.* 1986. Vol. 8. P. 565–593.
76. Брок. Д. Основы механики разрушения. Москва: Высшая школа, 1980. 368 С.
77. Frankot, R.T., Chellappa, R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms. *IEEE Trans. PAMI.* 1988. Vol. 10. №. 4. P. 431–451.
78. Horn. B.K.P. Height and Gradient from Shading. *International Journal of Computer Vision* 1990. Vol. 5. №1. P. 37–75.
79. Horn B.K.P., Brooks M.J. The variational approach to shape from shading. *Comput. Vision. Graph. Image Process.* 1986. Vol. 33(2). P. 174–208.
80. Brooks M.J., Horn B.K.P. Shape and source from shading. *Proc. Intern. Joint Conf. Artif. Intell.* Los Angeles. 1985. P. 932–936.
81. Horn B.K.P. Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. *Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering. MIT.* 1970. P. 121–129.
82. Horn B.K.P. Obtaining shape from shading information. *In P.H. Winston (ed.), The Psychology of Computer Vision.* New York: McGraw Hill. 1975. P. 115–155.
83. Horn B.K.P. Understanding image intensities (sic). *Artificial Intelligence.* 1977. Vol. 8(2). P. 201–231.
84. Horn B.K.P. Hill shading and the reflectance map. *Proc. IEEE.* 1981. Vol. 69(1). P. 14–47.
85. Horn B.K.P. Extended Gaussian images. *Proc. IEEE.* 1984. Vol. 72(12). P. 1671–1686.
86. Horn B.K.P. Robot Vision. MIT Press: Cambridge. MA; and McGraw-Hill. New York. 1986. 553 p.

87. Horn B.K.P., Bachman B.L. Using synthetic images to register real images with surface models. *Communications of the ACM*. 1978. Vol. 21(11) P. 914–924.
88. Horn B.K.P., Brooks M.J. Shape from Shading. MIT Press. Cambridge. MA. 1989. 525 P.
89. Horn B.K.P., Schunk B.G. Determining optical flow. *Artificial Intelligence* 1981. Vol. 17(3). P. 185–203.
90. Horn B.K.P., Sjoberg R.W. Calculating the reflectance map. *Applied Optics*. 1979. Vol. 18(11). P. 1770–1779.
91. Horn B.K.P., Szeliski R., Yuille A.L. Impossible shaded images, submitted to *IEEE Trans. PAMI*. 1989. Vol. 11(12). P. 760–769.
92. Woodham R.J. Photometric stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from a single view. *Proc. Soc. Photo-Optical Instrument. Engin.* 155. P. 136–143.
93. Woodham R.J. Determining surface curvature with photometric stereo. *Proc. IEEE Conf. Robotics Automat.* 1989. Vol. 11(5) P. 214–224.
94. Кён Му Ли, С.-С. Джей Го. Share Reconstruction From Photometric Stereo. *Университет Южной Калифорнии Лос-Анджелес. 90089-2564 Институт обработки сигналов и изображений*. 2013. 133–141 С
95. ГОСТ 2.309-73 ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей.
96. ISO 468:1982 Surface roughness - Parameters, their values and general rules for specifying requirements.
97. ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture.
98. ISO 1302:2002 Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation
99. Lambert J. H. Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. *Sumptibus viduae E. Klett*. 1760.
100. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima. Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions. *ICIP 2001*. 2001. P. 201-204.

101. Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В., Ануфрієва Н.П., Похмурський А.Ю. Оцінка глибини пітинга за зображеннями поверхні матеріалу. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2010. № 1. С. 83-91.
- 102 Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В., Ануфрієва Н.П. Оцінка глибини тріщини за тріадою зображень. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2010. №2. С. 70–78.
103. Vui-Tuong Phong. Illumination for computer generated images. *Comm. ACM* 1975. Vol. 18 (6). P. 311–317.
104. Синявський А.Т., Русин Б.П. Реалізація методу реконструкції мікроструктури поверхні за її стереозображенням з оптичних камер. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2005. № 2. С. 112–118.
105. Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В., Ануфрієва Н.П. Стереозйомка та погодження зображень, що базується на Phong моделі відбиття світла. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2011. №2. С. 61–69.
106. Rusyn, B.P., Anufriyeva N. P., Hrabovska N. R., Ivaniuk V. H. Nondestructive Testing of the State of Surfaces Damaged by Corrosion Piting. *Materials Science*. 2014. **49**(4). P. 516-524. (Scopus, WEB of Science).
107. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка глибини тріщини за її стереозображенням на основі ламбертівської моделі відбиття. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2015. №4. С 46–53.
108. Смирнов В.И. Курс высшей математики. т. 1. Москва: Наука, 1967. 480 С.
109. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V, Lysak Y., Varetsky J. Information Technology of the Pitting Three–Dimensional Reconstruction by Halftone Images. *Mechanik*. 2015. № 3. P. 372–376.
110. Грабовська Н.Р. Оцінка глибини тріщини за її зображенням Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи, XXIV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 20-22 жовтня 2015 р., Львів. 2015. С. 228–231.

111. Потемкин В.Г. Система МАТЛАБ. Справочное пособие. Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 1998. 350 с.
112. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в МАТЛАБ. СПб. Питер. Киев: Издательская группа ВНУ. 2005. 512 с.
113. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice. 2nd Edition. New York: Technology & Engineering, 2002. 742 P.
114. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №2. С. 58–63.
115. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Корній В.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображень корозійного тріщиноподібного дефекту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. 2016. №11. С. 297–300.
116. tool@microtech-ua.com
117. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2016. № 1. С. 39–46.
118. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Тривимірна реконструкція поверхні за тріадою її зображень. IV наук.-тех. конф. “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”, 28-30 вересня 2016 р., Львів: збірник тезисів. Львів, 2016. С. 197–200.
119. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності. *Вісник НУ Львівська політехніка “Інформаційні системи та мережі”*. 2017. №872. С. 49–61.
120. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Інформатика та системні науки", 16-18 березня 2017 р., Полтава: праці конференції. Полтава, 2017. С. 60–62.

121. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V. Evaluation of Error Pitting Depth in Three – Dimensional Reconstruction. *Application of information technologies-theory and practice*. Poland. 2015. P. 197–204.

122. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображення корозійного пітинга. VIII Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”, 21-23 вересня 2016 р., Запоріжжя: праці конференції. Запоріжжя, 2016. С. 210–214.

123. Ануфрієва Н.П., Русин Б.П., Ковалік Д. Оцінка похибки визначення глибини тріщини в інформаційній технології 3D реконструкції за її 2D зображенням. Комп’ютерна графіка та розпізнавання зображень. Зб. наук. праць міжнар. наук.-техн. Інтернет-конф. Вінниця. 2012. С. 7–21.

124. Yoshizawa. T. Handbook of Optical Metrology -principle and applications. New York: CRC Press, 2009. 744 P.

125. S. Zhang, High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods. *Appl. Opt.* 2011. Vol. 50(12). P. 1753–1757.

126. Рибаків А.О., Семенов С.Є., Гончаренко Л.В. Оцінка стану деформаційного старіння металу газопроводів при використанні сталі контрольованої прокатки. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (звітна сесія цільової комплексної програми. 6-8 січня 2006 р.): наук.-техн. збірник під заг. ред. Б. Є. Патона. Київ: Національна академія наук України. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. 2006. С. 324–327.

127. Красовський А. Я., Ориняк І. В., Лохман І. В. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стрес-корозією. *Трубопровідний транспорт*. 2011. № 2 (68). С. 18-21.

128 Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Оценка влияния движения среды на пассивацию питтингов и их предельные размеры. *Защита металлов*. 2002. Т. 38. № 1. С. 57–64.

129. Арутюнян Р.А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии. *Проблемы прочности*. 1989. № 12. С. 106–108.

130. Myshkin N.K., Kong H., Gngoriev A.Ya., Yoon E.S. The use of color in wear debris analysis. *Elsevier Wear*. 2001. Vol. 251. P. 1218–1226.
131. Похмурський А.Ю., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. Метод оцінки глибини корозійного пітинга. *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип.* 2010. №8 С. 617–623.
132. Русин Б.П., Лисак Ю.В., Похмурський А.Ю., Варецький Я.Ю. Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2011. Т. 47. №2. С. 126–133.
133. Basso A., Graf H. P. , Gibbon D. Digitally-Generated Lighting For Video Conferencing Applications. *ICIP*. 2001. P. 1085–1088.
134. Foley James D. et al. *Computer graphics : principles and practice*. 2nd ed. 1997. 1200 P.
135. Song Zhang Flexible 3-D shape measurement with projector defocusing: Extended measurement range. *Optics Letters. Optical Society of America*. 2010. Vol. 35. No. 7. P. 210–219.
136. Spence A.D. Chantler M.J. Optimal illumination for three-image photometric stereo acquisition of texture. *In Texture 2003: Proceedings of the 3rd international workshop on texture analysis and synthesis*. 2003. P. 89–94.
137. Русин Б.П., Ануфрієва Н.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В., Корній В.В., Юркевич Р.М. Оцінка глибини дефекту зварного з'єднання за 2D зображенням поверхні матеріалу. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2011. №1. С. 75–82.
138. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В. Дистанційне визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень. *Наукові праці ДонНТУ Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*. 2017. №1(24). С. 36–44.
139. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В. Похибка тривимірної реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням. Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи, XXV Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного



інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 27-29 вересня 2017 р., Львів. 2017.  
С. 197-200.

140. <http://conture.by/post/592>.

141. Беленький Я. Е., Кошевой В. В. Системы пространственно-временного преобразования информации. Київ: Наукова думка, 1979. 252 с.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Програми, застосовані в розроблених інформаційних технологіях

#### 3D реконструкції

##### **A1. Програма 3D реконструкції поверхні пітинга за тріадою зображень поверхні матеріалу**

```

Ila =imread('D:\Ivan\Стат100604\StatPit2009\PitIla.bmp');      %
завантаження зображення пітинга, вертикальний напрям світла
Ilaх1=imread('D:\Ivan\Стат100604\StatPit2009\PitIlaх1.bmp'); %
завантаження зображення пітинга, боковий напрям світла в [XZ]
Ilay1=imread('D:\Ivan\Стат100604\StatPit2009\PitIlay1.bmp'); %
завантаження зображення пітинга, боковий напрям світла [YZ]
Af=imread('D:\Ivan\Стат100604\StatPit2009\PitAf.bmp'); % завантаження
зображення fon пітинга
                % завантаження кута бокового напрямку світла fi
Lx=cos(fi); Lz=sin(fi); tgfi=tan(fi); ALx=1/Lx;
pxiv11=tgfi-((ALx)*(Ilaх1-Af)./(Ila-Af)); %визначення
похідної по x
pyiv311=tgfi-((ALx)*(Ilay1-Af)./(Ila-Af)); %визначення
похідної по y
cspyiv311=cumsum(pyiv311(:,1)); %pyiv3 ( реконструкція
глибини z 1 рядка
pxiv11(:,1)=pxiv11(:,1)+cspyiv311(:,1);      %sum z
pxiv9011=rot90(pxiv11,-1);                    % 020413оберт на
-90 град      -> реконструкція глибини z старт фаза 2
mesh(pxiv9011);
cspxiv11=cumsum(pxiv9011);                    %sum по коорд y
cspxiv11=cspxiv11*0.01;
cspxiv9011=rot90(cspxiv11);                  %оберт на +90 град

```

```
mesh(cspxiv9011); %реконструкція глибини
z -
```

## A2. Програма 3D реконструкції поверхні пітинга за його зображенням

```
Pit3111=imread('F:\Dys\Pit1.jpg'); % зображення пітинга ImP
Pit3C=Pit3111(32:374,80:505,:); %Col image ImP
Pit3=Pit3111(32:374,80:505,1); % R image ImP
Pit3123jR=Pit3(:,210:240); %сегмент
    нийкочастотно відфільтрований Pit3123jR
Pit323jR=Pit3123jR(:,5); %одномірний сегмент
Pit33jR=Pit323jR(160:342); %скор одном сегмент
    Завантаження сегментів зображення пітинга
Pit1=imread('D\F:\Dys\Pit2.bmp');
Pit11=Pit10(100:400,70:500,:);
Pit12=Pit11(22:301,1:350,:); % segment image data piting
    Обчислення фонові засвіткі  $I_a$ 
    Pit12fon=Pit12(50:99,180:225,:); YR
=Pit12fon(24,25:45,1);
nnn1=ones(size(YR)); %масив одиниць
    nnn=sum(sum(nnn1)); sr(1)=sum(sum(YR))/nnn; fon=sr(1);
    % визначення IkPlan оцінка інтенсивності відбиття точки площини
 $\hat{I}_{\lambda 0}$ .
    Pit14=Pit12(100:130,150:225,:); % segment image
IkR =Pit14(10:31,:,1); nnn1=ones(size(IkR));
nnn=sum(sum(nnn1)); IkPlan =sum(sum(IkR))/nnn;
Ik0=IkPlan-fon;
fil=3.14*10.5/30.5;% дані по куту fil для Ik, коеф a, b, c
tg=tan(fil); ttgg=tg*tg; Ik1=Ik0*sqrt(ttgg+1);
fi=1.57-fil; sfi=sin(fi); Ik1=Ik0/sfi;
Ik=Ik1*Ik1;
    кара=double(Pit33jR); %визначення похідної q
старт
кара=кара-fon; % дані по параметру капа для коеф a,
b, c старт
кара=кара.^2; кара=кара.^-1; кара=кара.*Ik; fi=1.57-
fil; % дані по куту fi cfi=cos(fi); sfi=sin(fi);
cfiK=cfi*cfi; sfiK=sfi*sfi; cfisfi=-cfi*sfi*2;
a=кара.*cfiK; a=a-1; c=кара.*sfiK; c=c-1;
b=кара.*cfisfi; det=a.*c;
det=det.*4; det1=b.^2; det2=det1-det;
det3=sqrt(det2); p111=-det3-b; p11=p111./a; p11=p11./2;
); % пох q
cspy=cumsum(p11); % sum по коорд y
```

```

[Yma, Ima]=max(cspy); [Ymi, Imi]=min(cspy);
cspy222=cspy-Ymi;
cspy223=-cspy222; ZP=flipud(cspy223); % cspy224=ZP
Заміна
cspy225=ZP; kkk=(0.96285-3.8835)/27;% 1 corect ZP старт
bbb=-3.8835-(kkk*37);
for i=10:36
    ZP(i)=(kkk*i)+bbb;
end
[Ymi11, Imi11]=min(ZP); %макс глибина
Штучна модель пітинга
dell=18;   YYY=ones(Imi11);   YYYY=ones(Imi11);
rrr2=Imi11.^2+0.0001;
for j=1:Imi11
    for i=1:Imi11
        rrr1=i.^2+j.^2;
        if rrr1<rrr2
            YYY(j,i)=rrr1;
        end
    end
end
end
YYY=sqrt(YYY); ZP1=ZP(1:Imi11); ZP2=flipud(ZP1);
for j=1:Imi11
    for i=1:Imi11
        iiii=uint8(YYY(j,i)); FFF(j,i)=ZP2(iiii);
rrr1=i.^2+j.^2;
        if rrr1>rrr2
            FFF(j,i)=ZP2(Imi11);
        end
    end
end
end
FFF90=rot90(FFF);   FFF90=rot90(FFF);   W=rot90(FFF90);
Size=(2*Imi11)-1;   Wp=ones(Imi11,Size);
for i=1:Imi11
    Wp(:,i)=W(:,i);   Wp(:,i+Imi11-1)=FFF90(:,i);
end
Wp90=rot90(Wp);   Wp9090=rot90(Wp90);
Wpp=ones(Size,Size);
for j=1:Imi11
    Wpp(j,:)=Wp(j,:);   Wpp(j+Imi11-1,:)=Wp9090(j,:); %
end
%двомірна інтерполяція
minter=427;   kinter=303/minter;   xi11=1:303;
xi22=1:303;

```

```

yi22=Wpp(xi11,xi22);
[xi1i1,yi1i1]=Meshgrid(1:kinter:303,1:1:303);
WppI=interp2(xi11,xi22,yi22,xi1i1,yi1i1);
Оптимальне зміщення моделі пітинга по горизонтальному напрямку
iva=Imi11; iv=426; ivStart=1; WppIt=WppI; kzzz=1; %
Зміщ x на -1
for i=kzzz+1:iv %Зміщ по x
WppIt(:,i-kzzz)=WppI(:,i);% Зміщ по x
end
Pit7=double(Pit3(344-Imi11:343,:)); Pit8=flipud(Pit7);
Iladel3ser1=6000.0;%початкое значення
for k=19:60 % 1 start зміщення по горизонталі
for i=1:iv-(ivStart-1)
Z90t(:,i+k)=WppIt(:,i); Зміщ по x початкове на -10
end
Z90t2=Z90t(:,1:iv-(ivStart-1)) Z901=Z90t2-0.001;
Z902=double(Z90t2./Z901); Z903=Z902(1:iva,:);% зображення
01
Z903ser=sum(sum(Z903)); % Середне 01
[px,py]=gradient(Z90t2,.1,.1)
Ilay=py*cfi; Ilay=sfi-Ilay; px2=px.^2;% зображення
Ila старт
py2=py.^2; pxу2=sqrt(px2+py2+1); pzn=1./pxу2;
Ila=pzn.*Ilay;
Ila=Ila*Ikl+fon; %інтенсивність відбиття
Ila1=Ila(1:iva,:); % формування сегменту зображення Ila1
Iladel=Ila1-Pit8; Iladel2=Iladel.^2;
Iladel3=Iladel2.*Z903;
Iladel3ser=sum(sum(Iladel3))/Z903ser; %Середне%
if Iladel3ser>Iladel3ser1
break;
end
Iladel3ser1=Iladel3ser;
end %зміщення по горизонталі

```

### Стиск лівої частини моделі пітинга

```

Pit81=Pit8(:,1:213); Ila11=Pit71; minterk2=386;
Iladel3ser1=6900.0;%початкое априорне значення
for ivk=27:42
minter2=minterk2-(ivk*2); %
delminter=(minter2-426)/2;
kinter2=303/minter2; xi11=1:303; xi22=1:303;
yi22=Wpp(xi11,xi22);
[xi1i1,yi1i1]=Meshgrid(1:kinter2:303,1:1:303);
WppI1=interp2(xi11,xi22,yi22,xi1i1,yi1i1);
FFFpp11=WppI1(1,:);

```

```

FFFpp1111=ones(size(FFFpp11));
FFFpp1111s=sum(FFFpp1111);
FFF99pp11=zeros(303,426);
delminterd=uint8((426-FFFpp1111s)/2);
delminterd=double(delminterd);
for i=1:FFFpp1111s
    FFF99pp11(:,i+delminterd)=Wpp11(:,i);
end
delminterd=double(delminterd);    minter=minterk-ivk;
Z90=FFF99pp11;    %модель
Z901=Z90-0.001; Z902=double(Z90./Z901); % 01 зобр пітинга
Z903=Z902(1:Imi11,1:213); %зображення 01 в середені
пітинга
Z903ser=sum(sum(Z903));    % Середне 01
[px,py]=gradient(FFF99pp11,.1,.1) %
Ilay=py*cfi;    % формування тест зображення
Ilay=sfi-Ilay; px2=px.^2; %формування зображення Iла
старт
py2=py.^2; pxy2=sqrt(px2+py2+1);    pzn=1./pxy2;
Ila=pzn.*Ilay;
Ila=Ila*Ikl+fon; %інтенсивність відбиття 1 набл з + -
складовими
Ila1=Ila(1:Imi11,1:213);    % фрагмент штучного зображення I(η1)
Iladel=Ila1-Pit81;    % абсолютна
похибка
Iladel2=Iladel.^2;    % квадрат абсолютної
похибки
Iladel3=Iladel2.*Z903;    % масив квадрату абсолютної похибки
всередені пітинга
Iladel3ser=sum(sum(Iladel3))/Z903ser;    % обчислення
суми і середне
if Iladel3ser>Iladel3ser1    %
    break;
end
Iladel3ser1=Iladel3ser;    %доні циклу
end % ivk цикл

```

### Стиск правої частини моделі пітинга

```

Pit82=Pit8(:,214:426);    minterk2=416;    Iladel3ser1=8800.0;
for ivk=4:45
minter2=minterk2-(ivk*2delminter=(minter2-426)/2;
kinter2=303/minter2;
    xi11=1:303;    xi22=1:303;    yi22=Wpp(xi11,xi22);
[xi1i1,yi1i1]=Meshgrid(1:kinter2:303,1:1:303);

```

```

WppI1=interp2(xi11,xi22,yi22,xi1i1,yi1i1,'cubic');
FFFpp11=WppI1(1,:); FFFpp1111=ones(size(FFFpp11));
FFFpp1111s=sum(FFFpp1111); FFF99ppI1=zeros(303,426);
delminterd=uint8((426-FFFpp1111s)/2);
delminterd=double(delminterd);
for i=1:FFFpp1111s
    FFF99ppI1(:,i+delminterd)=WppI1(:,i);
end
delminterd=double(delminterd);
    Z90=FFF99ppI1; %мод
    Z901=Z90-0.001; Z902=double(Z90./Z901); % 01 зобр пітінга
Z9033=zeros(size(Z90));
    Z903ser=sum(sum(Z903)); % Середне 01
[px,py]=gradient(FFF99ppI1,.1,.1) %
    Ilay=py*cfi; % формування тест зображення
Ilay=sfi-Ilay;
px2=px.^2;% формування зображення Ila старт
py2=py.^2; pxу2=sqrt(px2+py2+1); pzn=1./pxу2;
Ila=pzn.*Ilay;
Ila=Ila*Ikl+fon; %інтенсивність відбиття
Ila1=Ila(1:Imi11,214:426); % фрагмент штучного зображення I(ηr)
Iladel=Ila1-Pit82; % абсолютна похибка
    Iladel2=Iladel.^2;
    Iladel3=Iladel2.*Z903; % масив квадрату абсолютної похибки
всередені пітінга
Iladel3ser=sum(sum(Iladel3))/Z903ser; % обчислення суми і
середне
if Iladel3ser>Iladel3ser1 %
    break;
end
Iladel3ser1=Iladel3ser; % доні циклу
end %ivk цикл

```

## Додаток Б

### Акти впровадження результатів дисертації

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Начальник БМУ-4

Філії БМФ "Укргазпромбуд"

АТ "Укртрансгаз"

Боднар В.М.

“02” червня 2018 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Грабовської Н.Р.  
“Інформаційні технології тривимірної реконструкції зображень поверхневих  
дефектів для ламбертівської моделі відбиття світла”

Комісія в складі:

Голова комісії: Коваль Р.М. – головний інженер;

Члени комісії: Омелянчук С.М. – начальник планово-виробничого відділу;  
Заборський О.Ю. – провідний інженер ПВВ,

встановила, що в дисертаційній роботі Грабовської Н.Р. одержані важливі науково-технічні результати, які стосуються застосування методів неруйнівного контролю для виявлення, та відновлення тривимірної форми та визначення глибини приповерхневих дефектів (пітингів та тріщин) труб магістральних газопроводів і приймаються до впровадження у виробничий процес БМУ-4 філії БМФ "Укргазпромбуд" АТ "Укртрансгаз".

Одержані нові результати полягають в наступному:

- вперше розроблено нову інформаційну технологію тривимірної реконструкції дефекту за тріадою зображень його поверхні при використанні ламбертівської моделі відбиття світла та проведена оцінка похибки визначення глибини дефекту, що має принципове значення при оцінці ресурсу безперебійної і безаварійної роботи газопроводу;
- запропоновано удосконалену комплексну інформаційну технологію тривимірного відновлення форми пітингів за стереозображеннями поверхні трубопроводу. Технологія дозволила вперше усунути вплив загороджених пікселів, що дозволяє значно підвищити достовірність прогнозування ресурсу роботи конструкції;
- розроблена установка відеозйомки поверхні з дефектами, які виникають в процесі дії корозійного середовища, а також програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані нові інформаційні технології, які прийнято для впровадження у виробничий процес у БМУ-4 філії БМФ "Укргазпромбуд" АТ "Укртрансгаз", як один із засобів неруйнівного контролю ресурсу безаварійної роботи газопроводів.

Головний інженер

Начальник ПВВ

Провідний інженер ПВВ

Коваль Р.М.

Омелянчук С.М.

Заборський О.Ю.





### АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

### Грабовської Наталії Романівни

Комісія в складі: голова комісії: Фрищин В.О. – головний інженер

члени комісії: Фрищин Р.В. – начальник ЛЕС;

Вірста О.Я. – інженер з технічного нагляду I кат.

цим актом підтверджують, що для вдосконалення методики неруйнівного контролю пошкоджень газопроводів при їх візуально-оптичному огляді було використано результати дисертаційної роботи Грабовської Н.Р. на тему: **«Інформаційні технології тривимірної реконструкції зображень поверхневих дефектів для ламбертівської моделі відбиття світла»**, а саме:

- запропонований метод автоматизованого дистанційного контролю напрямку освітлення поверхні об'єкту, який дозволяє здійснити такий контроль на основі ламбертівської моделі відбиття світла по трьом векторам нормалі до тестової поверхні, що має триаду площин;
- розроблений метод тривимірної реконструкції за стереозображенням, в якому застосовуються два напрямки освітлення відеозйомки і який зменшує в процесі відтворення форми дефекта вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла.

Ефективність практичного застосування 3D реконструкції перевірена для пітингоподібних поверхневих дефектів, які виникають у процесі тривалої експлуатації газопроводів. Це дало змогу підвищити ефективність виявлення небезпечних чинників для оцінки надійності експлуатації газотранспортної інфраструктури. Таким чином можна стверджувати, що результати дисертаційного дослідження Грабовської Наталії Романівни мають практичне значення і прийняті для впровадження у виробничий процес.

Голова комісії

Фрищин В.О.

Члени комісії:

Фрищин Р.В.

Вірста О.Я.

## Додаток В

### Список публікацій здобувача

1. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В. Дистанційне визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень. *Наукові праці ДонНТУ Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*. 2017. №1 (24). С. 36–44.
2. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності. *Вісник НУ Львівська політехніка “Інформаційні системи та мережі”*. 2017. №872. С. 49–61.
3. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Корній В.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображень корозійного тріщиноподібного дефекту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. 2016. №11. С. 297–300.
4. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2016. № 1. С. 39–46.
5. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка глибини тріщини за її стереозображенням на основі ламбертівської моделі відбиття. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2015. №4. С. 46–53.
6. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V, Lysak Y., Varetsky J. Information Technology of the Pitting Three-Dimensional Reconstruction by Halftone Images. *Mechanik*. 2015. № 3. P. 372–376.
7. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №2. С. 58–63.
8. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V. Evaluation of Error Pitting Depth in Three-Dimensional Reconstruction. *Application of information technologies-theory and practice*. Poland. 2015. P. 197–204.

9. Rusyn, B.P., Anufriyeva N.P., Hrabovska N.R., Ivaniuk V.H. Nondestructive Testing of the State of Surfaces Damaged by Corrosion Pitting. *Materials Science*. 2014. 49 (4). P. 516–524. (Scopus, WEB of Science).

10. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В. Похибка тривимірної реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням. Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи. XXV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 27-29 вересня 2017 р., Львів. 2017. С. 197–200.

11. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Інформатика та системні науки", 16-18 березня 2017 р., Полтава: праці конференції. Полтава, 2017. С. 60–62.

12. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображення корозійного пітинга. VIII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", 21-23 вересня 2016 р., Запоріжжя: праці конференції. Запоріжжя, 2016. С. 210–214.

13. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Тривимірна реконструкція поверхні за тріадою її зображень. IV наук.-тех. конф. "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації", 28-30 вересня 2016 р., Львів: збірник тезисів. Львів, 2016. С. 197–200.

14. Грабовська Н.Р. Оцінка глибини тріщини за її зображенням Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи, XXIV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 20-22 жовтня 2015 р., Львів. 2015. С. 228–231.