

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ВЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ І БЕТОНИ ТА ЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

УДК 624.012:69.07

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ
ЗОБРАЖЕННЯ**

**STUDY OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF
MATERIALS USING DIGITAL IMAGECORRELATION**

**Бліхарський Я.З., к.т.н., доц.,ORCID 0000-0002-3374 -9195(Національний
університет «Львівська політехніка», м.Львів)**

**Blikharskyu Ya. Z., PhD, assoc. prof.,ORCID 0000-0002-3374 -9195(Lviv Polytechnic
National University)**

Abstract. This paper presents the results of the analysis of digital image correlation techniques` application for the study of physical and mechanical characteristics of building materials. The method of digital image correlation is an optical method based on mathematical correlation analysis of digital images. As the result, with the use of the technique it is possible to assess changes in the surface characteristics of the material and understand the structural element behavior. On the basis of the review, it can be argued that methods, which use digital image correlation have extremely broad prospective for diagnosis, monitoring and control of building structures and materials. DIC methods allow to obtain the complete spatial information model of the structure stress-strain state.

Абстракт. На даний час у нашій країні виникає багато завдань пов'язаних з реконструкцією діючих підприємств. При цьому зріст виробництва може бути досягнутий, у значній мірі, за рахунок вдосконалення технологічних процесів, виробничих режимів і максимального використання існуючих приміщень. Але будь-яка реконструкція супроводжується, як правило, зміною навантаження на будівельні конструкції і зміною їх початкових конструктивних схем, що приводить в свою чергу до необхідності збільшення несучої здатності конструкцій, тобто їх підсилення. Необхідність підсилення будівельних конструкцій в процесі експлуатації виникає не тільки при реконструкції, але й з причин їх передчасного зношування внаслідок непередбачених проектом змін технології виробництва при діючому обладнанні, різноманітних пошкоджень та інших причин. Оскільки серед будівельних конструкцій, які використовуються вже багато років у промислових будинках і спорудах, переважають залізобетонні, то

узагальнення і аналіз існуючих пропозицій з проектування і застосування ефективних методів підсилення таких конструкцій мають велике значення. Проведені раніше дослідження стосуються, головним чином, способів, методів та технологій посилення, які не враховують напруженого стану елемента до відновлення. В частині досліджень передісторію роботи згинаного елемента до посилення рекомендується проводити приблизно, понижуючи рівень напруження в арматурі посилення за допомогою коефіцієнтів, які враховують лише рівень розвантаження. Відсутні рекомендації по оцінці залишкової міцності згинаного елемента. Відсутність досліджень не дає можливості точно оцінити несучу здатність вже посиленого згинаного елемента, відбувається перевитрата матеріалів. Саме тому, виникає потреба у розробленні нових методик експертизи залізобетонних конструкцій для оцінки реального залишкового ресурсу. Одною з новітніх методик є використання цифрової кореляції зображення. В даній роботі представлено можливість використання методики для експертизи конструкцій.

Keywords: digital image correlation, reinforcement, reinforced concrete elements, physico-mechanical characteristics, building materials
цифрова кореляція зображення, залізобетонні елементи, фізико-механічні характеристики, будівельні матеріали.

Introduction. Reliable measurement of deformations in the material is an important aspect in the study of the stress-strain state of building structures. The deformation parameters of the material are determined by the percentage of length, comparing with its initial value and could be further used to assess other physical and mechanical characteristics of the material (Poisson's ratio, Young's modulus), as well as to construct the complete diagram of the stress-strain state, etc. [213]. Recently, studies of the behavior of materials under loading have become increasingly detailed and, accordingly, there is the need for techniques, which make it possible to build the complete picture of deformations` distribution on the surface of the element [213]. That is why the topical issue is the use of the latest advanced methods, among which one of the most common is the method of digital image correlation (DIC).

Research objectives and goals. The main purpose of this work is the detailed review of existing experimental and theoretical studies of physical and mechanical characteristics of materials using the technique of digital image correlation. The article also includes research of the main aspects, advantages and disadvantages of the digital image correlation technique based on a review of recent studies.

Analysis of recent research. The method of digital image correlation is an optical method based on mathematical correlation analysis of digital images of the studied element in different stress-strain states [213]. The algorithm of the method includes continuous capturing of images by the digital camera during the

deformation process of the structure under loading. As a result, the researcher is able to assess changes in the surface characteristics of the material and understand the behavior of the structural element.

To apply the method, the spectrum of points of certain density (also known as certain point pattern) is applied to the investigated surface of the sample [213]. During the analysis, first is considered the image of the surface before the application of the load (reference image), with which the images corresponding to different stages of the deformation process are compared. All the "deformed" images are characterized by a different distribution of dots on the surface, comparing with the initial one. With the help of special software, the mathematical comparison of displacements in point patterns is performed and a complete map of the strain and stress distribution is formed (see Fig. 1). Among the most common software packages used for data processing are VIC-2D (Correlated Solutions Company, [234] and ARAMIS (GOM Company) [235].

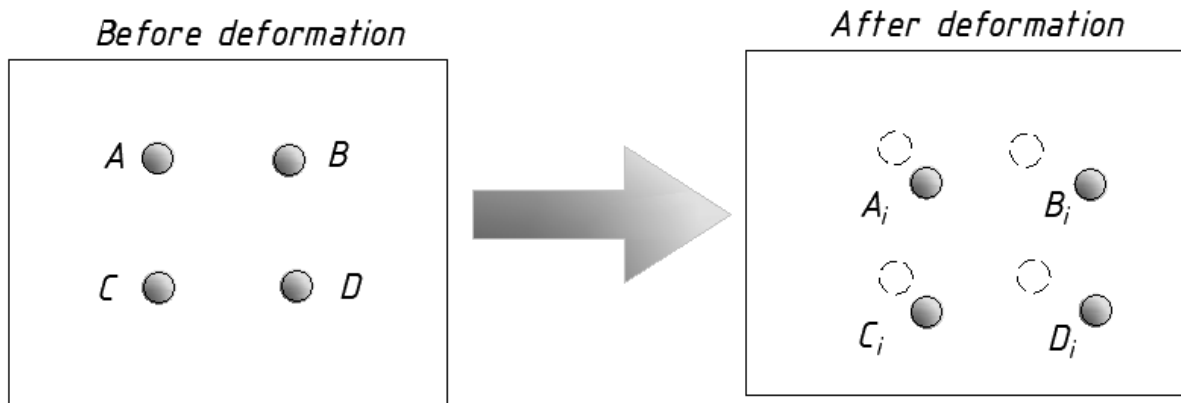


Fig. 1. Principal deformation scheme in the DIC method

According to [236], digital image correlation is extremely flexible in its applications. For example, in addition to the ordinal operating conditions of the building structure, the appropriate areas of this method application are the study of fatigue stresses and cracks in the metal, the accumulation of thermal stresses in the material, dynamic tests, etc. [236, 237].

The authors in [238] note that the DIC method is currently one of the best developed ways to combine the theoretical approach with controlled accuracy level and experimental data. As a result, it is possible to obtain the complete information model of the studied structure.

Prior to the experiment, it is necessary to determine the main parameters of the laboratory setup, which include the following: digital image resolution (number of pixel columns c , number of pixel rows r), width w and height h of the sample, distance between camera and sample d , lens focal length f and the parameters of the pattern from the points on the test surface. The schematic diagram of all devices used during the experimental study is shown in Fig. 2.

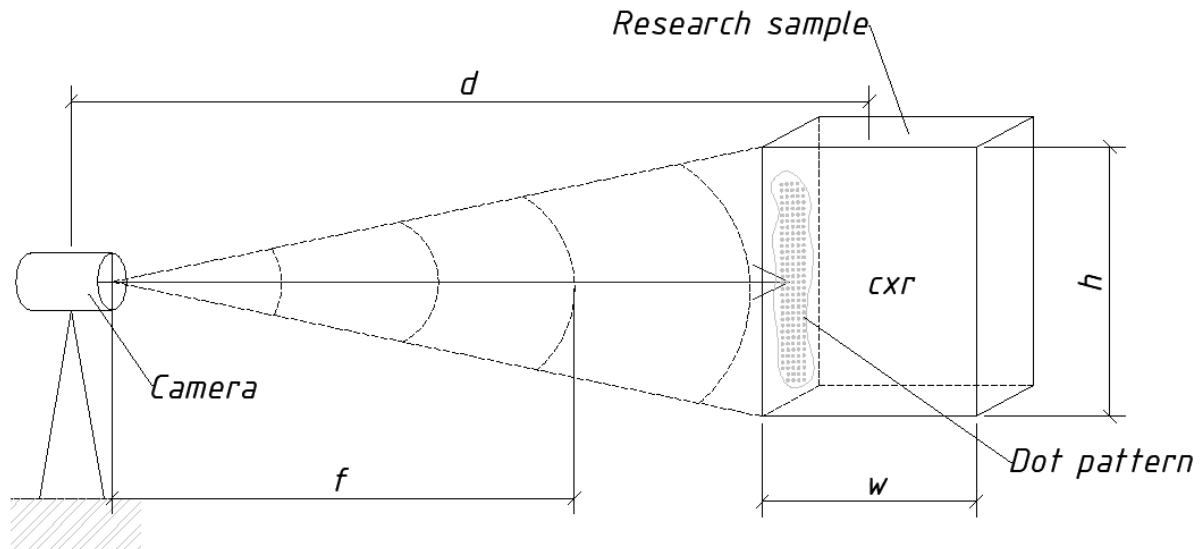


Fig. 2. Variables in the DIC method

The dot pattern parameters are another important factor because they determine how accurately the displacements can be calculated. The pattern, according to the recommendations [213], should contain sufficient number of dots of different sizes. The efficiency of the pattern is determined by the number of pixels per point p (10, 20 and 30 pixels for small, medium and large points, respectively). The appropriate dot size can then be determined depending on the ratio of the number of dots of different sizes and the area of the surface that is displayed by one pixel of the image.

Researchers [239-244] studied the methods of optimizing the dot pattern. For example, the authors in [239] based on a number of experimental studies have found that the most optimal option is a pattern with points of different radius. In [242] it is noted that the pattern with optimal contrast, size and density should be formed automatically based on computer simulations. The parameters of the points could also be optimized by 25%, by applying a numerical indicator of the distribution quality [243-244]. Recently, Micro Speckle Stamping technology has been developed, which uses materials with high electrical and optical contrast, which leaves no traces between the points of the pattern and is particularly suitable for surfaces of complex configuration and large areas [245].

The data obtained during continuous reading are then interpreted by the software as relative deformations ϵ_x, ϵ_y , on the basis of which we have the opportunity to construct complete diagrams in the "stress-strain" coordinates [246-247]. Examples of the use of digital correlation to obtain the complete information model of the stress-strain state of the surface are also presented in papers [248-259]. In addition to obtaining a picture of deformations on the plane, the DIC methods also allow three-dimensional modeling of structural characteristics, which is almost impossible to do by traditional means [250, 253, 254, 257, 259].

Conclusions and prospects for further research.Based on the review, it can be argued that methods using digital image correlation have extremely broad prospects for diagnosis, monitoring and control of the condition of building structures and materials. DIC methods allow to obtain a complete spatial information model of the state of the structure and to make optimal and effective decisions both at the design stage and during the reconstruction of existing buildings and structures.

1. Tryapitsin Y., Pakhomov V., Voinov S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. E3S Web of Conferences, vol. 138, № 01016(2019), CATPID-2019/URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801016> (last access: 09.02.2020).

2. Вискобійник О.П., Кітаєв О.О., Макаренко Я.В., Бугаєнко Є.С. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), 2011.- Вип. 1 (29), ст. 87-92.

Vyskobiynyk O.P., Kitaev O.O., Makarenko YA.V., Bugaenko E.S./ Experimental investigation of reinforced concrete beams with defects and damage that cause a sloping bend. Collection of scientific works (industry engineering, construction), 2011. - Issue. 1 (29), pages 87-92.

3. Christodoulou C., Goodier C. I./ Corrosion management of reinforced concrete structures. Loughborough University's Institutional Repository- Concrete (London), UK-2014-pages.37-39.

4. Mongelós. P. D. B. /Maintenance support strategies for reinforced concrete structures under corrosion risk. Doctoral thesis. Universidade de Aveiro Ano, 2018. Departamento de Engenharia Civil.-221 p.

5. Bobalo T., Blikharsky Y., Kopyika N., Volynets M./ Theoretical analysis of RC beams reinforced with high strength rebar's and steel plate. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. vol.708-012045

6. Бабич Є. М./ Розрахунок і конструювання залізобетонних балок : навч. посіб. / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич. – 2-ге вид. перероб. і доп. – Рівне : НУВГП, 2017. – 191 с.

Babych E.M., Babych E.M./ Calculation and construction of reinforced concrete beams: textbook. - 2nd ed. - Rivne: NUVGP, 2017. - 191 p.

7. Борисюк, О. П., Ю. Ю. Зятюк./ Напружено–деформований стан залізобетонних балок підсилених під навантаженням сталевібробетоном і композитами при дії малоциклових навантажень. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди № 33 (2016), ст. 303-313.

Borisyk, O.P., Zatiuk Yu. Y./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams reinforced under load with steel fiber and composites under the action of low-cycle loads. Resources, Materials, Structures, Buildings and Structures № 33 (2016), pages 303-313.

8. Christodoulou, C./ Repair and Corrosion Management of Reinforced Concrete Structures. Loughborough's Research Repository, Loughborough University. EngD thesis, 2019./ URL: <https://hdl.handle.net/2134/13577>.

9. Indeitsev D.A., Porubov A.V., Skubov D. Yu., Lukin A.V., Popov I.A., Vavilov D.S./ On the influence of the microstructure on stress-strain state of the material. Materials Physics and Mechanics, vol. 35, 2018, pages 66-70.

10. Воскобійник О.П./Типологічне порівняння дефектів та пошкоджень залізобетонних, металевих та сталезалізобетонних балкових конструкцій Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"- 2010. - № 662. - ст. 97-103.

Voskobiynyk O.P./ Typological comparison of defects and damages of reinforced concrete, metal and steel-reinforced concrete beam structures. Nat. Lviv Polytechnic University Journal - 2010. - № 662. - pages 97-103.

11. Воскобійник О.П./Класифікація дефектів сталезалізобетонних каркасів. Строительство. Материаловедение. Машиностроение.-Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.- 2012.- Вип. 65.- ст. 155-160.- Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25 /

Voskobiynyk O.P./ Classification of defects of steel-concrete frames. Construction. Material science. Mechanical Engineering. - Series: Innovative Technologies for the Life Cycle of residential, civil, industrial and transport objects. 2012. Issue.65.- pages 155-160.- Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2012_65_25

12. Thomas M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J. Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book (No. FHWA-HIF-13-019), 2013, United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.

13. Fouzia B., Fouzi H.M., Nouredine F./ Concrete Structures and the Aggressive Environments: Experimental and Numerical Simulation// Conference: International Conference on Water, Informatics, Sustainability, and Environment iWISE2019, At: Carleton University – Ottawa, August 2019

14. Habita M. F./ Contribution to the Study of the Alkali-Silica-Reaction Effect, on the Mechanical Behaviour of Reinforced Concrete Beams. 1992. PhD Thesis. Thesis for obtaining of doctorate diploma.

15. Christodoulou, C./ Repair and corrosion management of reinforced concrete structures, EngD Thesis, Loughborough University, 2013.

16. Samarai M., Saad R., Amer O., Tahmaz A., Marei Y./ Repair of major faculty concrete structures, 2019. International Operations & Maintenance Conference 2019 17th Edition . At: Dubai - United Arab Emirates, 4 p.

17. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi, S./ A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures. EDP Sciences. In E3S Web of Conferences, 2019. Vol. 91, pages. 02046.

18. Бліхарський, Я. З., Копійка, Н. С./ Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2019 (37), ст. 316-322.

Blikharskyu Y.Z., Kopyika, N.S./ Research of damaged reinforced concrete elements, basic methods of their restoration and strengthening. Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures, 2019 (37), pages. 316-322.

19. Хміль Р. Є., Вашкевич Р. В., Бліхарський Я. З./ Напружено-деформований стан залізобетонних балок, пошкоджених агресивним середовищем. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 655: Теорія і практика будівництва. ст. 278–285.

Khmil R.E., Vashkevych R.V., Blikharskyi J.Z./ Stress-deformed state of reinforced concrete beams damaged by the aggressive environment. Bulletin of the "Lviv Polytechnic" National University, 2009. № 655: Theory and practice of construction. pages 278–285.

20. Бліхарський Я.З., Копійка Н.С./ Дослідження методик моніторингу і моделювання корозійних процесів в залізобетонних елементах. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2019. Вип. № 77. ст.29-37.

Blikharskyi Y.Z., Kopyika N.S./ Investigation of methods of monitoring and modeling of corrosion processes in reinforced concrete elements. Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2019. Vol. 77. pages 29-37.

21. Sidorov D., Dorozhinskiy V./ Comparison of the stress-strain state of the reinforced concrete structure under various mathematical models of concrete. MATEC Web of Conferences 251, 04032. 2018. IPISE-2018. pages 1-5.

22. Radchenko A., Radchenko P., Batuev S., Plevkov V./ Modeling of fracture of reinforced concrete structures under impact. Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4, Issue 3, pages 22-29.

23. Tryapitsin, Y., Pakhomov, V., Voinov, S./ Analysis and regulation of the stress-strain state of structures with reliability. In E3S Web of Conferences Vol. 138, pages 01016. EDP Sciences.

24. Ткачук, І. А. Несна здатність залізобетонних згинаних конструкцій при силових, деформаційних та високотемпературних впливах. Дороги і мости, (11), 2009. ст. 349-353.

Tkachuk, I.A/ Carrying capacity of reinforced concrete bent structures under power, deformation and high temperature influences. Roads and Bridges, (11), 2009. pages 349-353.

25. Zandi, H. K. Structural behaviour of deteriorated concrete structures. Doctor of Philosophy. 2010./ Available through: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.007> (Accessed on 10.02.2020).

26. Dai, L., Bian, H., Wang, L., Potier-Ferry, M., Zhang, J./ Prestress Loss Diagnostics in Pretensioned Concrete Structures with Corrosive Cracking. Journal of Structural Engineering, 2020. Vol. 146, Issue 3, 04020013. pp. 1-11.

27. Geiker M. R., Justnes H./ Prediction of chloride induced corrosion for service life modeling. International Congress on Durability of concrete, 2012. 12 p.

28. A. Küter, M. R. Geiker, J. F. Olesen, H. Stang, C. Dauerschmidt, and M. Raupach./ Chloride Ingress in Concrete Cracks under Cyclic Loading. in Proceedings of Third International Conference on Construction Materials, ConMat'05, Vancouver, Canada. 22nd – 24th of August, 2005.

29. Ayinde O. O., Zuo X. B., Yin G. J./ Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion. Advances in concrete construction, 2019. Vol. 7- Issue 4, pages 203-210.

30. Webster, M. P. The assessment of corrosion-damaged concrete structures (Doctoral dissertation, University of Birmingham). 2000. 318 p.

31. Teplý B., Novák D./ Limit states of concrete structures subjected to environmental actions. Engineering Mechanics, 2012. Vol. 99, pages 1363–1367.

32. Le D. B., Tran, S. D., Dao, V. T., Torero, J./ Deformation capturing of concrete structures at elevated temperatures. Procedia engineering, 210, 2017 pages 613-621.

33. Elyasigorji A., Rezaee M., Ghorbanpoo, A./ Magnetic Corrosion Detection in Concrete Structures. In International Conference on Sustainable Infrastructure, 2019. p. 175.