

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЗІНЧЕНКО ГАННА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 624.012.45:620.17+620.19

ДИСЕРТАЦІЯ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І РУЙНУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНО ПОШКОДЖЕНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Спеціальність 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Ганна ЗІНЧЕНКО

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор В.С. Дорофєєв

*Перший примірник дисертації є ідентичним
за змістом зі всіма іншими примірниками*

Учений секретар

 Олексій ДРОЖЖИН

Одеса – 2021

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ABSTRACT.....	7
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	11
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	19
1.1 Формування технологічної пошкодженості бетону на мікро- та макрорівні	19
1.2 Механізм утворення і розвитку тріщин у мікро- та макроструктурі композиційних будівельних матеріалів.....	32
1.3 Умови зростання зародкових тріщин в період організації мікроструктури композиційних будівельних матеріалів.....	39
1.4 Методи неруйнівного контролю та дослідження напружено-деформованого стану згинальних елементів.....	43
1.4.1 Ультразвуковий метод.....	44
1.4.2 Електротензометричний метод.....	45
1.4.3 Поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень (метод фотопружності).....	48
1.5. Моделі критеріїв руйнування.....	50
1.6 Застосування математичного апарату механіки руйнування для дослідження полів напружень і деформацій біля вершини тріщини в елементах, що згинаються.....	54
1.7. Список використаних джерел у розділі 1.....	59
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1.....	59
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖУВАНІ ЗРАЗКИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	60
2.1 Методика дослідження полів напружень і деформацій на моделях	60
2.2 Методика визначення технологічної пошкодженості досліджуваних залізобетонних зразків	62
2.3. Методика дослідження напружено-деформованого стану бетонних і залізобетонних експериментальних зразків.....	64
2.4. Методика проведення експерименту на залізобетонних зразках.....	69
2.4.1. Удосконалена методика визначення технологічної пошкодженості в залізобетонних елементах, що згинаються (визначення глибини технологічної тріщини із застосуванням ультразвукового методу).....	71
2.5. Методика математичного опису напружено-деформованого стану біля вершини технологічної тріщини в згинальних елементах (з використанням силових та енергетичних критеріїв руйнування).....	74
2.6. Метод розкладання за власними функціями як модель опису напружень та переміщень біля вершини силової тріщини.....	83
2.7. Список використаних джерел у розділі 2	87

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	88
3.1. Напруження та деформації технологічно пошкоджених моделей- балок	88
3.2. Визначення технологічної пошкоженості залізобетонних зраз- ків-балок.....	95
3.3. Розвиток тріщин під навантаженням в залізобетонних зразках- балках.....	96
3.4. Деформування залізобетонних зразків-балок під дією малоцикло- вого навантаження.....	99
3.5. Визначення глибини технологічної тріщини в залізобетонних зразках-балках ультразвуковим методом.....	108
3.6. Врахування роботи розтягнутого бетону над тріщинами в залізо- бетонних зразках-балках.....	114
3.7. Список використаних джерел у розділі 3	115
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3.....	116
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПИСУ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ БАЛОК.....	117
4.1. Асимптотичне рішення задачі про зростання тріщини в середо- вищі з пошкодженістю.....	117
4.2. Опис напружено-деформованого стану біля вершини тріщини ек- спериментальних балок в умовах змішаного деформуван- ня.....	121
4.3. Модель Леонова-Панасюка-Дагдейла як модель аналізу локаліза- ції пластичних деформацій біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних конструкціях, що згинаються.....	125
4.3.1. Розподіл нормальних напружень і переміщень на продовжен- ні тріщини нормального відриву.....	126
4.3.2. Розподіл залишкових напружень і переміщень уздовж лінії тріщини нормального відриву після першого циклу навантаження- розвантаження.....	130
4.4. Список використаних джерел у розділі 4	137
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА ДИСЕРТАЦІЄЮ.....	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
ДОДАТОК 1.....	151
ДОДАТОК 2.....	152

АНОТАЦІЯ

Зінченко Г.В. Напружено-деформований стан і руйнування технологічно пошкоджених залізобетонних конструкцій. –Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, Одеса, 2021.

Дисертація присвячена теоретичному узагальненню і новому вирішенню наукової проблеми, щодо необхідності аналізу утворення технологічних тріщин та причин їх зародження в залізобетонних конструкціях на мікро- і макрорівнях, вивченню впливу пошкоджень на напружено-деформований стан, тріщиностійкість, деформативність і довговічність конструкцій в процесі експлуатації.

Для раціонального проектування залізобетонних конструкцій і їх елементів необхідне вдосконалення методів розрахунку, що призводить до більш детального вивчення властивостей бетону і роботи залізобетонних конструкцій під навантаженням. Так, однією з порівняно недавно виявлених особливостей бетону є його пошкодженість технологічними тріщинами.

Дослідження, проведені авторами за останні 30 років показали, що залізобетонні конструкції в процесі переробки у виробі отримують технологічні (спадкові) пошкодження на мікро- і макрорівні. Отримані ушкодження і структурні недосконалості впливають на роботу і поведінку конструкцій в процесі експлуатації. Вони змінюють міцність, деформативність, напружено-деформований стан, характер утворення і розвиток силових тріщин, а також довговічність роботи конструкцій і систем. Тому важливо виконати аналіз утворення технологічних тріщин і причин їх зародження в залізобетонних конструкціях на мікро- і макрорівнях, вплив пошкоджень на напружено-деформований стан, тріщиностійкість, деформативність і довговічність в процесі експлуатації.

Метою роботи є подальше вивчення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, що згинаються, та узагальнення інформації про тріщиноутворення в матеріалах і конструкціях, вплив технологічної пошкодженості на розвиток тріщин від зовнішніх впливів і навантажень, визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщин від зовнішніх впливів і навантажень та встановлення впливу технологічних тріщин на несучу здатність, деформативність і експлуатаційні характеристики конструкцій.

Проведення дослідження механізмів формування макроструктури бетонів показали, що причинами зародження і розвитку несучильностей в твердіючому матричному матеріалі, які вироджуються у внутрішні поверхні розділу або технологічні тріщини, є градієнти деформацій.

В роботі запропонована комплексна модель структури будівельних матеріалів на мікро- і макрорівнях, яка за допомогою енергетичних та силових критеріїв руйнування дає можливість описати процес зростання макротріщини.

Запропонована модель, що дозволить встановити характер розподілу напружень та утворення тріщин в елементах, що згинаються.

Метод фотопружності дозволив визначити розподіл напружень в композитах регулярної структури до появи тріщин на мікрорівні з концентрацією напружень на включеннях. Це дозволило використовувати співвідношення лінійної теорії пружності для кусково-однорідного тіла без розривів і тріщин.

Показана можливість оцінки залишкових деформацій в прозорих моделях за допомогою даного методу. Згідно проведеного експерименту можна стверджувати, що поляризаційно-оптичним методом ідентифікуються переважені і недовантажені області досліджуваного зразка.

Наведено результати експериментально-теоретичних досліджень технологічно пошкоджених елементів, що згинаються. Досліджено напружено-деформований стан залізобетонних балок при дії малоциклового навантаження. Встановлено характер тріщиноутворення, розвитку тріщин і руйну-

вання балок в залежності від технологічної пошкодженості бетону. Зі збільшенням коефіцієнта технологічної пошкодженості в залізобетонних зразках збільшується і ступінь тріщиноутворення в процесі випробувань. Всі тріщини в дослідних зразках розвивалися по траєкторії технологічних тріщин, що дає можливість прогнозувати місце їх появи і напрямок розвитку.

Експериментально встановлено, що залишкові деформації зі збільшенням навантаження підрастають до 0,3 від навантаження руйнування.

Експериментально доведено, що методи неруйнівного контролю, не змінюючи якості, параметрів і характеристик виробу, дозволяють за непрямими ознаками виявити приховані дефекти.

Ультразвукові дослідження показали присутність невидимих технологічних тріщин, які були присутніми у зразках, що випробувались і при відсутності дії згинаючого моменту.

Отримана модель визначення глибини технологічних тріщин в елементах, що згинаються, до прикладання навантаження. Це дає можливість прогнозувати утворення силової тріщини в згинальних елементах та ріст похилої тріщини в зоні сумісної дії моменту та поперечної сили.

Наведено асимптотичний аналіз напружено-деформованого стану і поля суцільності біля вершини тріщини нормального відриву в середовищі з пошкодженістю у зв'язаній постановці задачі ("пружність-пошкодженість") для плоского напруженого стану. Описано побудову асимптотичного рішення задачі, заснованого на методі розкладання за власними функціями.

Запропонована математична модель опису та алгоритм чисельного визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних елементах, що згинаються, в умовах змішаного навантаження.

Ключові слова: технологічне пошкодження бетону, напружено-деформований стан, залізобетонні елементи, що згинаються, поляризаційно-оптичний метод, циклічне навантаження, асимптотичний аналіз, метод розкладання за власними функціями.

ABSTRACT

Zinchenko H.V. Stress-deformed state and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. – On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.01 - Building constructions, buildings and constructions. - Odessa National Maritime University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2021.

The scientific work is dedicated to the theoretical generalization and to the new solution of the scientific problem on the need to analyze the appearance of technological cracks and the reasons for their emergence in concrete structures at the micro and macro levels, studying the impact of injuries on the stress-strain state, crack, deformation and durability of structures during operation.

The forecasting of a failure of the responsible engineering systems and construction elements represents an important practical problem, the analysis of which in theoretical, as in applied aspects is paid much attention. For the rational reinforced concrete constructions and their structures design it is necessary to improve calculation method, that entails more detailed study of concrete properties and reinforced concrete constructions' work under load. Thus, one of the concrete's features that has been identified recently, is its damage by technological cracks.

The studies, conducted by the authors over the past 30 years have shown that reinforced concrete structures in the process of processing into products receive technological (hereditary) damage at the micro and macro levels. The resulting damage and structural imperfections affect the operation and behavior of structures during operation. They change the strength, deformability, stress-strain state, the nature of the appearance and the development of force cracks, as well as the durability of the structures and systems. Therefore, it is important to analyze the occurrence of technological cracks and the causes of their genesis in reinforced concrete structures at micro and macro levels, the effect of this damage on the

stress-strain state, crack resistance, deformability and durability during the operation.

The aim of the work is to study and generalize information about crack formation in the materials and reinforced concrete structures at micro and macro levels, the influence of technological damage on the development of cracks from external influences and loads, the determination of the stress-strain state at the crack tip from external influences and loads, and the influence of technological cracks on the bearing ability, deformability and operational characteristics of structures.

For the description of non-homogeneity of the material, linear and structural mechanics, as well as micromechanics, were used. Micromechanics allowed us to describe the interaction processes that occur between the individual components during the operation of the material and structure.

The study of mechanisms of formation macrostructure concretes showed that the reasons of genesis and the development of discontinuity in hardening matrix material that degenerate in the internal surface of the process section or cracks are strain gradients.

The complex model of the structure of building materials at the micro and macro levels, which with the help of energy and force destruction criteria makes it possible to describe the macrocrack growth process was proposed.

The model which will establish the nature of the distribution of stresses and the formation of cracks in bending elements was proposed.

The photoelasticity method made it possible to determine the stress distribution in regular-structure composites before cracks appeared at the micro level with stress concentration on inclusions. This made it possible to use the relations of the linear theory of elasticity for a piecewise homogeneous body without discontinuities and cracks.

The possibility of the residual strain evaluation in the limp models by means of the given method is demonstrated. According to the experiment one can

approve that over loaded or loaded areas of the test sample are identified by the polarization-optical method.

The results of the experimental-theoretical researches of technologically damaged bending elements are given. The stress-strain state of reinforced concrete beams, when acting of a low cycle load, was investigated. The character of cracks formation, cracks development and beams destruction in dependence on the technological damage of concrete was determined. With the increase of the technological damage coefficient in reinforced concrete samples the degree of cracks formation in the process of experiments increases.

It is experimentally proved that all the cracks in the prototypes were developed by the technological defect that makes it possible to forecast the location of their appearance and direction development.

It has experimentally been established that residual deformations increase with the load increase up to 0.3 of the fracture load.

It was found that the methods of non-destructive testing without changing the quality, parameters and characteristics of the product, allow to detect the hidden defects, or reveal such features that entail the potentially products' unreliability by the indirect secondary features.

Ultrasound examinations showed the presence of invisible (technological) hair cracks were that were present in the samples that were tested in the absence of the action of bending moment.

The model of determination of depth of technological cracks in bending elements before loading was received. This enables to predict the occurrence of force cracks in bending elements and the growth of inclined cracks in the zone of joint action of moment and transverse force, as well as to predict grafting of old concrete with new during reconstruction of port facilities, adhesion, normal and tangential stresses in the contact zone.

An asymptotic study of stress fields in the vicinity of the tip of a force crack, taking into account the mixed stress, is an important task of nonlinear fracture mechanics, and in particular, taking into account the presence of a scattered

damage field. Therefore, the study of the stress and strain field near the crack tip under tensile and shear loads is of particular relevance when calculating the bearing capacity and deformability of structures.

The asymptotic analysis of a stress-strain state and the fields of continuity at a crack top of a normal break away in the medium with the damage in a linked task set ("elasticity–damage") for a flat stressed state are presented in the dissertation. The composition of asymptotic task solution, based on the decomposition method by its own functions is given.

The mathematical model of the description and the algorithm of numerical determination of the stress-deformed state near the crack top of the normal separation in the reinforced concrete elements that are bended under mixed load conditions is proposed.

Following the algorithm, it is possible to obtain eigenvalues for constructing a multiscale, multilevel description of fracture processes in the vicinity of the crack tip that lead to loosening of the material, crack growth, and structural failure.

Keywords: technological damage of concrete, stress-deformation state, bending reinforced concrete elements, polarization-optical method, cyclic loading, asymptotic analysis. eigenfunction expansion method.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Монографія

1. Hanna Zinchenko, Vitaliy Dorofeyev. Stressed-deformed condition and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries. Monograph.* 2019. P.165-185. ISBN: 978-9934-588-15-0 DOI: 978-9934-588-15-0.

Наукові праці, опубліковані за кордоном та у виданнях, включених до міжнародних науково-метричних баз даних

2. Дорофеев В.С., Зинченко А.В.. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности поляризационно-оптическим методом. *European Cooperation: Scientific Approaches and Applied Technologies.* 2016. № 12 (19). P. 53–56. ISSN 2449-7320 (index Copernicus).

3. Дорофеев В.С., Зинченко А.В. Асимптотический анализ напряженно-деформированного состояния и поля сплошности у вершины трещины нормального отрыва в железобетонных изгибаемых элементах. *Актуальные научные исследования в современном мире: сб. научных трудов.* 2017. Вып. 12 (32), ч.1. С.84-91, ISSN 2524-0986 (index Copernicus).

4. Майстренко О.Ф., Зінченко Г.В. Застосування інваріантного J-інтеграла для формулювання критерію поширення технологічної тріщини в конструкціях, що згинаються. *WORLD SCIENS. Multidisciplinary Scientific Edition.* 2017. Vol.1. № 12 (18). P. 20-26. ISNN 2413-1032 (index Copernicus).

5. Dorofeyev Vitaliy, Pushkar Natalia, Zinchenko Hanna. The Influence of Concrete Structure on the Destruction of Reinforced Concrete Bended Elements. In: *Blikharskyu Z. (eds). Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering.* 2021. vol 100. P. 103-111.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_13. (SCOPUS).

6. Дорофеев В.С., Пушкарь Н.В., Зинченко А.В. Образование и развитие силовых трещин в железобетонных изгибаемых элементах. *Perspectives of*

world science and education. Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference. Osaka. Japan. 2020. С. 280-287. [ISBN 978-4-9783419-8-3.](#)

Статті в наукових фахових виданнях України

7. Дорофеев В.С., Зинченко А.В., Бабий И.Н., Филиппова И.В., Головатюк Ю.В. Анализ методов определения технологической поврежденности железобетонных строительных конструкций. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. Вип. № 51. С. 94-98.

8. Дорофеев В.С., Зинченко А.В., Завирюха Т.В., Пономарь Л.В. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещинами. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: до 85-річчя Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. Вип. № 57. С. 126--130.

9. Дорофеев В.С., Зинченко Г.В., Романюк В.В. Дослідження характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в залізобетонних елементах. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наукових праць*. 2017. Вип. 34. С. 129-135. [ISSN 2218-1873.](#)

10. Дорофеев В., Зинченко Г., Целікова А. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів. *Вісник Львівського національного університету "Архітектура і сільськогосподарське будівництво"*. 2017. № 18. С. 75-82.

11. Дорофеев В.С., Зинченко Г.В. Чисельні дослідження, що характеризують початкову стадію роботи композитів. *Науково-технічний журнал "Нові технології в будівництві"*. 2017. № 33' 17. С. 30-35.

12. Майстренко О.Ф., Зинченко Г.В. Застосування методу розкладання за власними функціями для дослідження напружень і деформацій біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних елементах, що згинаються. *Зб. наук праць "Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві"*. 2018. Вип. 10. С. 72-82. [ISSN 2410-6208 \(index Copernicus\).](#)

13. Дорофеев В.С., Зинченко Г.В. Асимптотичний аналіз напружено-деформованого стану та поля суцільності біля вершини тріщини нормально-

го відриву в залізобетонних елементах, що згинаються. *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал "Наука та будівництво"*. 2018. Вип. 3 (17). С. 21-27. ISSN 2313-6669.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації

14. Головатюк Ю.В., Филиппова И.В., Сейдаметов Э.З., Дорофеев В.С., Зинченко А.В. Определение технологической поврежденности железобетонных конструкций методом неразрушающего контроля. *Збірка студентських наукових праць за 2013-2014 навч. рік*. ОДАБА. 2014. С. 47-51.

15. Дзюба М.А., Ведута М.Г., Майстренко О.Ф., Зінченко Г.В. Дослідження механізму росту технологічної тріщини на макрорівні. *Збірка студентських наукових праць за 2017-2018 навч. рік*. ОДАБА. 2018. Ч.1. С. 121-126.

16. Гуламов Мердан, Майстренко О.Ф., Зінченко Г.В. Використання методу комплексних потенціалів для опису характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в моделях із оптично-активних матеріалів. *Збірка студентських наукових праць за 2017-2018 навч. рік*. ОДАБА. 2018. Ч.1. С. 116-120.

17. Гуламов Мердан, Майстренко О.Ф., Зінченко Г.В. Метод комплексних потенціалів, як можливість визначення напружено-деформованого стану в згинальних елементах. *74-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу академії: зб. тез доп., м. Одеса, 17-18 травня 2018 р.* Одеса. 2017. С. 103.

18. Дзюба М.А., Ведута М.Г., Майстренко О.Ф., Зінченко Г.В. Використання поляризаційно-оптичного методу для дослідження механізму росту технологічної тріщини в згинальних елементах. *74-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу академії: зб. тез доп., м. Одеса, 17-18 травня 2018 р.* Одеса. 2017. С. 102.

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному будівництві залізобетонні конструкції є найбільш розповсюдженими. Сьогодні все більш високі вимоги пред'являються до експлуатаційної надійності будівель та споруд. Досвід використання залізобетону показує, що звичайний перенос результатів лабораторних досліджень к натурному не володіє необхідною точністю і потребує використання неруйнівних методів контролю та виявлення скритих дефектів.

Методи розрахунків згинальних елементів в сучасних будівельних портах засновані на розрахункових моделях, які базуються на єдиних принципах, основними з яких є гіпотеза суцільності матеріалу, гіпотеза плоских перерізів та діаграми деформування матеріалів. Запропонований підхід дозволяє з єдиних позицій здійснювати розрахунок конструкцій щодо міцності, утворення і розкриття тріщин та за деформаціями.

Саме тому велика робота була виконана Одеськими науковими школами В.М. Вирового, В.С. Дорофєєва, В.М. Карпюка, Є.В. Клименко, Н.В. Пушкар та іншими вченими, які розкривали актуальні питання теорії технологічної пошкодженості.

Результати виконаних досліджень свідчать, що якою б повною не була інформація про поведінку бетону і арматури у приопорних зонах згинальних елементів, вона не буде адекватно відображати напружено-деформований стан (НДС) неоднорідно навантаженого бетону характерного для стиснутої зони згинальних залізобетонних елементів. Крім того дослідження бетонів за останні 30 років показують, що структура бетону включає тверду фазу, поровий простір, мікро- і макротріщини. Вона неоднорідна, та її зміна при заданому рівні напружень впливає на деформативність, тріщиностійкість, пружно-пластичність, які врахувати в явному вигляді при аналітичному моделюванні експериментальних діаграм стиску бетону складно. Питання подальших експериментальних досліджень структури бетону на мікро- і макрорівнях, удосконалення моделей матеріалу і конструкцій, дослідження на-

пружено-деформованого стану згинальних елементів, появи і розвитку силових тріщин з врахуванням структури матеріалу і конструкцій є актуальними.

Такі дослідження дозволяють по-новому оцінити напружено-деформований стан елементів, що згинаються, розкрити в низці випадків резерви їх міцного опору і тим самим сприяти розвитку методів розрахунку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури за держбюджетною темою "Експериментально-теоретичні дослідження напружено-деформованого стану та розрахунок елементів пошкоджених залізобетонних конструкцій" (номер державної реєстрації 01090007342), в рамках фундаментального наукового дослідження Одеського національного морського університету на тему "Теоретичні основи оцінки природних і техногенних ризиків під час будівництва та експлуатації портових і шельфових споруд" (номер державної реєстрації 01170000617).

Метою дослідження є подальше вивчення напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, що згинаються, та узагальнення інформації про тріщиноутворення в матеріалах і конструкціях.

Об'єкт дослідження - вплив факторів на інтенсивність розвитку деструкції структури, деформування та руйнування бетону в залізобетонних елементах, що згинаються.

Предметом дослідження є деформації, напружено-деформований стан та руйнування технологічно пошкоджених залізобетонних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **задачі досліджень**:

1. Систематизувати та узагальнити існуючі данні про роботу матеріалів на мікро- і макрорівнях та тріщиностійкості залізобетонних балок під час експлуатації, намітити шляхи подальшого розвитку;

2. Виконати лабораторні експериментальні дослідження згинальних елементів на моделях з метою встановлення характеру розподілу напружень і утворення тріщин;

3. Встановити закономірність розподілу напружень та деформацій біля вершини тріщини і встановити характер подальшого руйнування;

4. Запропонувати математичну модель визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини в елементах, що згинаються.

Методи дослідження. Методологічною основою вирішення поставлених завдань є комплексний підхід, який включає в себе аналіз експериментальних даних і теоретичних досліджень технологічно пошкоджених залізобетонних елементів, що згинаються. В роботі були використані методи механіки залізобетону, деформаційної теорії, загальні методи теоретичних та емпіричних досліджень, критеріїв міцності бетону, порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків та їх аналіз, формулювання основних висновків, абстрагування, аналіз, синтез, індукція, дедукція.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше:

- запропонована комплексна модель структури будівельних матеріалів на мікро- і макрорівнях;

- експериментально визначена глибина технологічних тріщин згинальних елементів, що згинаються.

Отримали подальший розвиток та удосконалено:

- методика опису напружено-деформованого стану залізобетонних елементів;

- модель оцінювання технологічної пошкоженості і розвитку силових тріщин в залізобетонних елементах, що згинаються.

Практичне значення роботи.

Результати дисертаційних досліджень використані при виконанні фундаментального наукового дослідження Одеського національного морського університету у 2017-2019 рр., а також при виконанні магістерських робіт за спеціальністю 192 "Будівництво та цивільна інженерія" на кафедрі "Будівне-

льної інженерії та архітектури" у 2017-2019 рр. та на кафедрі Залізобетонних та кам'яних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури у 2014-2018 рр.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею автора і містить отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень, що вирішують наукову проблему вдосконалення моделі оцінювання технологічної пошкодженості та розвитку силових тріщин в залізобетонних елементах, що згинаються. В опублікованих роботах [1-18] достатньо повно відображаються результати дисертації. В монографії [1] у співавторстві з В.С. Дорофєєвим здобувачем запропоновано використання алгоритму, який дасть можливість отримати власні значення, що зможуть бути використані для побудови багатомаштабного та багаторівневого опису процесів руйнування біля вершини тріщини в елементах, що згинаються, виконано переклад роботи на англійську мову, також здобувачем надані результати експерименту, що дають можливість візуально оцінити зміну напружено-деформованого стану в згинальних елементах під навантаженням з врахуванням технологічної пошкодженості поляризаційно-оптичним методом [2]; в роботах [3; 13] запропоновані етапи асимптотичного аналізу напружено-деформованого стану та поля суцільності біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних елементах, що згинаються; в статтях у співавторстві з В.С. Дорофєєвим та Н.В. Пушкар, здобувачем надані результати експериментально-теоретичних досліджень технологічно пошкоджених елементів, що згинаються, наведені етапи зміни НДС залізобетонних балок при дії малоциклового навантаження [5; 6], виконано переклад роботи [5] на англійську мову; в статтях у співавторстві з Майстренко О.Ф. здобувачем запропоновано використання методу розкладання за власними функціями для отримання асимптотик напружено-деформованого стану біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонному елементі, що згинається (в середовищі з пошкодженням) [12]; а також застосування інваріантного J -інтегралу для формулювання критерію поширення технологічної тріщини в конструкціях,

що згинаються [4]. Здобувач брала участь в обговоренні та тлумаченні результатів, підготовці рукописів статей до друку; співавтори - у визначенні напрямів досліджень, постановці задач, у виборі алгоритмів обчислень та аналізі отриманих результатів.

Усі положення та результати, що виносяться на захист отримано здобувачем самостійно або за його безпосередньою участю.

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертації доповідалися та одержали схвальну оцінку на конференціях: 69-а Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (16-17 травня 2013р., Одеса, Україна); 70-а Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництв та архітектури (15-16 травня 2014р., Одеса, Україна); 73-я Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництв та архітектури (16-17 травня 2017р., Одеса, Україна); 74-а Науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництв та архітектури (17-18 травня 2018р., Одеса, Україна); VI Міжнародна науково-технічна конференція "Нові технології в будівництві" (24-25 травня 2017р., Київ, Україна); III Interdisciplinary Scientific and Practical Conference "Modern society cooperation and partnerships" (1st July, 2017, Warsaw, Poland); IV International Scientific and Practical Conference "Science and Education - Our future" (November 30, 2017, Dubai, UAE); XXXII Международная научная конференция "Актуальные научные исследования в современном мире" (26-27 декабря 2017г., Переяслав-Хмельницкий, Украина); VII International Scientific and Practical Conference "Perspectives of world science and education" (25-26 March, 2020, Osaka, Japan); Conference proceedings of EcoComfort (17 August, 2020, Lviv, Ukraine); II International Scientific Conference "ECOCOMFORT AND CURRENT ISSUES OF CIVIL ENGINEERING" (16-18 September. 2020. Lviv, Ukraine).

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Формування технологічної пошкодженості бетону

Будівельні конструкції можна розглядати як спеціально організовані системи, взаємодія окремих складових і структурних елементів яких забезпечує виконання функціонального призначення конструкцій [1]. Складна організація конструкції як системи передбачає наявність окремих підсистем, які можуть бути представлені матеріалом конструкції і армуючими елементами [2]. Властивості конструкції визначаються як індивідуальні властивості всіх підсистем (бетону, арматури), так і змінами цих властивостей при внутрішньоструктурних взаємодіях [3,4,5,6].

Експлуатаційні навантаження, що діють на конструкцію, викликають в ній деформації і напруження, які матеріал сприймає і перерозподіляє між власними структурними елементами. Несуча здатність конструкції визначається здатністю матеріалу продовжувати виконувати свої функції в нових умовах [2].

До аналізу роботи матеріалу при сприйнятті експлуатаційних навантажень існує два підходи: макромеханічний і мікромеханічний.

При макромеханічному підході модель матеріалу розглядають як безперервну середу, її характеристики оцінюють, виділяючи представницький обсяг середовища [7]. Макромеханічні підходи лягли в основу розробки методів випробувань і розрахунку залізобетонних конструкцій по першій і другій групах граничних станів.

У мікромеханіці застосовується модель матеріалу у вигляді дискретних структурних елементів, що взаємодіють через поверхні розділу. Виявлення особливостей взаємодії окремих складових дозволяє розкрити перехід від дискретності реального матеріалу до його поведінки як безперервного середовища на кожному рівні структурних неоднорідностей, взаємодія між якими

визначає поведінку матеріалу в конструкції. З позицій мікромеханіки розглядають механізми і умови формування структури матеріалів.

Матеріал конструкції (в нашому випадку - важкий бетон) є підсистемою, що складається з характерних структурних неоднорідностей. За своїм складом і властивостями бетон відноситься до композиційних матеріалів (КМ). Композиційні будівельні матеріали - це штучні матеріали складних структур, що складаються з двох і більше компонентів і набувають, в результаті такого поєднання, комплекс нових властивостей, яким не притаманні вихідні складові [2,8,9,10]. Структура конструкції включає все різноманіття структур матеріалу. Поняття структури включає в себе кількісне співвідношення елементів, їх взаємне розташування в просторі, комплекс їх фізико-механічних властивостей і характер зв'язків між ними, що впливають на формування міцності і деформативні властивості матеріалу [11].

Енергетичні умови концентрації напружень та розвитку тріщин в КМ розглядав П.Г. Комохов в додатку до цементного каменю і бетону.

Розглянемо структуру цементних бетонів. При цьому, не розглядаючи ієрархію структурних рівнів, зупинимося на окремих складових.

Мінеральні в'язучі утворюють складні як за характером структури, так і за якісним складом системи з характерними для КМ гетерогенністю, багатофазністю, поверхнями розділу між окремими зернами і зміною властивостей затверділого цементного каменю, в порівнянні з властивостями вихідних компонентів.

Розчинні суміші і розчинна частина бетонів є гетерогенні і багатофазні багатокомпонентні системи. На кордонах розділу цементуючої речовини і дрібного заповнювача утворюється шар модифікованого матеріалу. Подібні системи можна розглядати як матричні композити, в яких матрицею служить цементний камінь, а включеннями - зерна дрібного заповнювача.

Бетони можна уявити як гетерогенні матеріали, що складаються з матриці (розчинна частина) і включень (великі заповнювачі). Між розчин-

ною частиною і наповнювачами можливі фізико-хімічні та фізико-механічні взаємодії з утворенням поверхонь розділу.

Таким чином, цементний камінь, розчини і бетони являють собою (як кожен окремо, так і в поєднаннях) типові композити. При цьому самі компоненти бетонів - це полімінеральні і гетерогенні КМ (наприклад, зерна цементу, природні та штучні щільні і пористі наповнювачі).

Загальна для всієї гами композиційних будівельних матеріалів (КБМ) - це наявність поверхонь розділу (ПР) між окремими компонентами або фазами композитів. Поверхню розділу можна уявити як область зміни властивостей матеріалу при переході від одного компонента до іншого або від однієї структури до іншої. На ПР відбувається перерозподіл деформацій і напружень між окремими компонентами і структурами при дії на КБМ технологічних, власних і експлуатаційних навантажень і впливів. Поверхні розділу це послабленні зв'язки в бетоні, які, при прикладанні до конструкції зовнішнього навантаження, розриваються в першу чергу. Вони зберігають за собою потенційну можливість трансформуватися в зародкові тріщини і входити в структуру затверділого матеріалу, визначаючи його пошкодженість технологічними дефектами.

Згідно [2], формування поверхонь розділу в бетоні може відбуватися одним з трьох шляхів:

I-й - наповнювачі і розчинна частина вступають в хімічні реакції з утворенням перехідного шару з іншими властивостями. В цьому випадку адгезія матричного матеріалу до заповнювача вище його когезійної міцності. Об'ємні деформації усадки перерозподіляються в розчинній частині з утворенням ПР в матричному матеріалі (рис.1.1, а).

II-й - наповнювачі і розчинна частина взаєморозчиняються і продукти розчинення утворюють зону модифікованого матеріалу. При цьому адгезійна і когезійна міцності рівні. Розподіл деформацій усадки відбувається як в матричному матеріалі, так і по кордонах наповнювачів (рис.1.1, б).

III-й - розчинна частина не вступає в хімічні реакції з наповнювачами та вони не взаєморозчиняються. Адгезія матриці до поверхні заповнювача нижче її когезійної міцності. ПР проходять по кордонах наповнювачів, деформації усадки спрямовані від наповнювачів (рис.1.1, в).

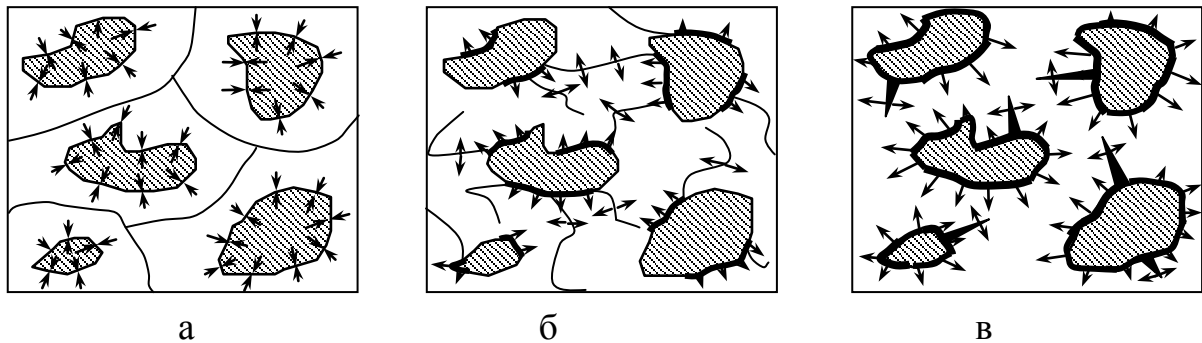


Рис.1.1 Розподіл деформацій усадки і характер тріщиноутворення макроструктури

В силу полімінеральних цементів і наповнювачів в бетонах можлива присутність всіх трьох типів поверхонь розділу на різних масштабних рівнях, тому від їх стану, типу, механічних характеристик, адгезійно-когезійних сил зв'язку зі складовими, загального обсягу і протяжності - залежать властивості окремих структур і всього матеріалу. Так як взаємодія компонентів і фаз відбувається через ПР, як в періоди виготовлення, так і експлуатації КБМ, аналіз і управління процесами і явищами на ПР представляють особливий інтерес. У КБМ можна умовно виділити внутрішні і зовнішні ПР. Зовнішні - це зовнішні поверхні зразків і конструкцій із КБМ. Внутрішні - кордони розділу між окремими фазами, компонентами, структурами, берега тріщин і дефектів. Зовнішні ПР для окремих складових композитів можуть одночасно бути внутрішніми для структур більш високого масштабного рівня або для самого матеріалу.

Для структури важких бетонів, що ущільнюються вібрацією, характерні наступні особливості. Кількісне співвідношення компонентів підбирається так, щоб створювалася щільна упаковка зерен крупного заповнювача, а міжзерновий простір заповнювався цементно-піщаним розчином.

Виходячи з характеру механічної взаємодії компонентів, відмінною рисою даного матеріалу є співвідношення модулів деформацій дискретного матеріалу і матриці. У якості крупного заповнювача приймається щебінь або гравій з міцних гірських порід або штучних матеріалів, модуль пружності яких вище модуля деформації цементно-піщаного розчину. Зерна крупного заповнювача знаходяться в безпосередньому контакті або відокремлюються одна від одної тонким шаром розчину. Такий композиційний матеріал отримав назву бетону з "контактним" заповнювачем [11].

У модель структури бетону включені внутрішні поверхні розділу, утворені в результаті взаємодії розчинної частини з великими заповнювачами (рис.1.2, а) і цементного каменю з дрібними заповнювачами (рис.1.2, б), і внутрішні поверхні розділу у вигляді міжкластерних поверхонь розділу на рівні цементного каменю (рис.1.2, в). Формування структури бетону супроводжується поетапним переходом з одного стану в інший, яке викликається багаторазовою зміною просторово-часових структур [12].

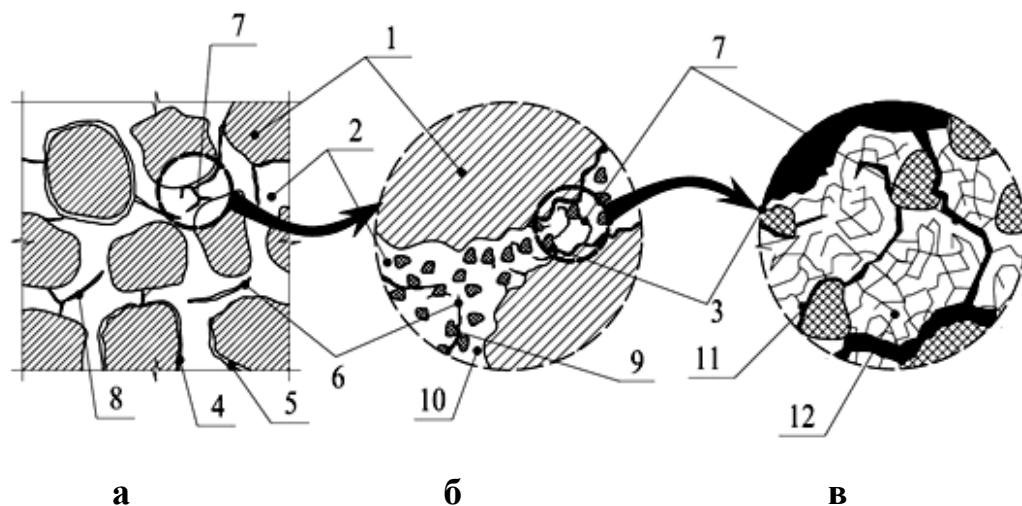


Рис.1.2 Модель структури бетону: а - макроструктура; б - рівень розчинна частина - великий заповнювач; в - рівень цементний камінь - дрібний заповнювач.

1 - спорудження (система); 2 - конструкція як елемент системи; 3 - тіло бетону; 4 - арматура; 5 - зона контакту бетону з арматурою; 6 - деформація бетону на кордоні з арматурою; 7 - структурні блоки цементного каменю (кластери); 8 - міжкластерні поверхні розділу різного масштабного рівня; 9 - наповнювачі; 10 - розчинна частина (матриця); 11 - тріщини в макроструктурі; 12 - стохастичний розподіл початкових тріщин в бетоні.

Структура конструкції включає все різноманіття структур матеріалу. Складну неоднорідну модель композиційних будівельних конструкцій можна показати системою підмоделей (рис.1.3).

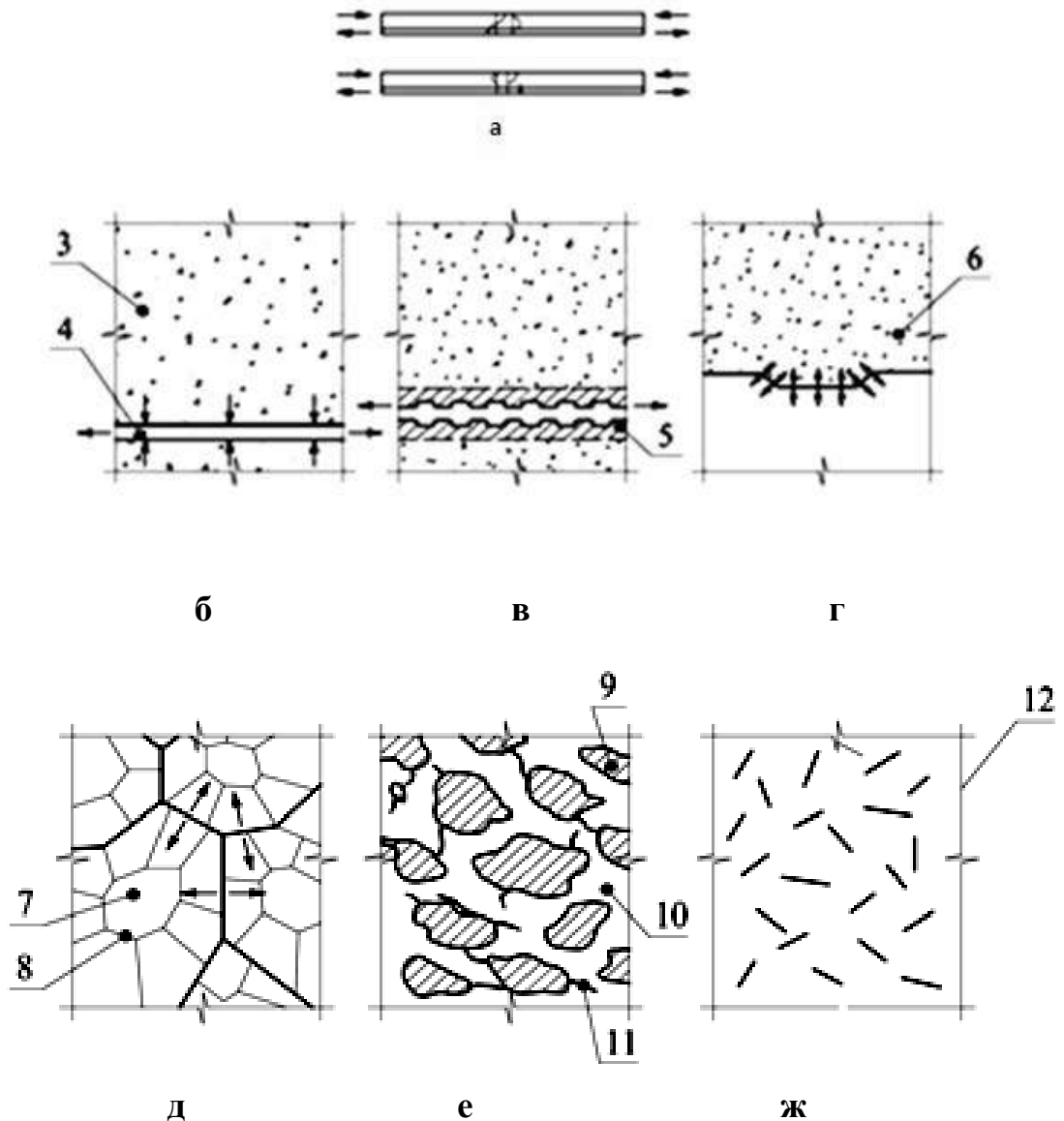


Рис.1.3 Багаторівнева організація структури конструкції:

1 - крупний заповнювач; 2 - розчинна частина; 3 - дрібний заповнювач; 4 - тріщини зчеплення по всій поверхні заповнювача; 5 - тріщини зчеплення, розташовані на окремих ділянках поверхні наповнювачів; 6 - тріщини, розташовані між заповнювачами; 7 - тріщини, які замикаються на берегах інших тріщин; 8 - тріщини, не завершені в своєму розвитку; 9 - модифікований поверхневий шар на внутрішніх поверхнях розділу і берегах тріщин; 10 - цементний камінь; 11 - тріщини, що виникли в результаті взаємодії дрібних заповнювачів і цементного каменю; 12 - структурні блоки цементного каменю.

Структура конструкції дещо трансформується за рахунок реакції матеріалу і окремих конструктивних елементів на зовнішні впливи (рис.1.3, а).

Аналіз роботи (умови рівноваги, тріщиностійкість, розрахунок по першій і другій групам граничних станів) при прийнятій моделі проводять з позиції механіки суцільного середовища (рис.1.3, б).

Отже, на макрорівні структура конструкції представлена конструктивно оформленим матеріалом, властивості якого характеризуються середніми параметрами якості та структурними піделементами у вигляді арматури.

Формування макроструктури конструкції залежить від стійкості зв'язків між окремими структурними піделементами. Тому можна виділити у якості самостійної підструктури елемент, що забезпечує спільність роботи двох різнорідних матеріалів - бетону і арматури (рис.1.3, б).

У виділеному структурному піделементі існує власна система внутрішньоструктурних зв'язків. На окремих ділянках можуть виникати локальні деформації і напруження як в окремих зонах матеріалів, що контактують, так і в зоні їх контактів (рис.1.3, в).

При аналізі цієї підструктури модельне уявлення про матеріал конструкції не змінюється. У структуру конструкції можна ввести новий елемент - кордон розділу матричного матеріалу (бетону) і арматури. Формування її залежить від рельєфу поверхні арматури, складу матричного матеріалу і режимів його твердіння. У мікроділянці бетону на кордоні його розділу з арматурою виникає власне поле залишкових деформацій і напружень, яке залежить від конфігурації поверхні взаємодіючих матеріалів і інтенсивності об'ємних деформацій бетону (рис.1.3, г).

При появі в конструкції тріщини можна виділити два підходи при оцінці її несучої здатності. Традиційний шлях передбачає фіксацію появи тріщин, визначення їх розмірів і внесення корективів у внутрішній напружений стан (рис.1.3, д). Другий підхід передбачає використання положень

механіки руйнування. Завдання зводиться до вивчення умов розвитку тріщин в гетерогенному матеріалі конструкції. При цьому основна увага приділяється концентрації напружень у гирла магістральної тріщини (рис.1.3, е).

В результаті взаємодії частинок в'язучого, наповнювача (як між собою, так і з дисперсійним середовищем) утворюються дискретні структурні блоки різного масштабного рівня - кластери. Частина міжкластерних поверхонь розділу здатна перерости в тріщини, що дозволяє уявити мікроструктуру композиційних будівельних матеріалів у вигляді дискретних блоків (рис.1.3, ж) [12].

Формування структури бетону - кінетичний процес, супроводжуваний поетапним переходом з одного в інший стан, що викликається багаторазовою зміною просторово-часових структур, тому бетон представляють як складну систему, організовану за принципом "структура в структурі".

Об'ємні усадочні деформації в середині структурних блоків, що виникають внаслідок твердіння бетону, викликають деформації і напруження розтягнення на поверхнях розділу. Це може викликати порушення суцільності матриці і привести до появи зародкової тріщини [2].

Подібні висновки були зроблені і авторами [13,14], які виявили, що на міцність розчину дуже впливають власні напруження, обумовлені усадковими деформаціями цементного каменю при твердінні, які А.С.Десов [13] назвав структурними напруженнями. Зерна заповнювачів перешкоджають вільним усадочним деформаціям цементного каменю, а в бетоні, представленому двухкомпонентною моделлю, зерна щебеню перешкоджають усадочним деформаціям цементно-піщаного розчину. В результаті цього в розчині, в зернах щебеню і по поверхні їх контакту виникають нормальні і зрушаючі напруження.

Контактні тріщини між крупним заповнювачем і розчином в затверділому бетоні до прикладання навантажень були виявлені і Т.Хсу [15].

А.М.Квернадзе, В.Н.Гогонідзе і ін. [16] за допомогою методу голографічної інтерферометрії простежили за процесами твердіння і усадки бетону в ранній стадії. У зразку з цементного каменю з включенням зерен крупного заповнювача, при обмеженій можливості їх зміщення в процесі твердіння, до 60 годин після виготовлення була виявлена усадочна тріщина у одного із зерен заповнювача.

Б.М.Гладишев в своїй роботі [11] наголошує на важливості ролі міцності зчеплення в формуванні міцності бетону: "Міцність зчеплення цементного каменю з заповнювачем в бетоні грає ту ж роль, що і міцність клейового шва в з'єднаннях дерев'яних конструкцій. Поки міцність з'єднання забезпечує спільну роботу елементів, конструкція має максимальну несучу здатність. Відсутність з'єднань призводить до вільного деформування елементів і значного зниження несучої здатності конструкції. Робочий переріз бетону також складається з окремих елементів, що володіє до того ж різними механічними властивостями. Отже, зчеплення є важливим елементом поняття структури бетону. Воно забезпечує зв'язок елементів структури і спільність їх деформацій при дії навантаження. У цьому полягає практичне значення адгезійних властивостей цементного каменю і новоутворень в контактному шарі".

І.І.Лучко, В.Н.Чубріков і В.Ф.Лазарь [18] пишуть, що найбільш слабким місцем в бетоні є зона контакту матриці і заповнювача, тому із зони концентрації напружень тріщина буде направлятися в контактну зону і там, де це енергетично більш вигідно, буде прорізати матрицю.

Б.М.Гладишев [11] пояснює появу початкових тріщин в такий спосіб: "У звичайному важкому бетоні відношення об'єму розчину до об'єму заповнювача приймається близьким до одиниці або трохи менше. Розтягуючи зусилля в розчинній складовій врівноважуються розтягуючими зусиллями в заповнювачі. Якщо дотримується вказане відношення компонентів і зусилля від об'ємних деформацій в них рівні, то близькими за значенням є і власні напруження. З розвитком усадочних деформацій власні напруження зроста-

ють до рівня міцності зчеплення і до межі міцності на розрив розчину, викликаючи появу тріщин по контакту і в розчині ... Кількість усадочних тріщин і їх розміри визначаються значенням вільної усадки розчину, яке залежить від таких структурних факторів, як тип цементу, його витрата і В/Ц ".

Рух тріщин на рівні структурних неоднорідностей є своєрідними скачками від одного міжчастичного зв'язку до іншого [12], при цьому тріщина, що рухається огинає невідповідні для себе структурні блоки, вона прагне розвиватися по енергетично вигідних траєкторіях, тому мікротраєкторії тріщин, які утворилися в період структуроутворення матеріалу, звивисті з індивідуальною морфологією кожного берега. У зв'язку з утворенням структурних блоків різних масштабних рівнів, зародження і зростання тріщин в матеріалі відбувається не одночасно по всьому об'єму. Зростання кожної тріщини змінює мікродеформативний стан окремих обсягів системи, що може сприяти прискоренню або уповільненню зростання сусідніх тріщин, тому в матеріалі присутні, як правило, тріщини різні по довжині, формі, ширині розкриття [7].

Згідно [19], до технологічних (спадкових) відносять дефекти, які виникають в період отримання матеріалу і конструкції і які присутні в них до прикладання експлуатаційних навантажень. До них відносяться і пори, що утворюються за рахунок надлишку води замішування (при приготуванні бетонної суміші) і бульбашки повітря, які не видалені під час ущільнення суміші [11].

С.С. Гордон в роботі [20] пише: "Бетон неоднорідного складу пронизаний величезною кількістю внутрігелевих і капілярних пустот, щілин осідання і водовідділенням, тріщин усадки, пустот, що виникають при перекристалізації деяких новоутворень".

Автори [21,22] також вважають, що наявність пір і тріщин - невід'ємна риса будови бетону.

Ю.В.Зайцев [23] зазначає, що характерною рисою будь-якого дефекту є ступінь його гостроконічності, що призводить до сильної концентрації на-

пружень, при цьому він виділяє дві групи дефектів: дефекти I роду - округлі, типу порожнин і дефекти II роду - гострі, типу тріщин.

I.M. Добуш вважає, що концентрація напружень, в першу чергу, виникає на кордонах заповнювача і цементного каменю, тобто в контактній зоні і біля дефектів структури. Тому в цій зоні при навантаженні відбувається інтенсивний рух дислокацій, розпушення матеріалу та утворення мікротріщин [24].

Відомо також явище, що сприяє розвитку мікродефектів - це розклинююча дія води, що отримала назву "ефект Ребіндера". Вода, як будь-яка поверхнева активна речовина, проникає в гирло пір і мікротріщин і, завдяки клиноподібній будові своєї молекули, що має в своєму складі іони водню, активно взаємодіє в вершинах мікродефектів з електронними оболонками хімічних елементів, що становлять бетон або цементний розчин. Така взаємодія створює в гирлах пір і мікротріщин попереднє розклинююче напруження, це знижує величину зусилля, необхідного для подальшого розвитку мікродефекту і величину енергії, що витрачається для цієї мети.

Як встановлено В.С. Дорофєєвим і В.М. Вировим [2], механізми розвитку технологічних тріщин на макрорівні визначаються значенням і градієнтом усадочних деформацій на берегах тріщини. У реальних матеріалах збіг вісей симетрії тріщини і середовища, в якому вона розвивається, являє собою окремий випадок, частіше буває ситуація, при якій на берегах тріщини виникають різновеликі усадочні деформації. В цьому випадку зона критичної пластичної деформації зсувається в бік того берега тріщини, який зазнає великі деформації усадки. Це викликає зміну напрямку руху тріщини, і її поворот здійснюється до тих пір, поки усадочні деформації на протилежних берегах тріщини не вирівнюються.

На макрорівні відбувається безперервне зростання тріщини, яка залежить від значення і кінетики об'ємних деформацій мікроструктури матеріалу.

Н.Б.Ромаліс і В.П.Тамуж [25] відзначають, що на зростання тріщин впливають також мікропори і мікротріщини, розташовані на продовженні

макротріщини, вони "ініціюють її розвиток, причому макротріщини "відчувають" наявність дефекту тільки на відстані, що не перевищує 2 ... 3 довжини мікродефекту".

Макродеформації викликають необоротне деформування, індивідуальна зміна фактури і морфології кожного берега, що не допускає повного змикання технологічних тріщин при можливих деформаціях зворотнього знака [2].

Внутрішні, по відношенню до системи, поверхні розділу, що з'явилися, зберігають за собою потенційну можливість трансформуватися в зародкові тріщини і входити в структуру затверділого матеріалу, визначаючи його пошкодженість технологічними дефектами.

На макрорівні кордони розділу матриці і наповнювачів утворюють всередині структури композиційних будівельних матеріалів своєрідні "усадкові осередки". Об'єм і форма "усадочних осередків" залежать від співвідношення когезійної і адгезійної міцностей матриці, фракцій заповнювача і їх кількості в суміші і об'ємного вмісту заповнювача, певним чином упакованого в макроструктурі. "Усадкові осередки", що утворилися, розчленовують макроструктуру композиційних будівельних матеріалів на окремі об'ємні блоки, які взаємодіють через свої поверхні розділу. Об'ємні усадочні деформації всередині структурних блоків викликають деформації і напруження розтягнення на поверхнях розділу. Це може викликати порушення суцільності матриці і привести до появи зародкової тріщини. Зародкові тріщини, які виникли, є небезпечними тріщинами для структур більш низького масштабного рівня [2, 26].

Тріщини, що виникають, належать матеріалу і є невід'ємною частиною конструкції. Це дає можливість зробити висновок, що при всій різноманітності моделей структури конструкції можна виділити для них загальний структурний елемент - технологічну тріщину (рис.1.4).

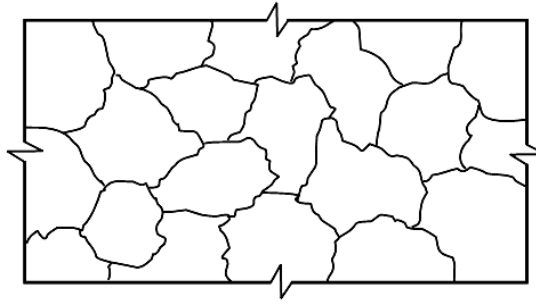


Рис.1.4 Рисунок технологічних тріщин на поверхні бетонного зразка

Як було сказано вище, будівельна конструкція в цілому являє собою систему, що включає піделементи у вигляді матеріалу і арматури. Формування макроструктури конструкції залежить від стійкості зв'язків між окремими структурними піделементами, тому в якості самостійної структури можна виділити кордон розділу бетону та арматури, що забезпечує спільність роботи двох різнорідних матеріалів. Її формування залежить від рельєфу поверхні арматури, складу матричного матеріалу і режимів його твердіння (рис.1.3, г).

У мікроділянці бетону на кордоні його розділу з арматурою виникає власне поле залишкових деформацій і напружень, яке залежить від конфігурації поверхні взаємодіючих матеріалів і інтенсивності об'ємних деформацій бетону [2] (рис.1.3, д).

Якщо розглядати арматуру як включення в бетон, то характер утворення поверхонь розділу буде відповідати 3-му характерному випадку формування адгезійно-когезійних сил зв'язку між розчинною частиною і включеннями - розчинна частина не вступає в хімічні реакції з арматурою і вони не взаєморозчинюються. Деформації усадки спрямовані від арматури, тобто при формуванні структури арматура відчуває деформації стиснення, а оточуючий її бетон - деформації розтягування. Таким чином, до мікротріщин, що виникають в результаті взаємодій на рівні "матричний матеріал" - "заповнювач", додаються поверхні розділу, що утворилися в результаті відтоку деформацій усадки від арматури, що вносить свій вклад у формування загальної пошкодженості конструкції.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що початкові тріщини, що виникають при технологічній переробці матеріалу, є невід'ємною частиною структури бетону, що порушує її суцільність, вони автоматично переходять в конструкцію і визначають загальну пошкодженість конструкції технологічними дефектами до прикладання до неї експлуатаційних навантажень. Тому набуває інтерес вивчення впливу конструктивних особливостей елементів на формування технологічної пошкодженості, а також впливу початкових тріщин на фізико-механічні характеристики матеріалу, на накопичення і розвиток силових тріщин при роботі конструкції, на її деформації, несучу здатність і характер руйнування.

1.2. Механізм утворення і розвитку тріщин в мікро- і макроструктурі композиційних будівельних матеріалів

Як зазначено в [27] зародкові тріщини, що виникли на міжкластерних ПР, здатні розвиватися до тріщин, порівнянних з неоднорідністю "кластер - кластер". Наступні деформаційні процеси створюють умови розвитку тріщин в період структуроутворення матеріалу. При об'ємних деформаціях $K-N$ в разі dV/Dt тріщина прагне збільшити свій розмір. Можливі ситуації, при яких відбувається поетапне зростання тріщини шляхом послідовного розриву міжчасткових контактів (рис.1.5 (I)) і процес укрупнення тріщини через руйнування міжчасткових і межкластерних контактів, що їх поділяють (рис.1.5 (II)). В тому і в іншому випадках рух тріщини є не безперервний процес, а дискретні акти поетапного зростання. Можна виділити наступні етапи росту тріщин в процесі структуроутворення дисперсних систем:

I етап - накопичення пластичних деформацій в зоні міжчасткових або міжкластерних контактів за рахунок власних об'ємних деформацій системи, що твердіє. На цьому етапі відбувається необоротне деформування берегів тріщини (явища пластичного гістерезису) в силу різних деформацій за вели-

чиною і напрямком. При цьому для кожного берега можлива своя індивідуальна зміна і морфології, рис. 1.5 (I).

II-ий етап - руйнування зони контакту і збільшення протяжності тріщини на величину, рівну відстані між міжчастковими контактами $\Delta b/d$. При цьому робота витрачається на утворення поверхні руйнування, що дорівнює площі міжчасткового контакту πx^2 . Це полегшує задачу утворення нових поверхонь, рис.1.5 (II).

III-ій етап - чергове накопичення пластичних деформацій з їх перерозподілом на нових берегах тріщини. Третій етап завершує цикл стрибкоподібного зростання тріщини і починає новий. На берегах тріщини, що утворилася з'являються нові поверхні розділу кластерів, що веде до чергової їх відозміни, рис.1.5 (III).

На береги такої тріщини виходять міжкластерні ПР (зародкові тріщини) нижчого масштабного рівня. Вони викликають часткове релаксування деформацій кожного берега і уповільнюють або сприяють її зростанню з локалізацією мікротраєкторії руху. Так як всередині кластерних структур відбувається стиснення і ущільнення (за рахунок прагнення частинок кластерів до "структуроутворюючих" центрів), то тріщина, що рухається огинає невідповідні для себе структурні блоки. Вона прагне розвиватися по енергетично вигідним траєкторіям - міжкластерним ПР. Тому мікротраєкторії тріщин, які утворилися в період структуроутворення матеріалу, звивисті з індивідуальною морфологією кожного берега, рис.1.4.

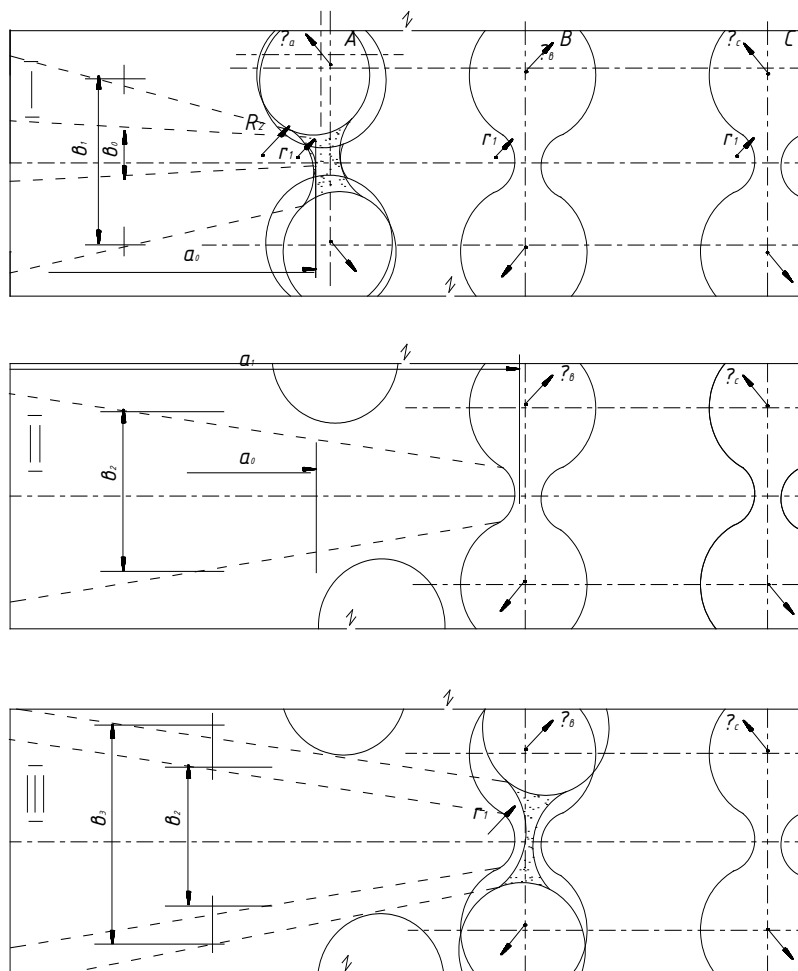


Рис. 1.5 Мікроструктурний механізм зростання технологічної тріщини ЕСЕВ. I, II, III - етапи накопичення пластичних деформацій і зростання технологічної тріщини з початковою довжиною a_0 , шириною розкриття b_0 і радіусом гирла r .

Складний рисунок технологічних тріщин (отриманий на глині, молотих піску і кремнегелі, цементному камені) пов'язаний з утворенням кластерних структур дисперсних систем.

Проведений аналіз механізмів трансформації зародкових тріщин в гетерогенних матеріалах, що тверднуть показав:

- розвиток тріщин відбувається в результаті об'ємних деформаційних процесів локалізованих в кожному структурному агрегаті;

- рух тріщини в гетерогенному середовищі на рівнях структурних неоднорідностей є своєрідними скачками від одного зв'язку до іншого;
- в процесі росту відбувається індивідуальна зміна берегів тріщини;
- траєкторія подібних технологічних тріщин мікрозвиліста, що пов'язано з прагненням тріщин розвиватися в енергетично вигідних напрямках - по послабленим міжкластерним кордонам розділу;
- на рівні структурних неоднорідностей "кластер - кластер" рисунок тріщини повторює малюнок міжкластерних ПР.

Зростання кожної зародкової тріщини змінює мікрореформативний стан окремих обсягів системи, що може сприяти або сповільнювати зростання сусідніх тріщин. Тому в матеріалі присутні, як правило, тріщини різних довжин, форм, ширини розкриття.

В [27] відзначається, що згідно з результатами аналізу літературних джерел існує можливість визначити умови, при яких порушується рівноважний стан тріщин певного розміру і вони починають розвиватися в матеріалі. При цьому виходять з кінетичних уявлень оцінки довговічності матеріалу, основні залежності яких запропонував С.М. Журко. Згідно кінетичного підходу руйнування являє собою багатостадійний процес зародження тріщин, накопичення тріщин в об'ємі до критичної кількості, злиття мікротріщин в макротріщину, її зростання до магістральної тріщини. При розгляді умов зростання тріщин виходять, як правило, з умови прикладання до матеріалу зовнішніх навантажень. Залежно від виду зовнішніх напружень, розмірних факторів тріщин і характеристик матеріалу, в якому вони розвиваються, визначені основні види руйнування, силові і енергетичні критерії зростання тріщини з поправкою на виникаючі при певних значеннях напружень пластичних деформацій (поправка Орована). В умовах загальної плинності матеріалу введено поняття розкриття тріщини (РТ). При всіх цих підходах передбачається, що під дією зовнішнього навантаження в районі гирла тріщини виникають напруження або деформації критичного значення, що веде до зростання тріщини через утворення нових поверхонь.

У мікроструктурі КБМ можливі умови, що забезпечують зародження тріщин на початкових етапах структуроутворення без впливу зовнішніх навантажень [27].

При розгляді механізму зростання тріщини в середовищі [27], що зазнає об'ємні деформації усадки, введені такі обмеження:

- середовище, в якому розвивається тріщина, являє собою на "макрорівні" однорідне і ізотропне;
- між величиною об'ємних деформацій і обсягом матеріалу існує лінійна залежність;
- об'ємні зміни передаються на зовнішні і внутрішні ІР;
- на систему не діють зовнішні навантаження - об'ємні деформації виникають в результаті власних процесів і явищ (проявляється ефект своєрідного саморуху).

Автори припустили, що тріщина з'явилася в полунескінченній пластині з вказаними вище властивостями. Вісь тріщини проходить через вісь симетрії пластини. Тому деформації усадки на берегах тріщини рівні: $\varepsilon_{AG} = \varepsilon_{BC}$, рис.1.7. Під дією усадочних деформацій берега тріщини розсуваються на величину $2 \Delta b$. У зоні гирла накопичуються пластичні деформації $\varepsilon_{пл}$.

При досягненні граничного значення $\varepsilon_{пл}^k$ відбувається порушення суцільності матеріалу. Довжина тріщини збільшується на Δa . Одночасно з ростом тріщини відбувається черговий етап накопичення пластичних деформацій. Зона пластичних деформацій рухається перед гирлом тріщини за рахунок безперервного розвитку об'ємних процесів. На "макрорівні" тріщина росте безперервно. Можна сказати, що швидкість росту тріщини визначається величиною Δb і кінетикою $\Delta \varepsilon / d\tau$ об'ємних деформацій

$$\Delta a = \Delta b / 2 \operatorname{tg}(r_T / 2) \quad (1.1)$$

У реальних матеріалах збіг вісей симетрії тріщини і середовища, в якому вона розвивається, являє собою окремий випадок зростання тріщини. Більш загальною є ситуація, при якій на берегах тріщини виникають рівновеликі об'ємні деформації, рис.1.6.

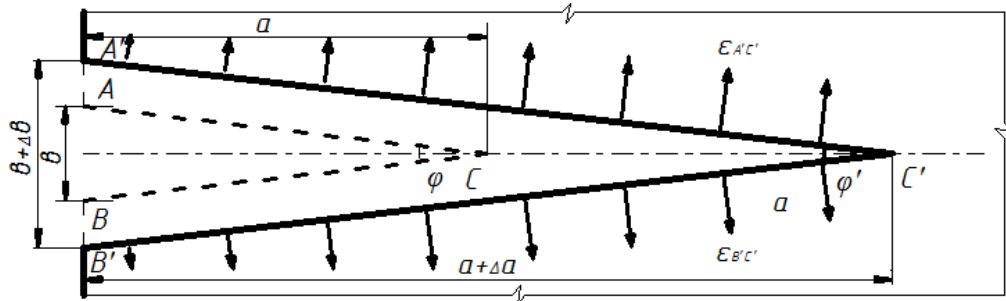


Рисунок 1.6 Механізм росту технологічної тріщини на макрорівні

a - початкова довжина технологічної тріщини з шириною розкриття b ;
 φ - радіус гирла тріщини;
 Δa та Δb - приріст довжини та ширини розкриття тріщини;
 ϵ_{AC} и ϵ_{BC} - деформації берегів тріщини за умовою $\epsilon_{AC} = \epsilon_{BC}$.

Нехай берег зародкової тріщини BC сприймає великі усадочні деформації ϵ_{BC} в порівнянні з усадочними деформаціями берега AC ϵ_{AC} , $\epsilon_{BC} > \epsilon_{AC}$. В цьому випадку зона критичної пластичної деформації зсувається в бік берега BC, тобто в сторону великих деформацій. Це викликає зміну напрямку руху тріщини, рис. 1.7 II.

Поворот здійснюється до тих пір, поки деформації на протилежних берегах тріщини не вирівнюються, рис. 1.7 III.

Розвиток тріщин в матеріалах, що зазнають усадку як за рахунок висихання (глина з $V/\Gamma = 0,6$), так і за рахунок гідратації (цементне тісто з $V/\Omega = 0,3$) протікають однаково. Аналіз дозволяє зробити висновок, що напрямок і кінетика розвитку технологічних усадочних тріщин в період твердіння матеріалів не повинна залежати від виду в'язучого, фізико-хімічних і фізико-механічних процесів, що викликали об'ємні зміни, тобто механізм розвитку тріщин в пластичних середовищах є загальним на "макрорівні" для класу матеріалів, що зазнають при своєму твердінні об'ємні деформації зменшення обсягу.

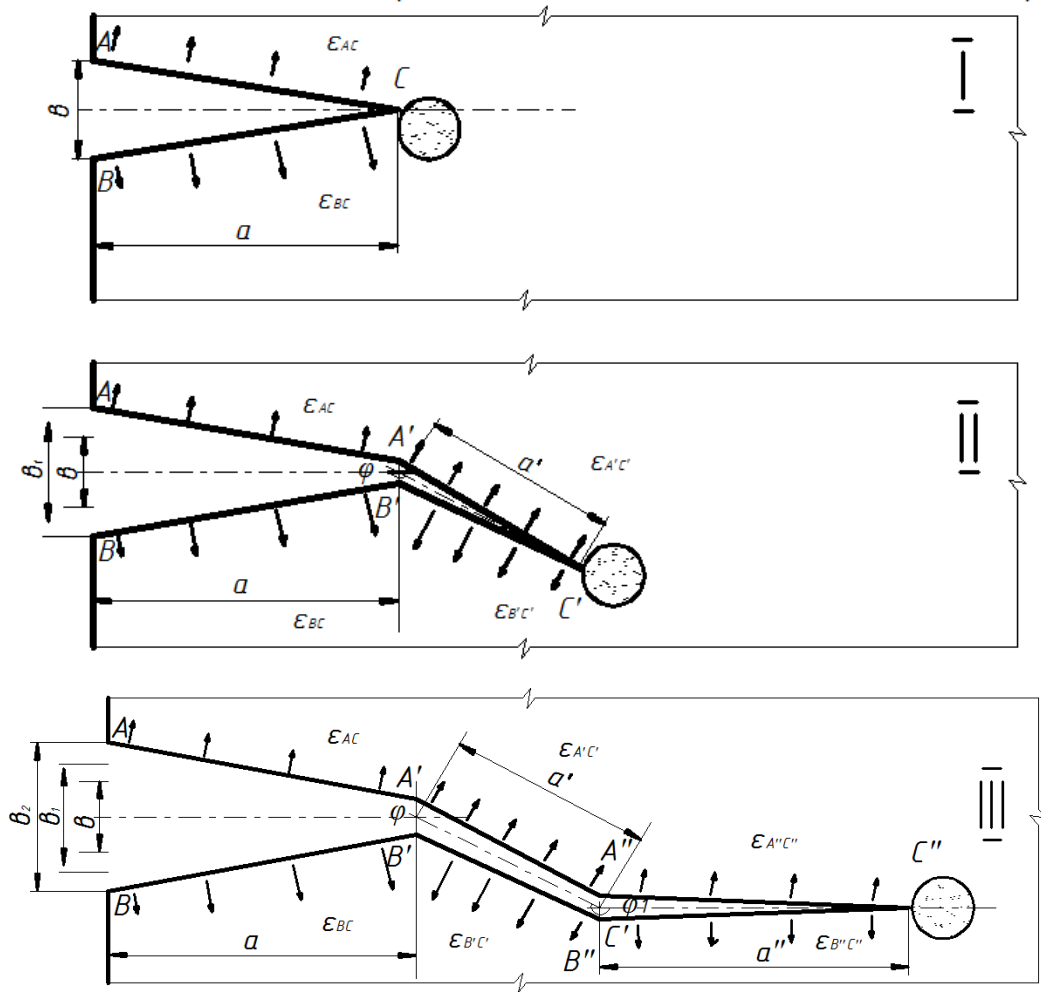


Рисунок 1.7 Механізм зміни напрямку руху технологічної тріщини в період твердіння мікроструктури КБМ

ϵ_{AC} ..., ϵ_{BC} – деформації берегів тріщини;
 ϕ , ϕ_1 - зміна напрямку руху тріщини

Таким чином, механізм розвитку технологічних тріщин на "макрорівні" мікроструктури визначається величиною і градієнтом об'ємних деформацій на протилежних берегах тріщини. Градієнти об'ємних деформацій визначають напрямок росту тріщини і прагнуть до вирівнювання значень у її гирла.

На "макрорівні" реалізується умовно безперервне зростання зародкової тріщини, що залежить від величини і кінетики об'ємних деформацій мікроструктури КБМ. Введення наповнювачів, знижуючи величину усадочних деформацій, сприяє сповільненому розвитку тріщин.

Проведені дослідження і аналіз дозволили встановити якісно відмінність механізмів зростання технологічних тріщин на рівнях структурних неоднорідностей і на "макрорівні", на якому матеріал представлений неперервним середовищем. На рівні структурних неоднорідностей тріщина розвивається стрибкоподібно з мікрозвилістою траєкторією по міжкластерним ПР, на "мікрорівні" рух тріщини представляється умовно безперервним із загальним напрямком, що залежать від градієнтів деформацій за величиною на її протилежних берегах. Мікродеформації викликають необоротне деформування кожного берега. Цьому сприяє також і зміна прямолінійності руху тріщин на "макрорівні". Відбувається індивідуальна зміна: фактури і морфології кожного берегу, що не дозволяє здійснитися повному змиканню технологічних тріщин при можливих деформаціях зворотнього знаку.

1.3. Умови росту зародкових тріщин в період організації мікроструктури композиційних будівельних матеріалів

Як вказано в [28] поява в структурі матеріалу зародкових (технологічних) тріщин закладає основи їх можливого зростання до тріщин, спільномірних з характерними структурними неоднорідностями. Зародкові тріщини виникають в початкові періоди структуроутворення композиційних будівельних матеріалів (КБМ). Тому важливим завданням є визначення умов розвитку зародкових тріщин в період структуроутворення і тверднення мікроструктури КБМ.

Під тріщиною розуміється внутрішня по відношенню до даного матеріалу поверхню розділу (ПР), яку можна охарактеризувати завдовжки a_T , шириною розкриття b_T , фронтом l та радіусом гирла r_T . При цьому автори виходять з наступних допущень:

- зародкові тріщини з'явилися в середовищі, яке на початкових етапах має пластичні деформації;

- властивості середовища із зародковими тріщинами поетапно переходять з пластичного у в'язкопружний і пружний стан;
- при переході з одного реологічного стану в інший – середовище з мікротріщинами зазнає об'ємні деформації;
- об'ємні деформації з'являються на внутрішніх поверхнях розділу (берегах зародкових тріщин).

Для аналізу процесів, що протікають в моменти часу, що відбуваються перед зрушенням тріщини і початком її зростання, автори пропонують виділити ділянку структури, що включає зародкову тріщину та ділянки, які приликають до гирла тріщини, рис.1.8.

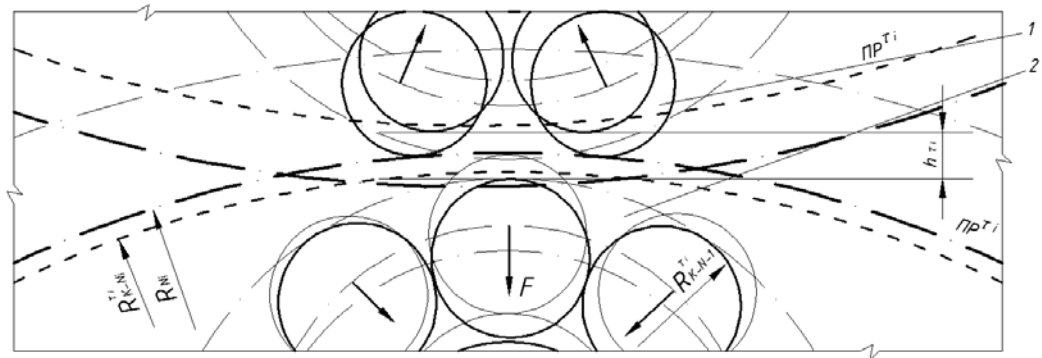


Рис. 1.8 - Схема взаємодії та деформування кластерних структур

- 1 – елементарні структури елементів в'язучого (ЕСЕВ);
 2 – кластер К-1; F – напрямлення переміщень ЕСЕВ в К-1;
 $PR^{т0}$ – утворення міжкластерної ПР; $PR^{тi}$ – формування міжкластерної ПР;
 h – ширина розкриття міжкластерної ПР

В [28] відзначається, що згідно аналізу літературних джерел існує можливість визначити умови, при яких порушується рівноважний стан тріщин певного розміру і вони починають розвиватися в матеріалі. При цьому виходять з кінетичних представлень оцінки довговічності матеріалу, основні залежності яких запропонував С.Н. Журков. Згідно з кінетичним підходом руйнування є багатостадійним процесом зародження тріщин, накопичення тріщин в об'ємі до критичної кількості, злиття мікротріщин в макротріщину, її зростання до магістральної тріщини. При розгляді умов зростання тріщин виходять, як правило, з умови додатка до матеріалу зовнішніх навантажень.

Залежно від виду зовнішнього напруження, розмірних чинників тріщин і характеристик матеріалу, в якому вони розвиваються, визначені основні види руйнування, силові і енергетичні критерії зростання тріщини з поправкою на ті, що виникають при певних значеннях напруження пластичних деформацій (поправка Орована). В умовах загальної плинності матеріалу введено поняття розкриття тріщини (РТ). При усіх цих підходах передбачається, що під дією зовнішнього навантаження в районі гирла тріщини виникають напруження або деформації критичного значення, що веде до зростання тріщини через утворення нових поверхонь.

В даному випадку зародкова тріщина є кордон розділу між кластерними структурами. Таким чином, берегами тріщини є кластери К-Н. Самі зародкові тріщини з'являються в період досить інтенсивних об'ємних деформацій кластерних структур. При цьому відбувається зміна зовнішнього кордону розділу кластера - берега зародкової тріщини. В результаті фізико-хімічних процесів гідратації ЕСЕВ відбувається скорочення ПР кластерних структур. Збільшується ширина розкриття міжкластерної ПР b з передачею деформацій в гирлі тріщини до критичних значень $\sum \varepsilon_{KP}$ [27].

Розрив контактної перешийку може відбуватися в результаті спільних деформацій берегів поруч розташованих тріщин. У разі стабілізації об'ємних деформацій системи, берега тріщин не будуть розсуватися і станеться заповнення їх продуктами новоутворень. Таким чином можна виділити першу необхідну умову зародження тріщин в період структуроутворення КБМ - для зародження необхідні об'ємні деформації окремих структурних блоків системи [28].

Важливим моментом є співвідношення швидкості розвитку об'ємних деформацій мікроструктури і кінетики її структурування. У разі повільного розвитку початкових деформацій при досить швидкому наборі структурної міцності dP_c / dt , поряд з релаксацією деформацій в матеріалі міжчасткових перегородок, відбувається їх зростання і "загасання" кінчика тріщини за рахунок спрямованого дифузійного масопереносу за схемою, рис. 1.9 [27].

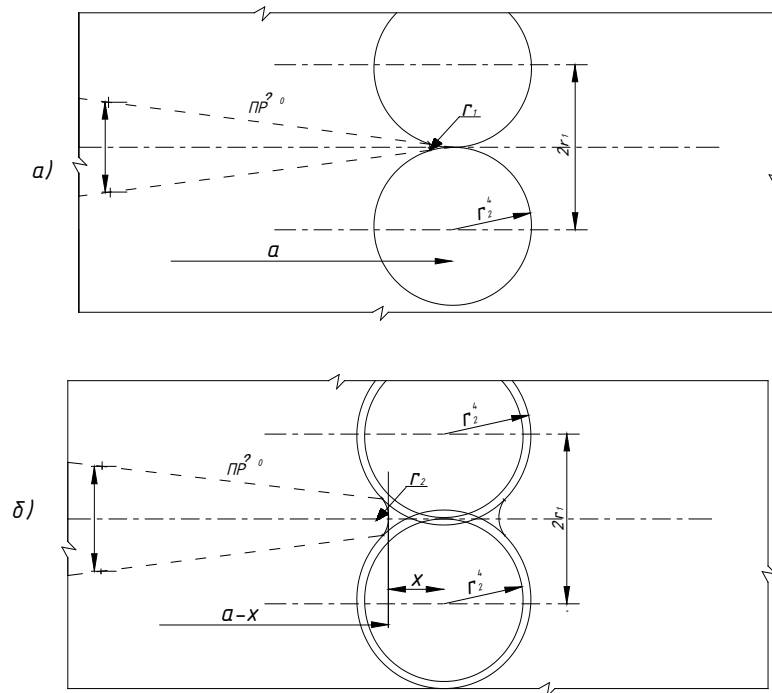


Рис. 1.9 Механізм притуплення гирла зародкової тріщини:

- а) - фрагмент тріщини в момент утворення міжчасткового контакту;
- б) - фрагмент гирла зародкової тріщини після утворення міжчасткового контактного перешийка.

При поглибленні процесів гідратації змінюється природа міжчасткових контактів - система переходить в пружний стан, що веде до концентрації в зоні контакту напружень. Зростання таких тріщин в цьому випадку пов'язане з інтенсивністю концентрації напружень і протікає в періоди залишкового набору міцності і експлуатації КБМ. Тому другою необхідною умовою утворення зародкових тріщин в початкові періоди організації мікроструктури є випереджаючі значення пластичних деформацій V / dt в порівнянні з часом їх релаксації і переходу системи в інший реологічний стан.

Таким чином, в мікроструктурі КБМ можливі умови, що забезпечують зародження тріщин на початкових етапах структуроутворення без впливу зовнішніх навантажень [27].

1.4 Методи неруйнівного контролю та дослідження напружено-деформованого стану елементів, що згинаються

Неруйнівний метод контролю бетону в нашій країні і за кордоном один з найбільш затребуваних методів перевірки якості бетону та бетонних конструкцій і здійснюється такими методами, які не впливають на працездатність виробу. Тому після проведення неруйнівного контролю виріб вважається, в разі позитивних результатів, придатним до експлуатації.

Методи неруйнівного контролю знайшли найбільш широке застосування завдяки своїй високій функціональності, точності, науковій та методичній строгості. Безумовно, головна перевага цих методів в тому, що при їх застосуванні конструктивно-технологічна і функціональна структура виробів зберігається до подальшого застосування. МНК, не змінюючи якості, параметрів і характеристик виробу, дозволяють за непрямыми вторинними ознаками виявити приховані дефекти, або розкрити такі особливості, які тягнуть за собою потенційну ненадійність виробів. Вони дозволяють досліджувати вироби в процесі їх розробки, виробництва, випробувань і експлуатації, а також можуть застосовуватися для оцінки якості технологічних процесів і відпрацювання виробів, які не задовольняють вимогам.

Класифікація видів і методів неруйнівного контролю (МНК) наведена в ГОСТ 18353-79 (28). Відповідно до ГОСТ – МНК поділяються на такі види: акустичні (ультразвукові), капілярні, електрохімічні, магнітні, оптичні, теплові, радіаційні, радіохвильові, електромагнітні, електричні.

Методи неруйнівного контролю повинні відповідати таким основним вимогам:

- носити дійсно неруйнівний характер;
- бути експресними;
- володіти достатньою чутливістю і роздільною здатністю (28).

1.4.1 Електротензометричний метод

Напружено-деформований стан конструкції - сукупність внутрішніх напружень і деформацій, що виникають при дії на неї зовнішніх навантажень, температурних полів та інших факторів. НДС визначається розрахунковими і експериментальними методами, у вигляді розподілу напружень, деформацій і переміщень в конструкції і є підставою для оцінки статичної міцності. При розрахунках НДС певним чином ідеалізується розрахункова схема. Розрізняють загальний і місцевий НДС. Загальний НДС визначається в силових елементах конструкції без урахування концентрації напружень, викликаних місцевими конструктивними особливостями. Місцевої НДС визначається поблизу концентратора напружень з урахуванням виду концентратора і прикладеного навантаження. При розрахунковому методі дослідження місцевого НДС від навантаження може бути визначений з попереднього розрахунку загального НДС. Результати розрахунку НДС мають бути підтвержені експериментально.

Тензометрія - експериментальне визначення напруженого стану конструкцій, засноване на вимірі місцевих деформацій. Методи і засоби тензометрії забезпечують виявлення причин руйнувань за результатами дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкції, дозволяють знаходити найбільш оптимальні і досконалі конструктивні рішення, вивчати вплив різних технологічних факторів на міцність конструкцій [29].

Тензометри застосовуються для вимірювання лінійних деформації поверхневих волокон елементів конструкцій при статичних випробуваннях.

За конструктивною ознакою можна виділити чотири різновиди тензометрів: механічні, електричні, струнні, тензорезисторні.

Можна зробити висновок, що тензометричний метод є одним з найбільш перспективних і полягає у вимірах малих деформацій на поверхні досліджуваного об'єкта і в подальшому переході від деформацій до напружень на основі закону Гука. Головною перевагою методу тензометрії є те,

що можна заміряти напруження без механічного впливу на об'єкт. Тензометр вимірює справжні напруження: залишкові або діючі. При вимірах немає необхідності знати передісторію (умови експлуатації) об'єкта, не потрібно знання параметра кристалічної решітки матеріалу в ненапруженому стані.

1.4.2 Акустичний метод

З початку 90-х років ХХ століття активно ведеться розробка і виробництво приладів неруйнівного контролю нового покоління із застосуванням електроніки і мікропроцесорної техніки, нарощуються їх функціональні можливості.

Акустичні МНК засновані на реєстрації і аналізі параметрів пружних хвиль, які збуджуються і / або виникають в об'єкті контролю.

Сфера використання акустичних методів досить широка, наприклад ультразвукові дефектоскопи. Вони можуть застосовуватися до всіх матеріалів, що проводять акустичні хвилі. Приклад застосування активного акустичного МНК представлений на рис. 1.10.

У лівій частині рисунка (а) зображений об'єкт, який не має дефектів і відповідає його перевірці графік, на якому відображені інформативні параметри акустичної хвилі (в даному випадку час проходження через об'єкт). Справа (б) – зображено графік, відповідний наявності дефекту.

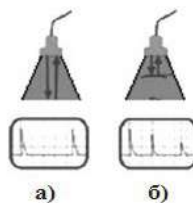


Рис.1.10 Застосування активного акустичного МНК (відображення)

При даному виді неруйнівного контролю реєструють пружні хвилі, параметри яких тісно пов'язані з такими властивостями матеріалів, як пружність, щільність, анізотропія і інші. Акустичні властивості твердих

матеріалів і повітря настільки сильно відрізняються, що акустичні хвилі відбиваються від найтонших зазорів (тріщин, непроварів) шириною 10^{-6} - 10^{-4} мм. Цей вид контролю придатний до всіх матеріалів, що досить добре проводять акустичні хвилі: металів, пластмас, кераміки, бетону і т.д.

За характером взаємодії з об'єктом розрізняють пасивний і активний методи.

Пасивний акустичний метод передбачає реєстрацію пружних хвиль, що виникають в самому об'єкті. Шуми працюючого механізму дозволяють судити про справність або несправність механізму і навіть про характер несправності. Цей пасивний метод акустичного контролю називається шумовібраційним.

Перебудова структури бетону, що викликається рухом груп дислокацій, виникненням і розвитком тріщин, аллотропічним перетвореннями в кристалічній решітці, супроводжується появою пружних хвиль ультразвукового (рідше звукового) діапазону. На використанні цих хвиль заснований метод акустичної емісії. Використовуючи такі інформативні параметри, як кількість сигналів за одиницю часу, їх частота, амплітудний розподіл, локація місця виникнення пружних хвиль, судять про стан матеріалу, що проходять в ньому зміни, прогнозують працездатність конструкції.

Суть ультразвукового методу полягає у випромінюванні в досліджуваній виріб і подальшому прийнятті відображених ультразвукових коливань за допомогою спеціального обладнання - ультразвукового дефектоскопа і п'єзоелектро перетворювачів і подальшому аналізі отриманих даних з метою визначення наявності дефектів, а також їх еквівалентного розміру, форми, виду, глибини залягання.

Градувальну залежність між швидкістю поширення ультразвуку і міцністю бетону на стиск визначають попередньо для конкретного складу бетону. Це пов'язано з тим, що застосування градувальних залежностей для бетонів інших або невідомих складів може привести до помилок у визначенні міцності [30].

Параметри виявлених дефектів визначаються за допомогою ультразвукових дефектоскопів. Так, наприклад, за часом поширення ультразвуку в виробі визначають відстань до дефекту, а по амплітуді відбитого імпульсу - його відносний розмір.

Для виявлення порожнеч і каверн в тілі бетонних і залізобетонних конструкцій використовується наскрізне ультразвукове прозвучування. Зона дефекту оцінюється як область з різким зниженням швидкості ультразвуку. Застосовують поверхневе прозвучування. Відстань між ультразвуковими датчиками складає 120-400 мм. Про наявність тріщини свідчить зміна часу поширення ультразвукових коливань на базі виміру. Для виявлення тріщин зручно використовувати прилади з датчиками на фіксованій базі і сухим контактом.

При зміні (збільшенні) часу поширення ультразвукового сигналу, що свідчить про тріщину, може бути встановлена її глибина. Для цього тріщина повинна розташовуватися під центром бази установки датчиків. При застосуванні ультразвукового методу глибина тріщини встановлюється по зміні часу проходження імпульсів як при наскрізному прозвучуванні, так і методом поздовжнього профілювання. Глибину тріщини визначають за співвідношенням (1.1):

$$h_{mp} = \frac{a}{2} \sqrt{\left(\frac{t_1}{t_a}\right)^2 - 1}, \text{ [мм]} \quad (1.2)$$

де: 1 - база вимірювання на бетоні через тріщину (положення датчиків И-П1), тріщина розташована рівно по середині, при цьому час поширення поздовжньої хвилі - t_1 ; а - база вимірювання на «чистому» бетоні - без дефектів, при обов'язковій умові $a = 1$, час поширення поздовжньої хвилі - t_a .

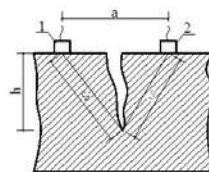


Рис.1.11 Визначення глибини тріщин в конструкції:

1 - випромінювач; 2 - приймач;

При виявленні причин появи тріщин необхідно відрізнити експлуатаційні тріщини від тріщин, що з'явилися під час виготовлення та монтажу елементів конструкцій.

Ультразвуковий метод дозволяє здійснювати масові випробування виробів будь-якої форми багаторазово, вести безперервний контроль наростання або зниження міцності. Недоліком методу є похибка при переході від акустичних характеристик до міцності [30].

Переваги застосування акустичного методу неруйнівного контролю: це перш за все, можливість діагностики дефектів внутрішнього типу, відносна простота приладів неруйнівного контролю, широкий спектр матеріалів, придатних для обстеження.

1.4.3 Поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень (метод фотопружності)

Експериментальний аналіз стає кращим при дослідженні просторових завдань, проблем динамічного навантаження, залишкових напружень і непружної поведінки матеріалу [31, 32].

Поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень використовується для визначення напружень в задачах теорії пружності, пластичності, лінійної і нелінійної в'язкопружності та інших завданнях нелінійного і непружного деформування, в тому числі, і при кінцевих деформаціях. Даний метод дозволяє отримати наочну картину розподілу напружень, деформацій і переміщень біля вершини тріщини. Він особливо придатний для знаходження слабких місць, концентрацій напружень або складних епюр напружень, а також і для виявлення тріщин і для спостереження за процесами росту тріщин або розривів. Метод придатний для дослідження статичних і періодичних динамічних процесів.

Розвиток обчислювальної техніки і чисельних методів дещо звузили традиційну сферу застосування поляризаційно-оптичного методу дослідження напружень. Однак він продовжує відігравати важливу роль при вирішенні задач механіки деформованого твердого тіла (МДТТ), в тому числі в механіці композитів, теорії тріщин, в задачах упругов'язкопластичності і т.п. [33-35]. З точки зору вимірювання характеристик напружено-деформованого стану поляризаційно-оптичний метод дослідження напружень є одним з найбільш інформативних і точних експериментальних методів МДТТ. Цінність методу фотопружності полягає також в тому, що він дозволяє моделювати в прозорих зразках напружені стани, що виникають в пластинах, виготовлених з оптично неактивних і взагалі непрозорих матеріалів. Можливість моделювання заснована на теоремі Леві-Мічелла [32, 33], згідно з якою для пружних тіл в плоских задачах розподіл напружень при заданому навантаженні на контурі не залежить від механічних характеристик матеріалу. Це вірно для однозв'язних областей або для багатозв'язних областей, коли система сил, що діють на кожен граничний контур, статично еквівалентна нулю. Теорема має місце при плоскій деформації і узагальненому плоскому напруженому стані (УПНС), оскільки постановка завдання для середніх по товщині характеристик напружено-деформованого стану в разі УПНС математично ідентична постановці завдання про плоску деформацію [32].

Методом фотопружності можна ідентифікувати перевантажені і недовантажені області. Успішне застосування методу залежить тільки від точного визначення кольору смуги (ізохром) і від співвідношення між порядком смуги та величиною напруження [34].

Властивості фотопружних матеріалів вибирають відповідно до характеру необхідних результатів і методикою їх обробки.

В даний час найбільш широко застосовуються фотопружні матеріали з епоксидних смол, так як вони придатні для виготовлення моделей з метою

дослідження напружень методом фотопружності. Такі матеріали недорогі, мають хороші оптичні і механічні характеристики.

Таким чином, метод фотопружності дає можливість отримати картину розподілу максимальних дотичних і напрямків головних напружень в прозорих моделях. Використання додаткових способів обробки отриманих результатів дозволяє визначити всі компоненти поля напружень.

1.5. Моделі критеріїв руйнування

Як відзначалось раніше, технологічні дефекти визначають місцевий напружено-деформований стан конструкції, характер тріщиноутворення та поверхню руйнування. Спрямована зміна технологічної пошкодженості дозволить управляти фізико-технічними властивостями матеріалів, характером тріщиноутворення та руйнування конструкцій [35].

Широко відомий критерій руйнування твердого тіла з дефектом у вигляді тріщини, розроблений Гріффітсом [36].

Модель Гріффітса припускає наявність тріщин в матеріалі та розглядає руйнування як розвиток тріщин. Енергетичний критерій руйнування Гріффітса ґрунтується на понятті похідної сум пружної енергії тіла і енергії руйнування.

Аналіз характеру тріщиноутворення залізобетонної балки показав, що вертикальні і похилі тріщини, що виникли під дією зовнішнього навантаження, проходять по кордонах розділу структурних блоків (повторюють конфігурацію технологічних тріщин). Руйнівна (магістральна) тріщина ділить конструкцію на дві частини.

Аналіз поверхні руйнування показав, що переважний розвиток має магістральна тріщина. Звертає на себе увагу макротраєкторія магістральної тріщини - при збереженні загального напрямку вона зростає по траєкторії технологічних поверхневих дефектів. Це дає підставу припустити, що ке-

руючи технологічною пошкодженістю, можна змінювати умови, кінетику росту і макротраєкторію магістральних тріщин.

Отже, знаючи швидкість звільнення пружної енергії технологічної тріщини, з'являється можливість припустити швидкість і етапи розвитку силової тріщини.

Гріффітс [36] висунув припущення, згідно з яким тріщина дістає можливість поширюватись, якщо швидкість звільнення пружної енергії (з розрахунку на одиницю довжини вільної поверхні, що знову утворилася) досягає свого критичного значення G_c , і тому, в силу приведених міркувань, критерій руйнування може бути сформульований як:

$$G = G_c \quad (1.3)$$

Для тріщини нормального відриву, що вивчається нами, критерій руйнування Гріффітса представляється формулою (1.4):

$$\frac{1}{E} K_I^2 = G_c \quad (1.4)$$

Згідно [37], якщо в (1.4) ввести добре відомий результат $K_I = \sigma_{22}^\infty \sqrt{\pi l}$ для нескінченної пластини з тріщиною довжиною $2l$, то приходимо до формули Гріффітса (1.5):

$$\sigma_{22}^\infty = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi l}} \quad (1.5)$$

Співвідношення (1.4) характеризує стан критичної рівноваги тріщини нормального відриву в пружному тілі. Якщо при цьому навантаженні і цій довжині тріщини енергія, що звільняється, менше G_c , то тріщина не росте і тому енергетичний критерій руйнування Гріффітса може бути сформульований таким чином: руйнування починається і підтримується, якщо енергія, що звільняється, досягає критичного значення G_c [37].

Критерії початку поширення тріщини можуть бути отримані як на основі енергетичних міркувань, так і силових.

Застосування інваріантних інтегралів як з точки зору їх використання для аналізу полів напружень та переміщень біля вершини тріщини, так і в

проблемах, пов'язаних з формулюванням критеріїв, що встановлюють межі докритичного розвитку тріщин також відображені у багатьох роботах.

У 1968 р. Ешелбі [38] ввів силу, необхідну для поширення тріщини, у формі інтеграла не залежного від контура інтеграції. Цей інтеграл отримується із теорії сил, що діють на дефекти в кристалах, розробленою Ешелбі на основі поняття тензора енергії-імпульсу [39]. У рамках механіки руйнування ця теорія модифікується з тим, щоб вона могла бути використана для суцільного середовища, що містить дефекти і неоднорідності, а не для кристалів, що містять дислокації.

Пізніше інваріантний інтеграл був виведений Гюнтером (W. Gunter) [40] за допомогою теореми Нетер (E. Noether) [41].

Перші інваріантні інтеграли Ешелбі в теорії пружності були знайдені за допомогою спеціальної техніки і аж до роботи [40] ніяк не зв'язувалися з варіаційними симетріями енергетичного функціонала теорії пружності. Узагальнення інваріантних інтегралів на динамічний випадок сталося пізніше - в роботах [42-47].

Систематичне виведення інваріантних інтегралів теорії пружності за допомогою варіаційної теореми Нетер наведений в статті [47].

Нарешті, слід згадати роботи [48, 49], де велика кількість нетривіальних законів збереження була отримана на базі теорії узагальнених групових симетрій.

Інтенсивне застосування J - інтеграла в механіці руйнування в якості параметра, що характеризує напружено-деформований стан тріщини в тілах пружнопластичності, був сформульований Райсом [50].

Черепанов Г. П. отримав інваріантний Γ -інтеграл механіки руйнування безпосередньо із закону збереження енергії [51]. Згадаємо концепцію інваріантного інтеграла Г.П. Черепанова - Дж. Райса [52, 53]. Значення цього інтеграла, також застосовуються в критеріях руйнування. Нарешті, відмітимо деформаційний критерій Леонова - Панасюка - Дагдейла [54, 55], що оперує поняттям розкриття тріщини. Підкреслимо, що для пружних тіл, тобто у разі

крихкого руйнування, силовий і енергетичний критерій еквівалентні, а значення інтеграла Райса - Черепанова дорівнює похідній пружній енергії по параметру, що характеризує віртуальний приріст розмірів тріщини.

Історично склалося так, що Гріффітсом А.А. був запропонований енергетичний критерій руйнування, а силовий критерій набагато пізніше був сформульований Ірвіном Дж. Р. Вчений також показав еквівалентність цих двох критеріїв. Послідовна реалізація силового підходу привела до створення досить строгої і завершеної теорії лінійної механіки руйнування, що є основою, для аналізу крихких руйнувань матеріалів та інженерних конструкцій.

Для пружного тіла з тріщиною J - інтеграл є з точністю до знаку швидкість зміни його потенційної енергії при збільшенні довжини тріщини [56].

Силовий критерій Ірвіна використовує поняття коефіцієнта інтенсивності напружень в множинку при головному члені асимптотики рішення поблизу вершини тріщини.

Моделлю Ірвіна встановлено [57], що для кожного типу тріщин існує критичне значення коефіцієнтів інтенсивності K_{ac} після досягнення якого починається зростання тріщини. Дійсно, процес руйнування матеріалу при поширенні тріщини обумовлюється напружено-деформіроаним станом біля вершини тріщини, яке, в свою чергу, в лінійно пружному тілі визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень, оскільки

$$\sigma_{ij}(r, \varphi) = \frac{K_{\alpha}}{\sqrt{2\pi r}} \hat{\sigma}_{ij}(\varphi) + \dots \quad (r \rightarrow 0), \quad (1.6)$$

де $\alpha = I, II, III$; кутовий розподіл $\hat{\sigma}_{ij}(\varphi)$ не залежить від силових факторів і універсально. Тому можна припустити, що тріщина отримує можливість поширюватися при досягненні коефіцієнтом інтенсивності напружень деякого критичного значення. Цей критерій руйнування отримав назву силового критерію руйнування.

Таким чином за допомогою енергетичного і силового критеріїв руйнування з'являється можливість описати етапи розвитку технологічної тріщини і, як наслідок, етапи розвитку силової тріщини.

1.6. Застосування математичного апарату механіки руйнування для дослідження полів напружень і деформацій біля вершини тріщини в елементах, що згинаються

Аналіз розподілів напружень, деформацій і переміщень поблизу вершини тріщини є однією з фундаментальних завдань механіки тріщин [58-62], що представляє інтерес з теоретичної [58-60], експериментальної [61] і обчислювальної точок зору [62].

В даний час багато питань, пов'язаних з знаходженням напружено - деформованого стану поблизу вершини дефекту, залишаються відкритими. Зараз в механіці тріщин і, в цілому, в механіці руйнування склалося розуміння процесу руйнування як процесу багатомасштабного і багаторівневого, для опису основних закономірностей якого слід вдаватися до багатомасштабних моделей. В рамках багаторівневого підходу процес руйнування моделюється за допомогою різних визначальних співвідношень на різних відстанях від вершини тріщини за допомогою введення полів напружень з різною асимптотичною поведінкою біля вершини тріщини. При побудові рішення задачі в цілому уявлення, що працюють на різних відстанях від вершини тріщини, зрощуються в зонах, де справедливі асимптотики сусідніх областей. Одним з найбільш поширених математичних методів побудови розподілів напружень, деформацій і переміщень біля вершини тріщини є асимптотичний аналіз, який базується на підходах, розвинутих в асимптотичній теорії [63].

Останнім часом особливий інтерес викликає аналіз напружено-деформованого стану біля вершини тріщини в умовах змішаного навантаження при одночасному прикладанні розтягуючого нормального і поперечного навантажень зсуву в матеріалах з нелінійними визначальними співвідношеннями [64-66]. Очевидно, що принцип суперпозиції рішень, що відповідають тріщині нормального відриву та тріщині поперечного зсуву, справедливий тільки для лінійно-пружних матеріалів. Для матеріалів з нелінійними (наприклад, часто використовуваними на практиці степенями)

визначальними рівняннями слід розробляти нові методи і підходи аналізу напружено-деформованого стану.

Слід зазначити, що кутові розподіли і характер особливості механічних полів біля вершини тріщини в умовах змішаного деформування при плоскому деформованому стані досить добре вивчені [64-66]. В [64] розроблена методика і наведені результати розрахунків пружнопластичних коефіцієнтів інтенсивності напружень в повному діапазоні змішаних форм деформування від нормального відриву до чистого поперечного зсуву. В [64] розглянуто стан довільно орієнтованої прямолінійної тріщини у вигляді математичного розрізу при двувісному навантаженні різної інтенсивності. Чисельне рішення побудовано на використанні рівняння спільності деформацій, представленого через функцію напружень $E\epsilon$ і її похідних. Поведінка пружнопластичного матеріалу відповідає моделі Рамберга-Осгуда (коли для опису пластичної деформації використовується степений закон деформаційної теорії пластичності). На основі виконаних розрахунків в [64] встановлено характер впливу виду змішаних форм навантаження і пластичних властивостей матеріалу, що описані показником деформаційного зміцнення. В [65] проведено аналіз напружено-деформованого стану області, що примикає до вершини похилої тріщини, в зразках трьох геометрій: хрестоподібний зразок при двувісному навантаженні, пластина з центральною похилою тріщиною і компактний зразок з одностороннім бічним надрізом. При різних поєднаннях умов навантаження і орієнтації вихідної прямолінійної тріщини для плоскої задачі відтворено повний діапазон змішаних форм деформування від нормального відриву до чистого зсуву. На основі представлених чисельних розрахунків встановлено комплексний вплив двувісності номінальних напружень, початкового кута орієнтації дефекту, відносної довжини тріщини і геометрії досліджуваного зразка на поля напружень і параметри напружено-деформованого стану. Наведено порівняння отриманого рішення з однопараметричним класичним рішенням типу Хатчінсона - Райса - Розенгрена (X_{rr}), яке підтверджує необхідність врахування членів високих порядків в

модельних уявленнях для випадку змішаних форм деформування. В [66] розглянуто статичне і малоциклове деформування для різних варіантів двувісного навантаження і представлені методи визначення напрямку росту тріщини при змішаних формах двувісного навантаження. В [67] наведені результати експериментальних досліджень особливостей розвитку пластичних зон і пошкодження сталі в умовах зсуву, відриву, змішаного типу навантаження і позацентрового циклічного навантаження. Встановлено вплив зсувної компоненти на еволюцію зон пластичної деформації, механічні та акустичні властивості (параметри акустичної емісії, швидкість і затухання ультразвукових хвиль). В [68] на основі класичного рішення лінійної механіки руйнування про навантаженні пластини з тріщиною кінцевої довжини отримано аналітичні вирази для всіх коефіцієнтів асимптотичного розкладу поля напружень як функцій прикладеного навантаження розтягу і зсуву і довжини тріщини. За допомогою знайдених аналітичних виразів побудовані розподіли напружень при довільній комбінації відриву і поперечного зсуву. Дослідження характеристик циклічної тріщиностійкості конструкційної сталі в умовах змішаного навантаження виконано в [69], де на основі чисельних розрахунків напружено-деформованого стану в хрестоподібному зразку з центральною тріщиною визначені значення T-напружень і K-тарувальних функцій. Експериментально встановлено вплив виду напруженого стану на швидкість росту тріщини при двувісній деформації. В [70] отримано асимптотичне подання напружено-деформованого стану і поля суцільності біля вершини тріщини в зразку, що знаходиться в умовах змішаного деформування, для випадку плоского деформованого стану. На підставі автомодельного подання рішення і гіпотези про формування області повністю дефрагментованого (диспергірованого) матеріалу поблизу вершини тріщини отримано розподіл напружень, швидкостей деформацій і суцільностей у стаціонарній тріщини в середовищі з пошкодженістю в повному діапазоні змішаних форм деформування (від чистого зсуву до нормального відриву). Побудовано вищі наближення в асим-

птотичних розкладаннях полів напружень, швидкостей деформацій повзучості і суцільності. Однак при визначенні напружено-деформованого стану поблизу вершини тріщини в умовах плоского напруженого стану виникають складнощі, пов'язані з рішенням нелінійної задачі на власні значення, до якої призводить метод розкладання за власними функціями. Слід зазначити, що завдання визначення плоского напруженого стану для тіл з вирізами недостатньо вивчені і активно досліджуються останнім часом. [71-74].

Використання механіки руйнування в момент оцінювання КБМ не змінює уявлень про матеріал як про безперервне середовище. Проведений аналіз методів розрахунку будівельних конструкцій не дозволив визначити методи, що враховують гетерогенність матеріалу та її вплив на загальний та локальний напружено-деформований стан конструкції [75].

Таким чином, структуру конструкції можна уявити різними моделями, від яких залежить вид поставленої мети та вивчення її поведінки при дії експлуатаційних навантажень, а також причин, що пояснюють його.

Перейдемо до методів, що дозволяють досліджувати НДС біля вершини технологічних тріщин в залізобетонних згинальних елементах, які переходять в тріщини експлуатаційні. Відомо, що тріщини - це несучільності матеріалу, які здатні концентрувати в місцях змикання деформації та напруження, що значно відрізняються від середніх значень в об'ємі матеріалу. Тому вивчення питання НДС біля вершини технологічної тріщини є, на нашу думку, особливо важливим.

В [76] приведена схема трансформації тріщини у внутрішні поверхні розділу (ВПР), рис.1.12. Розкриємо поняття ВПР та опишемо коротко рис. 1.12 (а).

Під внутрішніми поверхнями розділу розуміють поверхні розділу між матричним матеріалом та поверхнею заповнювачів та інших елементів (включень, арматури і т.п.). Це несучільності матеріалу, які утворилися при розвитку тріщин до їх виходу на поверхню берегів інших тріщин або внутрішніх поверхонь розділу [76].

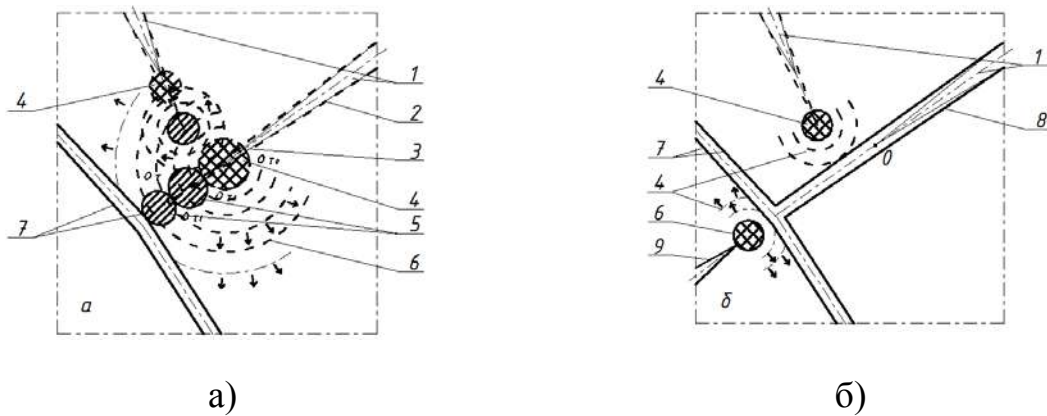


Рис. 1.12 Схема трансформації тріщини у ВПР:

а – ріст технологічної тріщини; б – модель структури після переходу ТТ у ВПР; 1 – ТТ; 2 – берега ТТ; 3 – гирло ТТ; 4 – зона концентрації деформацій та напружень; 5 – рух зони концентрації деформацій та напружень; 6 – деформаційні хвилі у матеріалі; 7 – берега ВПР; 8 – підростаюча ТТ

Перетворення технологічної тріщини (ТТ) в експлуатаційну тріщину (ЕТ) змінює структуру матеріалу, але при цьому не веде до встановлення рівноваги в системі (співіснування різних за видом, якісним, кількісним складом та призначенню підсистем забезпечують цілісність та призначення конструкції як системи). Релаксація локального напружено-деформованого стану відбувається при виході ЕТ на берега ВПР. В цьому випадку тріщина втрачає свій основний елемент - гирло. Енергія, яку тріщина підвела до кордону розділу, витрачається на збільшення ширини розкриття колишньої тріщини в зоні її виходу на берег ПР.

В системі відбулися якісні зміни, пов'язані з перетворенням експлуатаційної тріщини в нову для системи поверхню розділу. Аналогічні процеси відбуваються при виклинюванні однієї тріщини на берега іншої тріщини, що одну тріщину перетворює у ВПР, а зростання іншої може призупинитися за рахунок порушення цілісності одного з берегів. Завершальний цикл перетворення тріщини в кордон розділу представлений на рис. 1.13 (б).

Для дослідження напружень та переміщень в лінійно пружних тілах в даний час зазвичай використовуються три методи: метод комплексних поте-

нціалів Колосова-Мусхелішвілі [77], метод інтегральних перетворень [78] та метод розкладання за власними функціями [79].

1.7. Список використаних джерел у розділі 1

У розділі 1 використані [1 – 79] літературні джерела. Їх найменування наведені в загальному списку використаних джерел.

ВИСНОВКИ ЗА ПЕРШИМ РОЗДІЛОМ ДИСЕРТАЦІЇ

Аналізуючи літературні джерела можливо сформулювати наступні задачі досліджень:

- отримати данні для подальшого розвитку інформації про роботу матеріалів на мікро- і макрорівнях та тріщиностійкості залізобетонних балок під час експлуатації;
- виконати лабораторні експериментальні дослідження згинальних елементів на моделях з метою встановлення характеру розподілу напружень і утворення тріщин;
- встановити закономірність розподілу напружень та деформацій біля вершини тріщини і встановити характер подальшого руйнування;
- запропонувати математичну модель визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини в елементах, що згинаються.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика дослідження полів напружень і деформацій на моделях

Метод фотопружності дає можливість отримати картину розподілу максимальних дотичних і головних напружень в прозорих моделях. Використання додаткових способів обробки отриманих результатів дозволяє визначити всі компоненти поля напружень.

Важливою сферою застосування методу фотопружності є дослідження напружень і деформацій у виробках з пружних матеріалів, зокрема в бетоні. Тому для проведення експерименту було виконано заміну залізобетонних блоків зменшеними моделями з епоксидної смоли, що мають таку ж форму (прямокутну).

Відзначимо, що модуль пружності матеріалів з епоксидних смол близький до модуля пружності залізобетону, тому в даний час у якості моделей найбільш широко застосовуються саме ці оптично активні матеріали.

Зразки з епоксидної смоли прийняті розмірами: $16\text{см} \times 2,7\text{см} \times 1,5\text{ см}$ (рис. 2.1). Вивчався розподіл ізохром в області заданої технологічної тріщини, яка розташовувалася в середині прольоту зразка. Зразки навантажували на установці Вимірювач міцності ІПС. 4.03 в лабораторії кафедри "Виробництво будівельних конструкцій, виробів та матеріалів" Одеської державної академії будівництва та архітектури. Розподіл полів напружень в зразку проводився при навантаженнях: 12, 19, 29, 42 і 55 кг (рис. 2.1).

Технічні характеристики матеріала випробуваних моделей наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики епоксидної смоли

Показники	Од. виміру	Значення показника
Зовнішній вигляд		Медоподібна жовтувата рідина. Легко фарбується
Щільність при 20°C	кг/м ³	1,16-1,25
Міцність при розтягу	МПа	40-90
Міцність при стиску	МПа	100-200
Міцність при згині	МПа	80-140
Модуль пружності	МПа	3000-4500
Температура полімеризації	°C	от 20
Час полімеризації		1,5 години
Час повної полімеризації		24 години
Водопоглинання за 24 часа	%	0,01-0,1
Ударна в'язкість	кДж/м ²	5-25
Теплостійкість	°C	55-170
В'язкість при 20 °C	МПа*С	4000
Гарантований строк зберігання		епоксидної смоли -1,5 року затверджувача– 2 роки

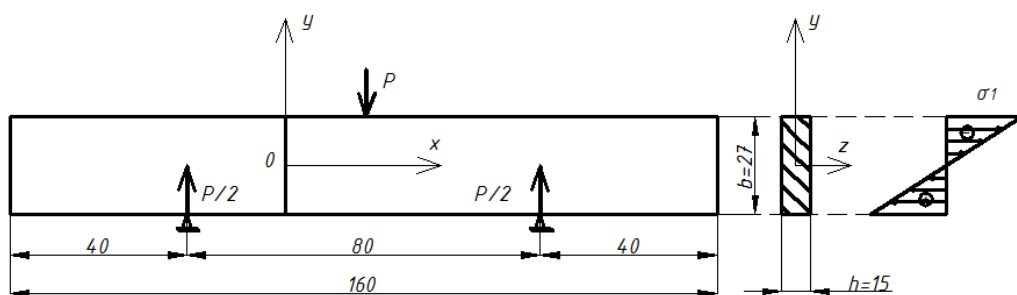


Рис. 2.1 Схема навантаження випробуваних моделей

2.2 Методика визначення технологічної пошкодженості залізобетонних зразків

У процесі дослідження технологічної пошкодженості дослідних зразків вивчалася сітка тріщин на їх поверхнях. Для більш якісної оцінки ступеню технологічної пошкодженості проявлення тріщин здійснювалося на зразках, які досягли віку – 205 ... 225 діб, після проходження карбонізації. Для прояву тріщин використовувався водний розчин таніну [81]. Дослідні зразки витримувалися в розчині протягом 20 ... 30 хв, після замочування - висушувалися в лабораторії протягом двох діб. При взаємодії з лужним середовищем бетону танін адсорбується на внутрішніх поверхнях початкових тріщин, внаслідок чого тріщини набувають кольору і стають добре помітними на поверхні (рис.2.2.).

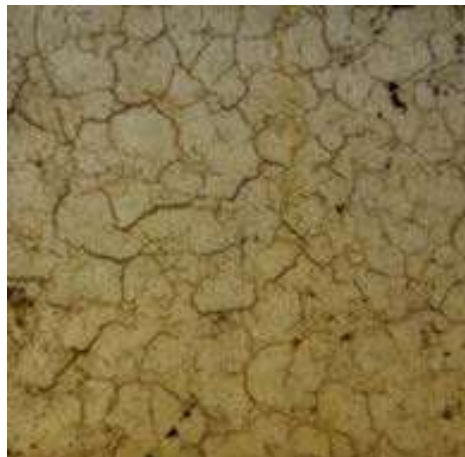


Рис.2.2 Рисунок поверхневих тріщин після обробки зразка розчином таніну

Для дослідження розподілу інтегральних технологічних деформацій випробувались залізобетонні зразки - балки (А1 і А2), розмірами 10x15 см і довжиною 120 см.

У нашому випадку, припускаючи, що технологічні тріщини мікророзвісті, була прийнята методика оцінювання пошкодженості через коефіцієнт пошкодженості K_n , який визначався як відношення довжини звивистої трі-

щини l_T до геодезичної лінії виходу тріщин на певній ділянці зразка або на його гранях L :

$$K_n = l_T / L \quad 2.1$$

Фізичний сенс полягає в оцінці питомої довжини поверхневих тріщин, виявлених на одиниці довжини (рис. 2.3). Зі збільшенням K_n характеристики міцності як бетону, так і цементного каменю, знижуються.

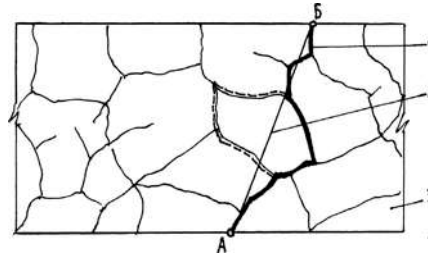


Рис. 2.3 Метод визначення коефіцієнта пошкодженості

1 - технологічна тріщина L_T ; 2 - геодезична лінія L ;

3 - виділена ділянка на поверхні зразка

При виборі площі візуально оглядали балки і вибирали ділянку з найбільш чітким рисунком початкових технологічних тріщин. Схема визначення коефіцієнта пошкодженості після визначення міцності на розтяг при згині показана на рис. 2.4.

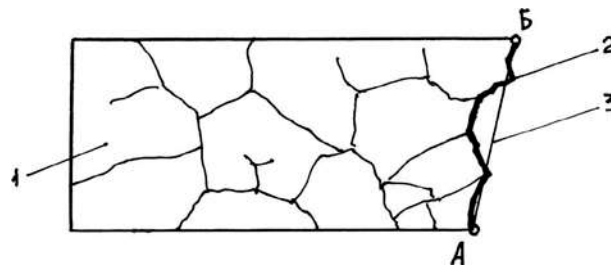


Рис. 2.4 Схема визначення коефіцієнта пошкодженості після визначення міцності на розтяг при згині.

1 - випробуваний зразок; 2 - технологічна тріщина;

3 - геодезична лінія

2.3 Методика дослідження напружено-деформованого стану бетонних і залізобетонних експериментальних зразків

З метою вивчення впливу технологічної пошкодженості на фізико-механічні властивості бетону і на роботу залізобетонних елементів під навантаженням були проведені випробування на залізобетонних зразках - балках (A1 і A2), розмірами 10x15 см і довжиною 120 см.

В якості робочої арматури досліджуваних балок прийняті стрижні періодичного профілю зі сталі класу А500С діаметром 12 мм і ВрІ діаметром 4 мм. Для арматури встановлені середня межа плинності значення тимчасового опору розриву, модуль пружності і величину її повного відносного подовження після розриву (Таблиця 2.2).

Армування залізобетонних балок виконувалося плоскими каркасами. Відсоток армування залізобетонних балок склав $\rho_f = 1,47\%$.

Таблиця 2.2

Характеристики застосовуваної арматури

Клас арматури	Ø,мм мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$E_{ст} \cdot 10^5$, МПа	δ , %
A500C	12	500	600	1,994	14,6
ВР-I	4				

В роботі використаний один з видів суперпластифікаторів для товарного бетону на основі акрилатів Dynamon Easy 11.

Висока якість сировинних матеріалів дозволила нам отримати бетонну суміш класу С 20/25 П4 W6. Склад і фізико-механічні властивості бетонної суміші представлені в табл. 2.3 і 2.4 відповідно.

Таблиця 2.3

Склад бетонної суміші на 1 м³

Найменування матеріалу	Витрата, кг
Цемент ПЦІІ/А-Ш-500	377,1
Пісок	705

Продовження таблиці 2.3

Щебінь (10-20)	1080
Dynamon Easy11	1,9
Вода	173,5

Таблиця 2.4

Фізико-механічні властивості бетонної суміші

Показник	Одиниці виміру	Показники
Щільність	кг/м ³	2330
Водопоглинання	%	5,9
Межа міцності при стиску	МПа	33,1

Геометричні характеристики залізобетонних згинальних елементів наведені на рис. 2.5.

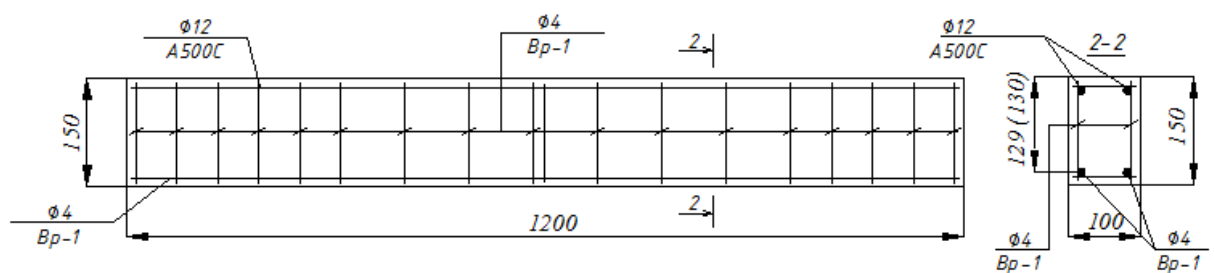


Рис. 2.5 Геометричні характеристики зразків-балок А1 і А2
(армування)

Дослідні зразки бетонували в металічних розбірних формах. Вироби виготовляли з бетону класу С 20/25, рухливістю 4 см (за осадкою конусу). Щільність бетону склала 2400 кг / м³, водопоглинання - 5,9%.

Межу міцності при стисненні бетону визначалась відповідно до загальноприйнятих методик згідно ДСТУ Б В.2.7-214: 2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [81].

Крім того, міцність в окремих ділянках виробів визначали неруйнівними методами згідно визначення швидкості проходження ультразвуку з використанням ультразвукового приладу УК-10П. Швидкість ультразвуку в кожній точці обчислювали як середнє арифметичне з трьох визначень.

Так само застосовувався метод визначення межі міцності при стисненні, за допомогою приладу ПС-МГ 4.03 з помилкою $\delta = \pm 8,0\%$, діапазон від 3 МПа до 100 МПа. Показник міцності визначали як середнє значення з шести показань.

Щільність і водопоглинання матеріалів балки в окремих ділянках зразків визначали шляхом його розпилювання. При цьому обсяг окремих фрагментів зразка визначали відповідно до методики для зразків неправильної форми з попереднім парафініруванням (ДСТУ Б В.2.7-170: 2008 «Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності») [82].

Твердіння бетонних і залізобетонних виробів проходило в нормальних умовах протягом 7 діб. Після розпалубки вироби зберігалися в природних умовах ($t = 20 \pm 2 \text{ C}^\circ$ і відносною вологістю $\phi = 80 \pm 15\%$) протягом не менше 28 діб.

Основні характеристики міцності і деформативні характеристики бетону представлені в таблиці 2.5. Характеристики дослідних балок наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.5

Характеристики міцності і деформативні характеристики бетону

Марка балки	$V_{w,exp}$, Н	$V_{u,exp} = V_{c,exp}$, Н	$M_{w,exp}$, Н х м	$M_{u,exp}$, Н х м	$\frac{M_{w,exp}}{M_{u,exp}}$
A1	1188	2210	4020	9900	0,41
A2	1210	2150	4005	8500	0,47

Таблиця 2.6

Характеристики дослідних балок

Марка балки	b, см	h, см	d, см	f_c , МПа	f_{cd} , МПа	$E_{cm} \times 10^{-5}$, МПа	Вік/ до-ба
A1	10,0	15,0	12,9	25,0	19,5	2,70	205
A2	10,0	15,1	13,0	25,1	19,3	2,60	225

Деформації в балках вимірювалися за допомогою тензометрів Аїстова з базою 200 мм, розташованих від опори до бази тензометра на відстані 400 мм.

Ціна поділки шкали тензометра Аїстова дорівнює 0,001 мм.

Тензометри встановлювалися посередині балки. Від верхнього краю залізобетонної балки до першої пари тензометрів (Т1 і Т2) відстань склала 18 мм. Відстань вимірювалась від краю балки до середини бази тензометра. Від першої пари тензометрів (Т1 і Т2) до другої пари тензометрів (Т4 і Т8) відстань склала 35 мм. Від другої пари тензометрів (Т4 і Т8) до третьої пари тензометрів (Т2 і Т6) відстань склала 42 мм. Від третьої пари тензометрів (Т2 і Т6) до четвертої пари тензометрів (Т3 і Т7) відстань склала 35 мм. Від четвертої пари тензометрів і до краю відстань склала 20 мм. Схема установки тензометрів показана на рис. 2.6, 2.7.

Після проведення експерименту, були отримані данні, які внесені у таблицю розділу 3.



Рис.2.6 Фотофіксація розташування тензометрів Аїстова



Рис.2.7 Фотофіксація розташування тензометрів Аістова

Прогини балок в середині прольоту і осідання опор в процесі випробування вимірювалися за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Таким чином, база між першим і другим індикатором складала 100 мм, між другим і третім складала 100 мм. Схема установки індикаторів зображена на рис 2.8, загальний вигляд залізобетонної балки на установці зображений на рис. 2.9.



Рис. 2.8 Схема розташування індикаторів годинникового типу



Рис. 2.9 Загальний вигляд залізобетонної балки на установці

Після обробки даних тензометрів були отримані відносні деформації балок на кожному етапі завантаження. Усереднені деформації стиснення і розтягування визначалися як середнє арифметичне між двома показниками тензометрів (розділ 3).

2.4 Методика проведення експерименту на залізобетонних зразках

Залізобетонні балки випробовувалася на згин з метою отримання експериментальних даних з тріщиностійкості та деформативності в стислій і розтягнутій зонах при дії малоциклових навантажень.

Випробування проводилося на установці, призначеної для статичних і динамічних випробувань матеріалів на розтяг, стиск і вигин.

Балки випробовувалися як однопрольотні (робочий проліт - $L = 1,0$ м), шарнірно оперті, завантажені двома зосередженими силами, розташованими на відстані $L/250$ від опор [83]. Схема завантаження наведена на рис. 2.10.

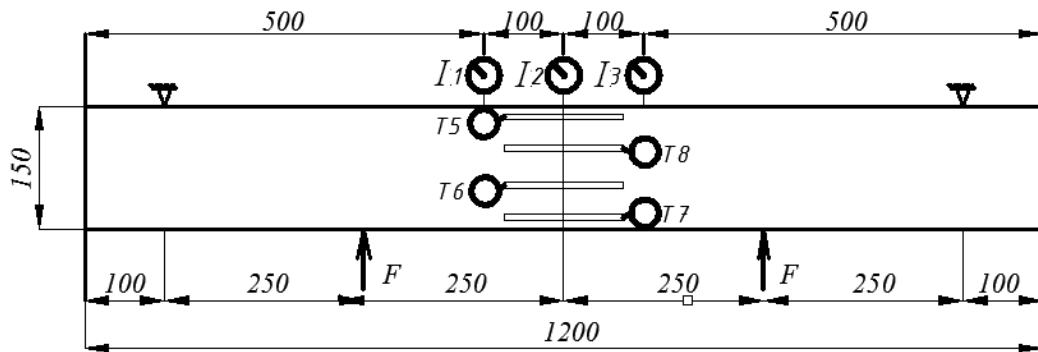


Рис. 2.10 Схема завантаження залізобетонної балки-зразка

Підготовлені до випробування залізобетонні балки-зразки встановлювались на стенд. Передача навантаження здійснювалася через розподільну траверсу, розташовану по геометричному центру балок і оперту також на шарнірно-нерухомі опори.

Випробування балок-зразків при короткочасному навантаженні виконувалося ступенчатим навантаженням рівним 500 кгс від очікуваного навантаження руйнування. Витримка на кожному ступені тривала 5 хвилин для зняття показників з приладів.

Навантаження на першому ступені склало 500 кгс, після цього знімалися показники з індикаторів годинникового типу і тензometrів Аістова. Показники індикаторів і тензometrів на кожному циклі знімалися двічі: відразу після прикладання навантаження і після витримки зразка під навантаженням через п'ять хвилин. Потім навантаження скидалося до нуля, знімалися відліки. Кожний наступний цикл збільшувався на 500 кгс від попереднього, знімалися показники з приладів для визначення прогинів і деформацій, наступні етапи випробування здійснювалися аналогічно.

Було виконано 6 циклів навантаження зразків. Перші тріщини з'явилися після першого циклу навантаження, навантаження склало 500 кгс. На останньому етапі – при навантаженні 2750 кгс сталося руйнування зразка.

Під час випробувань залізобетонних балок фіксували значення індикаторів годинникового типу і тензometrів, а також моменти утворення і розкриття тріщин в стислій і розтягнутій зонах.

Для зняття тензометричних вимірювань використовувався автоматизований комплекс. Під час витримки зразків під навантаженням проводився огляд їх бічних поверхонь, фіксувалися тріщини, вимірювалася ширина їх розкриття. За руйнівне приймалася максимальне навантаження зразка, після досягнення якого спостерігалось його різке зниження.

2.4.1. Удосконалена методика визначення технологічної пошкодженості в залізобетонних елементах, що згинаються (визначення глибини технологічної тріщини із застосуванням ультразвукового методу)

Як відомо, в матеріалах вже на стадії їх виготовлення і використання в будівельних конструкціях виникають поряд з тріщинами втоми, так звана технологічна пошкодженість.

Технологічні (початкові) тріщини, які є невід'ємною частиною структури бетону, порушують її цілісність і змінюють фізико-механічні характеристики бетону.

На протязі всього експерименту до руйнування зразка велося як візуальне спостереження за тріщинами, так і за допомогою ультразвукового приладу. Очікуваним результатом даного методу було визначення глибини технологічних тріщин в залізобетонних зразках-балках до прикладання навантаження на зразок, які впливають на несучу здатність конструкцій в певному перерізі. А також вимірювання глибини силової тріщини, яка розвивалася із технологічної, протягом експерименту.

Для визначення глибини технологічної тріщини був застосований ультразвуковий прилад УК-14П (рис. 2.14). Діапазон вимірювання часу поширення УЗК 20 ... 8800 мкс. Діапазон вимірювання тривалості фронту першого прийнятого сигналу 3 ... 30 мкс, а абсолютна чутливість приладу не менше 110 дБ. Перед тим як знімати показання, місця, де будуть прикладатися датчики, змащувалися вазеліном для кращої передачі ультразвукових хвиль.

Глибина тріщини свідчить про те, чи знаходиться розлом в області зовнішнього бетонного покриття або він проходить наскрізь через весь елемент.

Нами прийнята наступна схема розташування датчиків ультразвукового приладу на досліджуваному елементі (рис. 2.11):

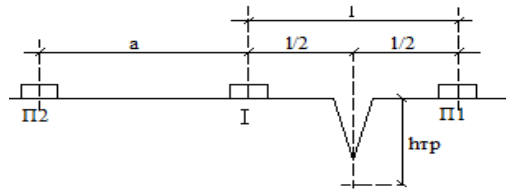


Рис. 2.11 Схема вимірювання глибини тріщин

де: l - база вимірювання на бетоні через тріщину (положення датчиків I-П1), тріщина розташована рівно по середині, при цьому час поширення позовжньої хвилі - t_1 ; a - база вимірювання на «чистому» бетоні - без дефектів (положення датчиків I-П2), при обов'язковій умові $a = l$, час поширення позовжньої хвилі - t_a .

Прилад автоматично розраховує глибину тріщини по формулі:

$$h_{mp} = \frac{a}{2} \sqrt{\left(\frac{t_1}{t_a}\right)^2 - 1} \quad (2.2)$$

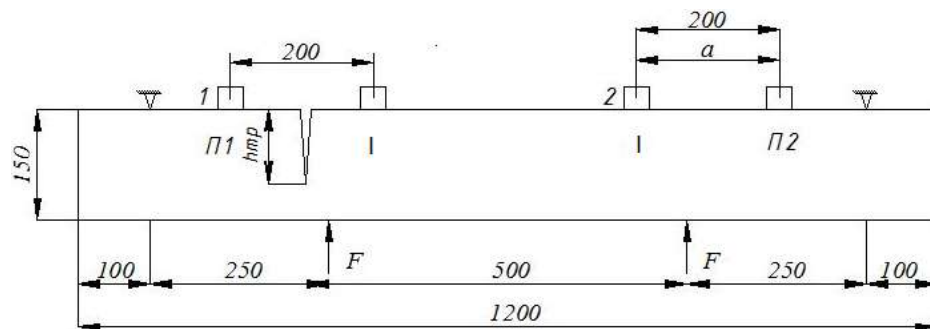


Рис. 2.12 Схема розташування датчиків ультразвукового приладу

УК14П на випробуваному зразку:

1 - база вимірювання на бетоні через тріщину (положення датчиків I-П1); 2 - база вимірювання на непошкодженому бетоні (положення датчиків I-П2)

Схема розташування індикаторів годинникового типу, тензометрів Аістова, датчиків ультразвукового приладу Ук-14П, задіяних в експерименті, наведена нижче рис. 2.13.

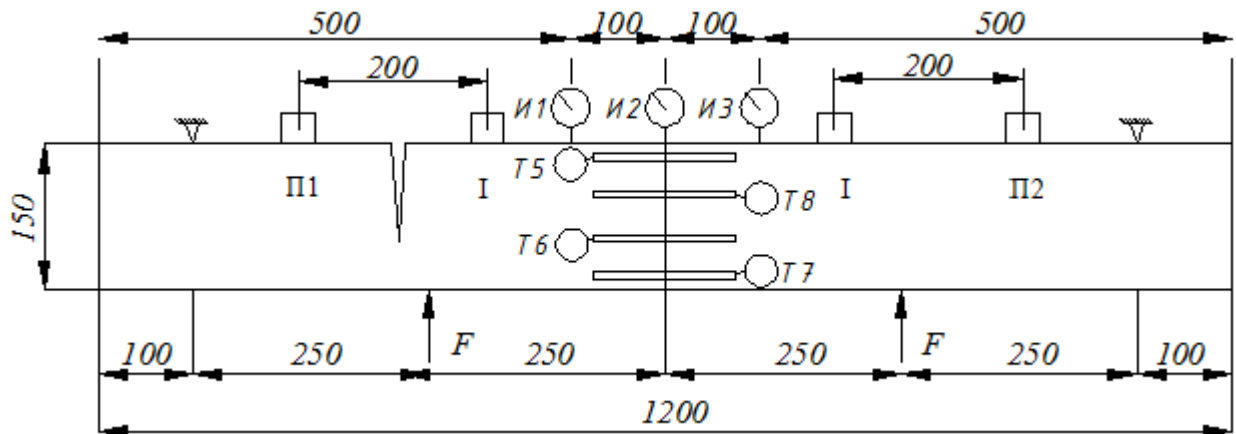


Рис. 2.13 Схема розташування індикаторів годинникового типу, тензометрів Аістова, датчиків ультразвукового приладу Ук-14П



Рис. 2.14 Ультразвуковий прилад УК-14П

Утворення і розвиток тріщин фіксувалося за допомогою маркерів. Наносилася лінія, що повторює конфігурацію тріщин, і підписувалась величина навантаження.

Під час витримки зразків під навантаженням, проводився огляд бічних поверхонь зразків, знімалися показання часу поширення ультразвукових хвиль, вимірювалася ширина їх розкриття. За часом поширення ультразву-

кових хвиль, згідно з формулою (2.2) визначалась глибина тріщини. Всі результати заносилися в таблицю (розділ 3).

За результатами випробувань був побудований графік залежності глибини тріщини від малоциклових навантажень (розділ 3).

Під час випробувань проводилась фотофіксація, зняття показань (рис.2.15).



Рис. 2.15 Прозвучування балки ультразвуковим приладом УК-14П

Слід зазначити, що протягом експерименту спостерігалось наступне: більша частина нормальних і похилих тріщин закривалися, а при навантаженні зразків вони знову відкривалися (розділ 3).

2.5 Методика математичного опису напружено-деформованого стану біля вершини технологічної тріщини в згинальних елементах (з використанням силових та енергетичних критеріїв руйнування)

Як було сказано раніше, утворення великих тріщин, що призводять до катастрофічного руйнування викликано завжди присутніми в матеріалі дефектами, вкрапленнями, мікротріщинами, які з часом можуть перетворюватись на великі тріщини і стати причиною повного руйнування.

Використання досліджень в області механіки руйнування є одними з найважливіших для забезпечення науково - технічної діяльності. Предметом механіки руйнування є міцність як окремих елементів конструкцій, так і

конструкцій в цілому в умовах реальної експлуатації. Серед цілого ряду чинників, що впливають на міцність, і, як наслідок, на ресурс конструкції, можна виділити тріщиностійкість.

Застосовуючи апарат механіки руйнування, ми завжди обираємо модель руйнування. Вибравши конкретну модель руйнування, необхідно встановити набір критеріїв руйнування, актуальних для цієї моделі.

На основі енергетичного (критерій Гріффітса) та силового (критерій Ірвіна) критеріїв руйнування запропонована методика математичного опису напружено-деформованого стану біля тріщини нормального відриву, яка виникає на поверхнях розділу в заповнювачах з різними модулями пружності та може переростати в технологічну тріщину.

Нині основними підходами до моделювання руйнування є наступні. Класична теорія крихкого руйнування А. Гріффітса (A. A. Griffith) [36, 84], в основу якої закладено поняття енергії руйнування. Інший підхід ґрунтується на концепції квазікрихкого руйнування Дж. Ірвіна [85, 86], і Е. Орована [87], доповнюючи теорію Гріффітса.

Проведемо аналіз енергетичних аспектів крихкого руйнування тіла з тріщиною, спираючись на співвідношення енергетичного балансу.

Розглянемо розрахунок швидкості звільнення пружної енергії, обумовленої розвитком технологічної тріщини в пружному тілі.

Незважаючи на різноманітність процесів, що відбуваються біля вершини тріщини, процес зростання макротріщини може бути описаний кількісно на основі рівняння віртуального енергетичного балансу, сформульованого для віртуальної зміни довжини тріщини. Цей підхід описаний в класичних роботах А.А. Гріффітса (A.A. Griffith) [36]. Гріффітс записав рівняння енергетичного балансу для пружного тіла з тріщиною, коли енергія при поширенні тріщини витрачається тільки на утворення нових вільних поверхонь.

Ґрунтуючись на роботу [89], досліджуємо енергетичні аспекти крихкого руйнування тіла з тріщиною, спираючись на співвідношення енергетичного балансу.

Гріффітс у своїй класичній роботі [36] висунув припущення, згідно з яким тріщина дістає можливість поширюватись, якщо швидкість звільнення пружної енергії (з розрахунку на одиницю довжини вільної поверхні, що знову утворилася) досягає свого критичного значення G_c , і тому, в силу приведених міркувань, критерій руйнування може бути сформульований як;

$$G = G_c. \quad (2.4)$$

Як вказано в [37], якщо розглянути ізотропне лінійне пружне тіло, для якого об'ємна щільність енергії деформації є $W = \lambda(\varepsilon_{kk})^2/2 + \mu\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$, і в якості контура, що охоплює вершину тріщини, вибрати коло радіусом $r(r \rightarrow 0)$, а потім використати асимптотику поля напружень біля вершини тріщини нормального відриву (2.5),

$$\begin{cases} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{cases} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{cases} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{cases} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \hat{\sigma}_{ij}(\theta), \quad (2.5)$$

то для швидкості звільнення пружної енергії $G = D/i$ можна отримати (2.6):

$$G = \lim_{r \rightarrow 0} \int_C \left(W n_1 - (n \cdot \sigma) \cdot \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) ds = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2. \quad (2.6)$$

Для тріщини нормального відриву, яка виникає на поверхнях розділу в заповнювачах з різними модулями пружності та може переростати в технологічну тріщину, що вивчається нами, критерій руйнування Гріффітса представляється формулою (2.7):

$$\frac{1}{E} K_I^2 = G_c. \quad (2.7)$$

Згідно [37], якщо в (2.7) ввести добре відомий результат $K_I = \sigma_{22}^\infty \sqrt{\pi l}$ для нескінченної пластини з тріщиною довжиною $2l$, то приходимо до формули Гріффітса (2.8):

$$\sigma_{22}^\infty = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi l}}. \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) характеризує стан критичної рівноваги тріщини нормального відриву в пружному тілі. Якщо при цьому навантаженні і цій довжині тріщини енергія, що звільняється, менше G_c , то тріщина не росте і тому енергетичний критерій руйнування Гріффітса може бути сформульований таким чином: руйнування починається і підтримується, якщо енергія, що звільняється, досягає критичного значення G_c [89].

Як вказано в [89] Гріффітсом розглядалася необмежена пластина, товщина якої B , з центральною тріщиною довжиною $2l$, що знаходиться під дією напруження постійного розтягу σ_{22}^∞ . Учений постулював, що для утворення одиниці нової вільної поверхні під дією прикладеного навантаження зменшення потенційної енергії тіла (внаслідок підростання тріщини) має бути рівне поверхневій енергії, витраченої на утворення нової вільної межі тіла (внаслідок приросту довжини тріщини). Таким чином, згідно Гріффітсу, тріщина росте, якщо потенційної енергії, що звільняється, вистачає для подолання взаємодії шарів атомів і утворення нової вільної поверхні.

Повна зміна енергії даної системи: тіло + тріщина при утворенні нової вільної поверхні є сума $\delta\mathcal{E} + \delta\Pi$, де $\delta\mathcal{E}$ – зміна потенційної енергії тіла при підростанні тріщини (тобто звільнена потенційна енергія тіла при утворенні нової вільної поверхні тріщини), $\delta\Pi$, — поверхнева енергія, яку необхідно витратити на подолання міжатомних зв'язків сусідніх атомних шарів для утворення нової вільної поверхні тріщини.

Згідно Гріффітсу критична умова для страгування тріщини та підтримування її зростання є $\delta\mathcal{E} + \delta\Pi = 0$, або

$$\frac{\partial(\mathcal{E} + \Pi)}{\partial l} = 0 \quad (2.9)$$

У загальному випадку довільного тіла для утворення тріщини довжини l поверхнева енергія на одиницю товщини тіла визначається як:

$$\Pi = 2l\gamma, \quad (2.10)$$

де γ , згідно з гіпотезою Гріффітса, – енергія, що витрачається на утворення одиниці площі вільної поверхні тіла, є постійною матеріалу за заданих

зовнішніх умов (температура, зовнішнє середовище і т.і.). Тоді рівняння енергетичного балансу може бути представлене рівністю (2.11):

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l} = 2\gamma. \quad (2.11)$$

Слід зазначити принципову для механіки крихкого руйнування особливість, що отримується з рівності (2.8): критичне напруження обернено пропорційне \sqrt{l} і, отже, після досягнення критичного значення напруження для підтримки зростання тріщини не вимагається:

$$\frac{\partial^2(\mathcal{E} + \Pi)}{\partial l^2} < 0; \quad (2.12)$$

протилежна нерівність

$$\frac{\partial^2(\mathcal{E} + \Pi)}{\partial l^2} > 0 \quad (2.13)$$

визначає умову стійкого зростання тріщини, коли потрібно мале збільшення зовнішнього навантаження для малого збільшення довжини тріщини. Такі тріщини називаються рівноважними.

У формулах (2.10), (2.11) використовується константа γ , — щільність поверхневої енергії, що є важливою фізичною характеристикою міцності матеріалу. У співвідношеннях (2.4), (2.7) основна характеристика, що входить в критерій руйнування, є величина G швидкості звільнення в процесі зростання тріщини пружної енергії. Очевидно, що γ , та G_c пов'язані між собою. Дійсно, відомо з роботи [90], що

$$G = -\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l}. \quad (2.14)$$

Таким чином, G виступає швидкістю звільнення потенційної енергії пружного тіла з тріщиною.

З (2.14) і (2.11) отримаємо, що

$$G_c = 2\gamma. \quad (2.15)$$

Розглянутий нами ідеалізований критерій крихкого руйнування Гріффітса запропонований для гострої експлуатаційної тріщини в лінійно пруж-

ному тілі, яка розвивалась з технологічної тріщини під малоцикловим навантаженням.

Таким чином, на підставі рівняння віртуального енергетичного балансу, сформульованого для віртуальної зміни довжини тріщин, існує можливість описати процес зростання макротріщини. Згідно теорії А.А. Гріффітса можна стверджувати, що тріщина зростає, якщо потенційної енергії, що звільняється, вистачає для подолання взаємодії шарів атомів і утворення нової вільної поверхні.

Як відзначалось раніше, технологічні дефекти визначають місцевий напружено-деформований стан конструкції, характер тріщиноутворення та поверхню руйнування. Спрямована зміна технологічної пошкодженості дозволить управляти фізико-технічними властивостями матеріалів, характером тріщиноутворення та руйнування конструкцій [35].

Далі пропонується застосування інваріантних інтегралів як модель для аналізу полів напружень та переміщень біля вершини тріщини, що розвивалась із технологічної тріщини, так і їх використання в проблемах, пов'язаних з формулюванням критеріїв, що встановлюють межі докритичного розвитку тріщин.

Опишемо процес розвитку тріщини, що розвивається із технологічної тріщини в елементах, що згинаються, а також обчислення потоку енергії в її вершину, застосовуючи інваріантний J - інтеграл.

Можна припустити, що, напрямлено управляючи технологічними тріщинами, можна змінювати умови, кінетику зростання і мікротраєкторію магистральних тріщин [35].

Як відзначалося вище, технологічні тріщини здатні концентрувати напруження у свого гирла, тобто ми можемо говорити, що край таких тріщин є місцем стоку енергії пружного поля, і тому виникає потік енергії у вершину тріщини, величина якого рівна втраті енергії за одиницю часу.

Скориставшись [88], опишемо обчислення потоку енергії у вершину тріщини, що розвивалась із технологічної тріщини. Для цього введемо кон-

тур C , що охоплює область V_c , оточуючий вершину технологічної тріщини та, який переміщується услід за вершиною тріщини, рис.2.16 (у двовимірному випадку контур охоплює область V_c на площині x_1, x_2).

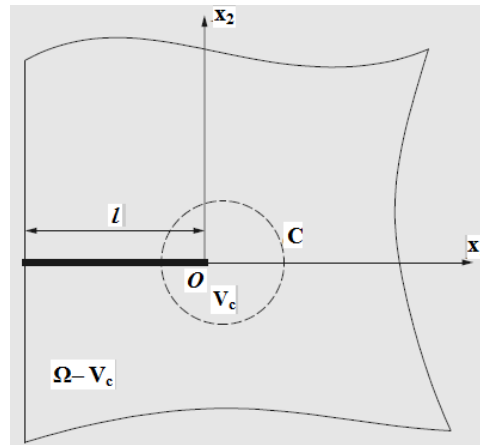


Рис. 2.16 Контур C , оточуючий вершину тріщини

Потік енергії Γ_1 локально стаціонарного пружного поля у вершину тріщини, що розвивалась із технологічної тріщини, що поширюється з постійною швидкістю у напрямі вісі x_1 може бути обчислений за формулою (2.16), [44]:

$$\Gamma_1 = \int_C \left[\left(W(\varepsilon_{ij}) + \frac{1}{2} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i - H \right) n_1 - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j \right] ds, \quad (2.16)$$

Відмітимо, що розрахунок інтеграла особливо цікавий для зникаючої малого контура C .

Якщо в якості контура C взяти вузький прямокутний контур, витягнутий уздовж вісі x_1 (рис. 2.17), то (2.16) набуває такого вигляду:

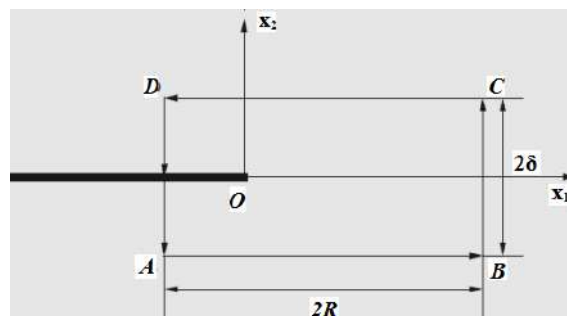


Рис. 2.17 Вибір контура інтеграції, що охоплює вершину технологічної тріщини, при обчисленні потоку енергії

$$\Gamma_1 = -\lim_C \int \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} n_j ds. \quad (2.17)$$

$$(R \rightarrow 0, \delta/R \rightarrow 0)$$

для тріщини нормального відриву (що розвивалася із технологічної в процесі проведення експерименту) вираз (2.16) має наступний вигляд (2.18):

$$\Gamma_1 = -2 \lim_{AB} \int \sigma_{22} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} dx_1. \quad (2.18)$$

$$(R \rightarrow 0, \delta/R \rightarrow 0)$$

Опишемо обчислення потоку енергії у вершину силової тріщини, що розвивається з технологічної.

Нехай в лінійно пружному тілі поширюється тріщина нормального відриву та реалізується стан плоскої деформації. Згідно (2.18) потік енергії в довільну точку вершини тріщини може бути вичислений як:

$$\Gamma_1 = -2 \lim_{R \rightarrow 0, \delta/R \rightarrow 0} \int_{-R}^{+R} \sigma_{22} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \Big|_{x_2=\delta} dx_1 = \frac{K_I^2 (1+\nu) M^2 \sqrt{1 - \frac{1-2\nu}{2-2\nu} M^2}}{8E \left[\sqrt{\left(1 - M^2 \left(1 - \frac{1-2\nu}{2-2\nu} M^2\right)\right)} - \left(1 - \frac{1}{2} M^2\right) \right]} \quad (2.19)$$

де K_I – локальний коефіцієнт інтенсивності напружень;

$$M = i/c_2.$$

Це співвідношення виражає лінійну щільність енергостокую на краю тріщини, що рухається, через локальний коефіцієнт інтенсивності напружень K_I .

Знаменник правої частини рівняння (2.19) перетворюється на нуль при $M = M_R$, де M_R – корінь рівняння Релєя:

$$R(M, \nu) = \sqrt{\left(1 - M^2 \left(1 - \frac{1-2\nu}{2-2\nu} M^2\right)\right)} - \left(1 - \frac{1}{2} M^2\right)^2 = 0. \quad (2.20)$$

Це рівняння має єдиний позитивний корінь, який менше 1 і визначає швидкість поширення хвиль по вільній поверхні пружного тіла [91].

У [88] відмічено, що чисельний аналіз рівняння Релея, дає можливість знайти значення кореня M_R залежно від значень коефіцієнта Пуассона $0 < \nu < 1/2$.

Для реальних матеріалів максимальна швидкість поширення тріщини обмежена деякою величиною c^* , меншою швидкості поверхневих хвиль Релея c_R , так що $M < M_* < M_R$, і рівній швидкості, при якій відбувається галуження тріщини, тобто коли з'являється два або більше напрямів розвитку тріщини.

Рівняння, що визначає значення M_* наведено у [88].

Відмітимо, вираз (2.16), для потоку енергії у вершину тріщини, що поширюється, залишається справедливим і для пружного поля, яке не є локально стаціонарним. Якщо постійна гранична швидкість поширення тріщини спостерігається на значному інтервалі часу її розвитку, то це явище можна пояснити тільки тим, що, починаючи з деякого значення швидкості поширення тріщини, величина енерговитрат, потрібних для прискорення розвитку тріщини, перевищує потік енергії Γ_1 в її вершину.

Застосуємо інваріантний J - інтеграл для формулювання критерію поширення тріщини, що розвивалась із технологічної тріщини.

Для пружного тіла з тріщиною J - інтеграл є з точністю до знаку швидкість зміни його потенційної енергії при збільшенні довжини тріщини [92].

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l} = J, \quad (2.21)$$

$$J = \int \frac{1}{c^2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds. \quad (2.22)$$

Застосування сингулярних доданків, приведених в [93], дають наступні обчислення:

$$J = \frac{\beta}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (2.23)$$

де $\beta = 1$ для плоского напруженого стану, $\beta = 1 - \nu^2$, для плоскої деформації.

Останнє співвідношення виражає зв'язок між інваріантним J - інтегралом та коефіцієнтами інтенсивності напруження і тим самим еквівалентність енергетичного критерію крихкого руйнування і силового критерію Ірвіна.

Таким чином можна сформулювати наступний критерій руйнування: тріщина починає поширюватися, коли J - інтеграл досягає граничного значення J_c , що є характеристикою матеріалу:

$$J(P, l, L, \dots) = J_c \quad (2.24)$$

Підсумком вище сказаного є: наведена формула для визначення потоку енергії Γ_1 локально стаціонарного пружного поля у вершину тріщини нормального відриву. Описана можливість обчислення потоку енергії в довільну точку тріщини (2.19). Це співвідношення виражає лінійну щільність енергоструму на краю тріщини, що рухається, через локальний коефіцієнт інтенсивності напруження K_1 [44].

Процес розвитку тріщини - самоприскорюючий, і потік енергії у вершину технологічної тріщини зростає зі збільшенням швидкості. Якщо постійна гранична швидкість поширення технологічної тріщини спостерігається на значному інтервалі часу її розвитку, то це явище можна пояснити тільки тим, що, починаючи з деякого значення швидкості поширення технологічної тріщини, величина енерговитрат, потрібних для прискорення розвитку тріщини, перевищує потік Γ_1 в її вершину.

За допомогою J - інтеграла сформульовано критерій поширення тріщини, що розвивалась із технологічної тріщини, в конструкціях, що згинаються.

2.6 Метод розкладання за власними функціями як модель дослідження напружень та переміщень біля вершини силової тріщини

Відомо, що найбільш актуальною проблемою, яка виникає при розрахунку та конструюванні інженерних споруд, є необхідність врахування нелінійностей різного виду і сингулярностей, викликаних частковим руйнуван-

ням біля концентраторів напружень у вигляді тріщин, гострих кутів та вирізів [94].

Аналіз розподілів напружень, деформацій та переміщень біля вершини тріщини є однією з фундаментальних задач механіки тріщин, що представляє інтерес з теоретичної, експериментальної та обчислювальної точок зору. В даний час багато питань, пов'язаних з визначенням напружено - деформованого стану поблизу вершини дефекту, залишаються відкритими. Зараз в механіці тріщин та, в цілому, в механіці руйнування склалося розуміння процесу руйнування як процесу багатомасштабного та багаторівневого, для опису основних закономірностей якого слід використовувати багатомасштабні моделі. В рамках багаторівневого підходу процес руйнування моделюється за допомогою різних визначальних співвідношень на різних відстанях від вершини тріщини за допомогою введення полів напружень з різною асимптотичною поведінкою біля вершини тріщини. При побудові рішення задачі відмічається, що поля напружень, що працюють на різних відстанях від вершини тріщини, зрощуються в зонах, де справедливі асимптотики сусідніх областей. Одним з найбільш поширених математичних методів побудови розподілів напружень, деформацій та переміщень біля вершини тріщини є асимптотичний аналіз, який базується на підходах, розвинутих в асимптотичній теорії [63].

Нижче розглядаються основні рівняння та поняття механіки руйнування, запропоновані в [95], що дозволяють за допомогою методу розкладання за власними функціями описати напружено-деформований стан біля вершини тріщини в пружному середовищі.

Як зазначено в [95], метод розкладання за власними функціями має більш широку область застосування, ніж лінійна теорія пружності (відомі додатки цього методу до аналізу напружень та деформацій біля вершини тріщини в тілах, що зміцнюються та в умовах повзучості, в тому числі і з урахуванням поля розсіяних пошкоджень).

Скористаємося схемою, наведеною в [79] для дослідження сингулярного поля біля вершини тріщини нормального відриву, яка розвивалася по траєкторії технологічної тріщини в залізобетонних елементах, що згинаються.

Як зазначено в [95], комплексний вигляд переміщень та напружень у полярній системі координат $z = re^{i\theta}$ такий:

$$\begin{aligned} 2G(u_r + iu_\theta) &= e^{-i\theta} \left[\kappa\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{x'(z)} \right] \\ \sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} &= 2\left[\varphi'(z) + \overline{\varphi'(z)}\right], \\ \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr} + 2i\sigma_{r\theta} &= 2e^{2i\theta}\left[\overline{z}\varphi''(z) + x''(z)\right] \end{aligned} \quad (2.25)$$

Поблизу вершини тріщини комплексні потенціали необхідно розкласти в ряди [1]:

$$\varphi(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n z^{\lambda_n}, \quad \sum_{n=0}^{\infty} B_n z^{\lambda_n+1}, \quad (2.26)$$

де λ_n – це речові числа, що мають сенс власних значень.

Гранична умова на берегах тріщини сформульована таким чином:

$$\sigma_{\theta\theta} + i\sigma_{r\theta} = 0 \quad (\theta = \pm\pi), \quad (2.27)$$

Підставляючи розкладання комплексних потенціалів в граничні умови, знаходимо (2.28):

$$\sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n r^{\lambda_n-1} \left\{ \begin{aligned} &\lambda_n e^{i(\lambda_n-1)\theta} A_n + \\ &+ e^{-i(\lambda_n-1)\theta} \overline{A_n} + (\lambda_n + 1) e^{i(\lambda_n+1)\theta} B_n \end{aligned} \right\} = 0 \quad (\theta = \pm\pi). \quad (2.28)$$

Характеристичне рівняння (2.29):

$$\sin 2\pi\lambda_n = 0 \quad (2.29)$$

приводить до низки власних значень (характеристичних чисел): $\lambda_n = n/2$ ($n = 1, 2, \dots$).

Від'ємні λ_n не підходять, оскільки призводять до нескінченних переміщень у разі $r \rightarrow 0$.

Значення $\lambda_n = 0$ також не підходить, оскільки в цьому випадку напруження та деформації при $r \rightarrow 0$ порядку r^{-1} , і тому пружна енергія будь-якої області, що примикає до вершини тріщини, буде мати нескінченно велике значення, що не є реалістичним.

Отже, найменше власне значення є $\lambda_1 = 1/2$.

Так як

$$\lambda_n A_n + (-1)^n \overline{A_n} + (\lambda_n + 1) B_n = 0 \quad (n = 1, 2, \dots), \quad (2.30)$$

то при $n = 1$ и $\lambda_1 = 1/2$ знаходимо асимптотики (2.31):

$$\varphi(z) = A_1 z^{1/2}, \quad x(z) = B_1 z^{3/2} \quad (2.31)$$

де $3B_1 = 2\overline{A_1} - A_1$.

Таким чином, напруження та переміщення поблизу вершини тріщини визначаються у вигляді (2.32...2.36):

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{4\sqrt{r}} \left[a_1 \left(5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) + a_2 \left(-5 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right], \quad (2.32)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{4\sqrt{r}} \left[a_1 \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) + a_2 \left(-3 \sin \frac{\theta}{2} - 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right], \quad (2.33)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{4\sqrt{r}} \left[a_2 \left(\cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \right) + a_1 \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]; \quad (2.34)$$

$$u_r = \frac{\sqrt{r}}{4G} \left[a_1 \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] + a_2 \left[-(2\kappa - 1) \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right] \right] \quad (2.35)$$

$$u_\theta = \frac{\sqrt{r}}{4G} \left[a_1 \left[-(2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] + a_2 \left[-(2\kappa + 1) \cos \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right] \right] \quad (2.36)$$

де $A_1 = a_1 - ia_2$.

Виділяючи симетричні та антисиметричні (по відношенню до осі x_1) члени та позначаючи $K_I - iK_{II} = \sqrt{2\pi}(a_1 - ia_2)$, отримуємо асимптотики для тріщин типів I (нормальний відрив) та II (поперечний зсув).

Розпишемо асимптотику для тріщин нормального відриву (2.37 ...2.40):

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} K_I \left(5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right), \quad (2.36)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} K_I \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.37)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} K_I \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.38)$$

$$u_r = \frac{\sqrt{r}}{4G\sqrt{2\pi}} K_I \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.39)$$

$$u_\theta = \frac{\sqrt{r}}{4G\sqrt{2\pi}} K_I \left[-(2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.40)$$

В [95] автор зазначає, що члени розкладів, що відповідають власним числам $\lambda = 1, 3/2, 2, \dots$, дають кінцеві при $r \rightarrow 0$ вклади в напруження.

Метод розкладання за власними функціями дозволив навести асимптотики напружено-деформованого стану біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних елементах, що згинаються (в середовищі з пошкодженням), отримані при використанні даного методу можуть бути знайдені усі наступні (несингулярні) члени розкладів напружень та переміщень біля вершини тріщини.

2.7 Список використаних джерел у розділі 2

У розділі 2 використані [35 – 37, 44. 79. 81 – 89. 90 – 92, 94, 95] літературні джерела. Їх найменування наведені в загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1. Напруження та деформації технологічно пошкоджених моделей-балок

Нами вивчався вплив напружень і деформацій на оптичні властивості матеріалу.

Проведено експеримент зі зразками з епоксидної смоли з розмірами $16\text{см} \times 2,7\text{см} \times 1,5\text{см}$, які є оптично активними прозорими матеріалами. Зразки навантажували ступенями.

Методом фотопружності було вивчено розподіл ізохром в області заданої технологічної тріщини, яка розташовувалася в середині прольоту зразка.

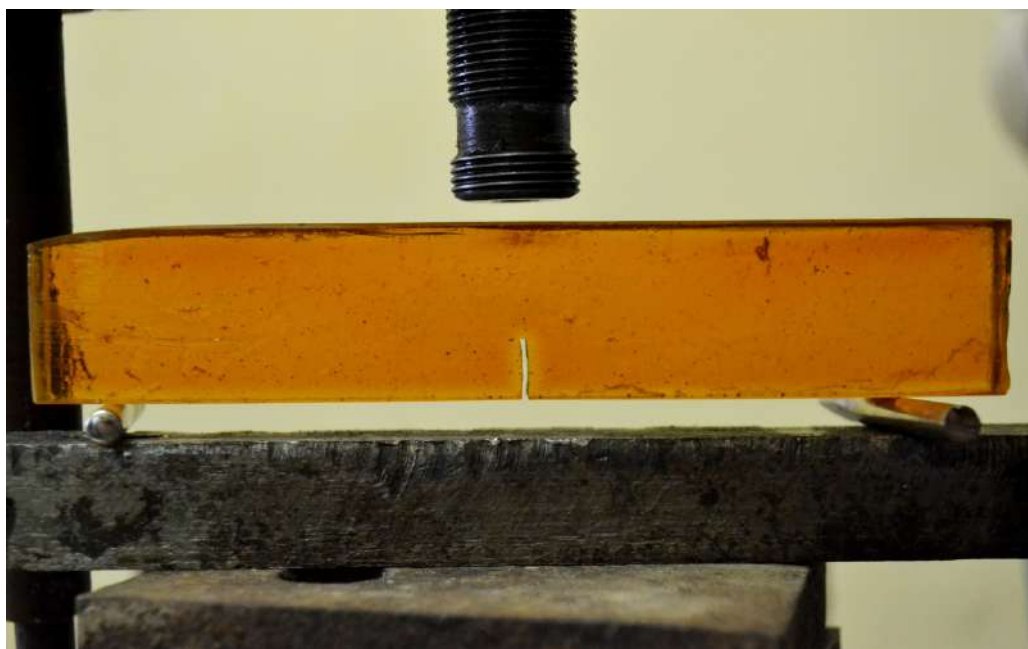


Рис. 3.1 Схема навантаження зразка із епоксидної смоли



Рис. 3.2 Зміна напружень при навантаженні зразка із епоксидної смоли

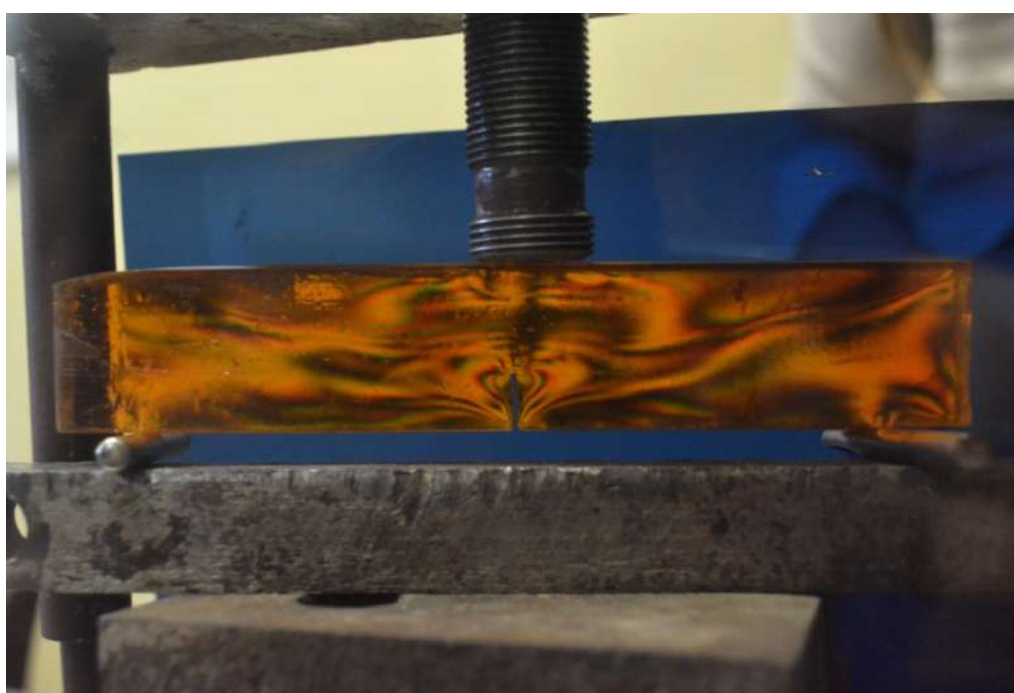


Рис. 3.3 Розподіл полів напружень в зразку із епоксидної смоли при навантаженні 12 кг

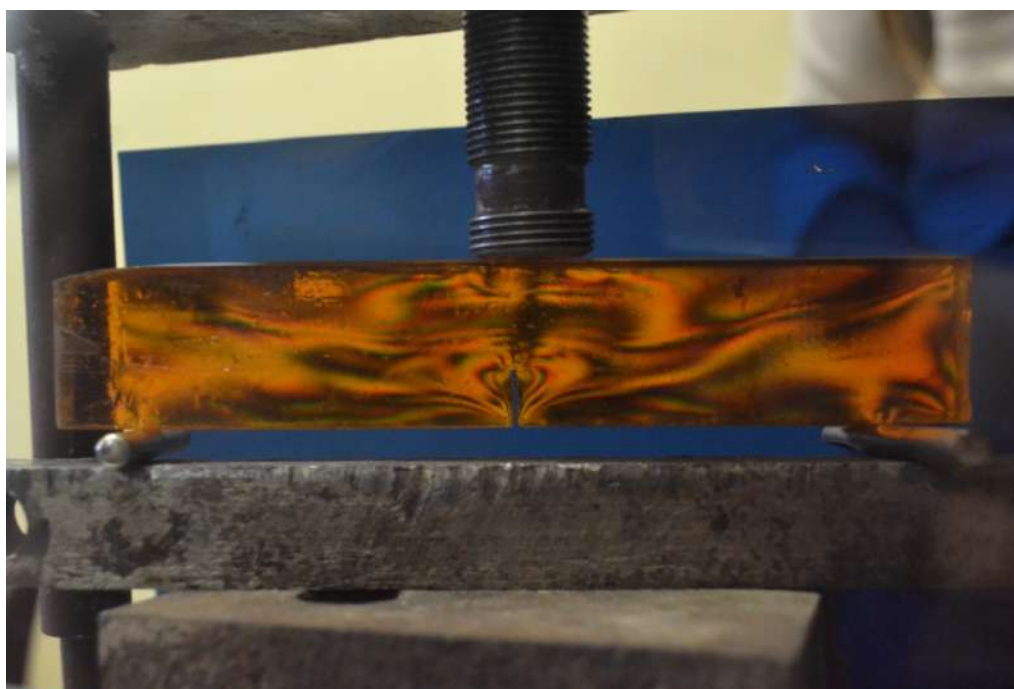


Рис. 3.4 Розподіл полів напружень в зразку із епоксидної смоли при навантаженні 19 кг



Рис. 3.5 Розподіл полів напружень в зразку із епоксидної смоли при навантаженні 29 кг



Рис. 3.6 Розподіл полів напружень в зразку із епоксидної смоли при навантаженні 42 кг

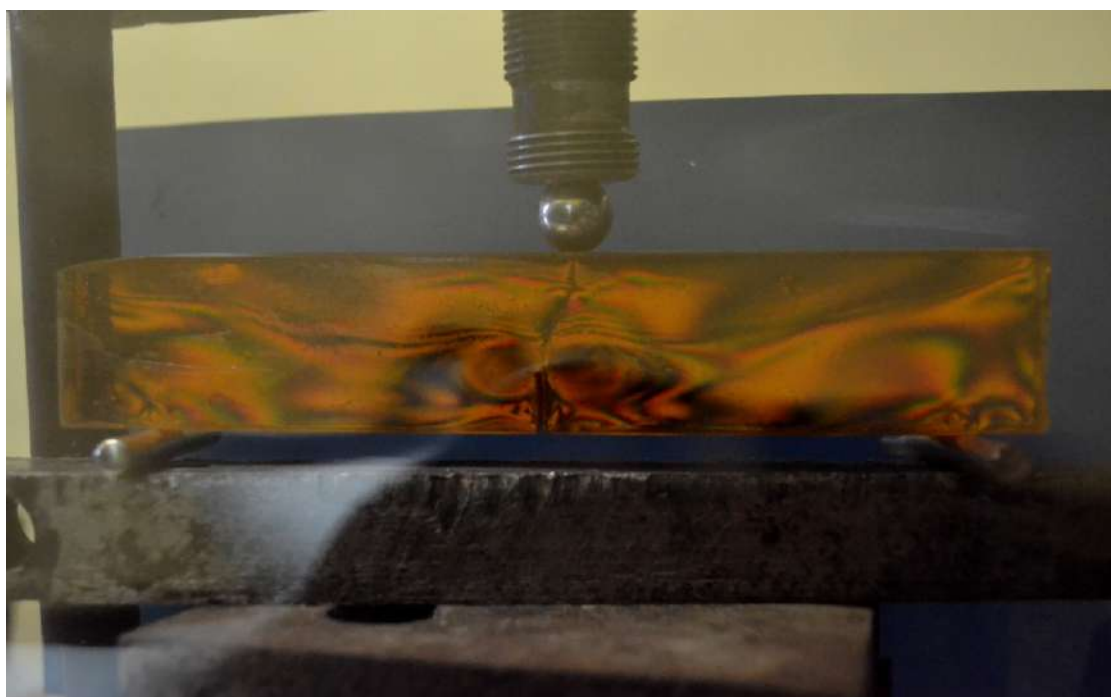


Рис. 3.7 Розподіл полів напружень в зразку із епоксидної смоли при навантаженні 55 кг

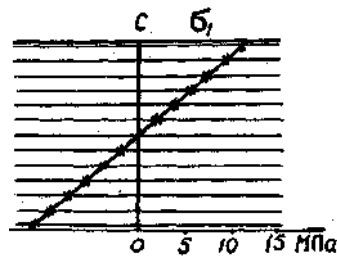


Рис. 3.8 Епюра напружень

Таблиця 3.1

Етапи зміни деформацій

Матеріал	№ ступені	Навантаження, кг	V, кг	M, кг·мм
Епоксидна смола	1	12	6	240
	2	19	9,5	380
	3	29	14,5	580
	4	42	21	840
	5	55	27,5	11000

Аналізуючи результати випробувань можна зробити висновок, що при послідовному навантаженні зразка ізохроми з'являються в найбільш навантажених точках і локалізуються біля вершини тріщини. У міру збільшення навантаження смуги з'являються на поверхні виробу і зсуваються в зону з найменшим рівнем напружень.

Смуга кожного кольору вказує положення точок з однаковою різницею головних напружень. В експерименті використовувалося монохроматичне світло, тому зображення являє собою чергування темних смуг - ізоклін, відповідних областям моделі, де площина поляризації збігається з напрямком одного з головних напружень. Крім ізоклін, на зображенні присутні нерухомі темні смуги, в яких різниця ходу дорівнює цілому числу світлових хвиль. Зі збільшенням навантаження картина смуг в моделі змінювалася, а їх кількість збільшувалася.

Таким чином, метод фотопружності дає можливість отримати картину розподілу максимальних дотичних і головних нормальних напружень в прозорих моделях. Використання додаткових способів обробки отриманих результатів дозволяє визначити всі компоненти поля напружень.

Була розглянута плоска задача про вигин балки. Вісь x_1 направили уздовж її вісі, вісь x_2 в ортогональному напрямку. При розгляді вигину балки були введені поняття перерізуючої сили і згинального моменту, при цьому вигин називається чистим, якщо момент M постійний по довжині, і перерізуюча сила, пов'язана з моментом диференціальним співвідношенням Журавського [34], відповідно дорівнює нулю.

Рішення задачі про вигин балки будувалося на основі двох гіпотез: гіпотези плоских перерізів, згідно з якою поперечні перерізи балки після деформації залишаються плоскими і ортогональними її зігнутої вісі, і гіпотези про те, що поздовжні волокна знаходяться в стані одновісного напруженого стану. З цих припущень випливало, що вісі x_1 і x_2 - головні вісі тензора напружень, його єдиною відмінною від нуля головною компонентою є σ_{11} , причому

$$\sigma_{11} = \frac{M}{J} x_2 \quad (3.1)$$

де $J = \frac{hb^3}{12}$ - момент інерції поперечного перерізу балки, b - її висота ($b = 3\text{см}$). При чистому згині наведені вище гіпотези, а, значить, і рівність (3.1) виконуються точно.

На рис. 3.1 зображена схема навантаження балки, середня ділянка якої знаходиться в умовах чистого згину, $M = \frac{P}{2}a$, ($a = 2\text{ см}$). У цій області напруження, обчислені за формулою (3.1), змінюються за лінійним законом.

Картина смуг балки представлена на рис. 3.3 ... 3.7. Цифри праворуч від схеми на рис. 3.8 вказують порядок смуги. Так як на лінії нульового порядку головні напруження збігаються, такою лінією в даній задачі, очевидно, є вісь балки: уздовж неї $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$. На рис.3.8 представлена епюра напружень, обчислених по основній формулі методу фотопружності

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_0^{(1,0)}}{h} m \quad (3.2)$$

Величини цих напружень для побудови епюри відкладені в масштабі на прямих, які продовжують смуги. Максимальна величина напружень σ_1 на контурі балки знаходиться екстраполяцією прямої, проведеної через експериментальні точки до перетину з лініями, що продовжують контур. Епюра знайдених з експерименту (в центральній частині балки) напружень σ_{11} підтверджує прямо пропорційну залежність σ_{11} від x_2 , отриману у формулі (3.1).

Як видно з рис. 3.8, в локальній області, що безпосередньо примикає до місця прикладання навантаження (ліва верхня частина фотографії смуг), розподіл напружень істотно відрізняється від маючого місце при чистому згині і визначається формулою (3.1). Розподіл напружень, що спостерігається далеко від цієї області, яке збігається з розподілом при чистому згині, наочно ілюструє принцип Сен-Венана, згідно з яким далеко від області прикладання навантаження напружений стан в пружному тілі визначається не конкретним способом прикладання зусиль, а тільки їх головним вектором і головним моментом. Два види прикладеної на краях балки навантаження: пара сил, що діє в експерименті, і розподіл напружень на торці, відповідне теоретичній формулі (3.1), - є, очевидно, статично еквівалентними при $M = \frac{P}{2} a$. Тому далеко від країв, відповідно до принципу Сен-Венана, напружений стан в цих двох випадках має збігатися, що і показує картина смуг. Згідно картини смуг можна також оцінити розмір області, всередині якої для знаходження напружень не можна замінювати навантаження на статично еквівалентне.

Прирівнюючи напруження, отримані з експерименту за формулою (3.2) і обчислені з теоретичної формули (3.1) при $M = \frac{P}{2} a$, знайдемо величину сили P , прикладеної до балки:

$$P = \frac{2J\sigma_0^{(1,0)}}{ha} \frac{m}{x_2} \quad (3.3)$$

У цій формулі m і x_2 потрібно брати, відповідні одній і тій же точці балки.

Проведені дослідження доводять, що ізохрами з'являються послідовно, ніколи не перетинаються і не зливаються одна з одною, вони завжди займають своє положення в строгій черговості.

Підкреслимо, що зразки з епоксидної смоли були моделями для залізобетонних балок, випробуваних малоцикловим навантаженням. У другому розділі ми вже відзначали, що за допомогою прозорих оптичних матеріалів, зокрема епоксидної смоли, існує можливість візуально відстежити локалізацію напружень і переміщень біля вершини тріщини, а також їх зміни при різних навантаженнях.

Як видно, на рис. 3.5 ... 3.7 відбувається локалізація напружень по похилій лінії від опори до сили в зоні дії головних напружень розтягу. зв'язку з неоднорідністю структури балки виникає мікроруйнування між різними зонами балки в зв'язку з різницею модулів пружності.

3.2 Визначення технологічної пошкодженості залізобетонних зразків-балок

Відомо, що залізобетонні балки, що є композиційним матеріалом володіють неоднорідною структурою.

Під пошкодженням в нашій роботі розуміється характер розподілу в матеріалі тріщин. У свою чергу, під тріщиною розуміється несутцільність в матеріалі, обмежена поверхнями (берегами), які замикаються в певному місці (гирлі).

Об'єктом нашого аналізу є тріщини, що виникли в період технологічної переробки матеріалу у виробі. Такі тріщини відносяться до технологічних (початкових, спадкових).

Перш за все, була визначена технологічна пошкодженість залізобетонних зразків згідно обраної методики.

Для визначення пошкодженості на зразках-балках була обрана лінія, яка перетинає балку в поперечному напрямку збоку (нормальний переріз)) і в зоні дії поперечної сили і згинального моменту (рис. 3.9).

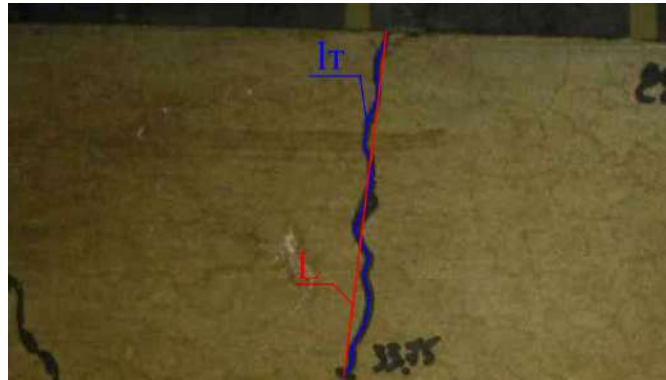


Рис.3.9 Методика визначення l_T і L

Значення результатів коефіцієнтів технологічної пошкодженості для зразків-балок зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнтів K_n для зразків-балок

Балка	L , мм	l_m , мм	K_n
A1	101,15	106,24	1,05
A2	101,12	107,23	1,06

3.3 Розвиток тріщин під навантаженням в залізобетонних зразках-балках

Аналіз руйнування моделей-балок із епоксидної смоли показав, що найбільший інтерес представляє розвиток тріщин під навантаженням з урахуванням технологічної пошкодженості і руйнування залізобетонних балок.

Тому було проведено випробування балок A_1 і A_2 з метою вивчення характеру їх руйнування.

Досліджувані балки завантажувалися ступенями по 500 кгс в 1/4 прольоту.

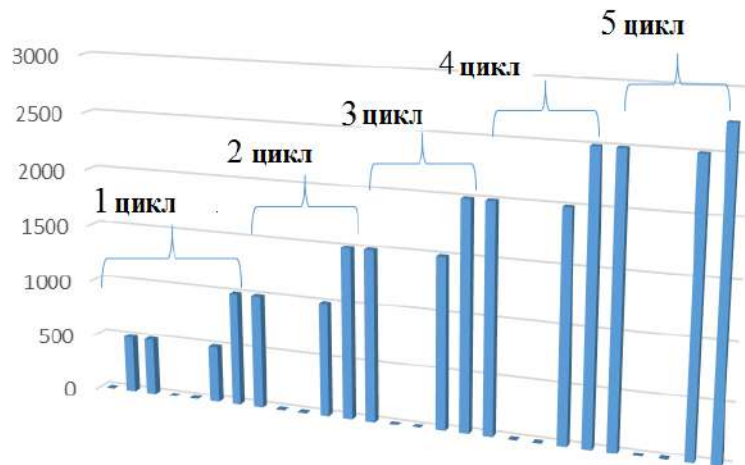


Рис. 3.10 Схема проведення випробування

Перші нормальні тріщини в балці з'явилися на третій ступені при навантаженні 1500 кгс - в місці прикладання навантаження і в розтягнутій зоні, довжиною, приблизно, від 25 до 40 мм (рис. 3.11). Також з'явилися незначні тріщини в середині прольоту, які розвивалися по траєкторії технологічних тріщин і були незначної довжини - до 10 мм. На четвертому циклі навантаження (2000 кгс) значних змін не відбулося - тріщина збільшилася в місці прикладання навантаження на 12 мм. При навантаженні в 2500 кгс (5 цикл) візуально визначено збільшення тріщини і ширини розкриття тріщин. На шостому циклі, за розрахунками навантаження повинно було скласти 3000 кгс, але останнє зафіксоване значення навантаження склало 2750 кгс, експеримент показав, що тріщини у верхній розтягнутій зоні збільшилися на 10 ... 25 мм. Однак при цьому розвиток по ширині розкриття не спостерігався, навпаки, в нижній стислій зоні в місці прикладання навантаження збільшилася тільки одна тріщина: перетнула весь переріз балки (19 см), ширина її розкриття склала близько 0,5 ... 0,8 мм.



Рис.3.11 Початкові тріщини

В результаті експерименту було зафіксовано, що руйнування балки відбулося в правій верхній зоні при навантаженні $F_U = 2750$ кгс з руйнуванням бетону стиснутої і розтягнутої зони (рис.3.13). При цьому в зразку відбувався розрив арматури, прослизання арматури в бетоні або роздроблення бетону стиснутої зони.



Рис. 3.12 Роздроблення бетону стиснутої зони



Рис. 3.13 Руйнування зразка при навантаженні 2750 кгс

Після руйнування балок проводилася фотофіксація характеру руйнування зразків (рис. 3.12, 3.13).

3.4 Деформування залізобетонних зразків-балок під дією малоциклового навантаження

На залізобетонні балки в трьох точках були встановлені індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм (див. розділ 2) для вимірювання прогинів в процесі навантажень.

Показання індикаторів знімалися на кожному циклі двічі - при подачі навантаження на балку і через 5 хвилин.

За результатами випробувань були отримані дані індикаторів годинникового типу I_1 , I_2 , I_3 , які представлені в таблиці 3.3. У таблиці 3.4 представлені показання тензометрів A істова.

За результатами випробувань побудовані графіки залежностей прогинів балки від навантаження, рис 3.14, 3.15, 3.16 і графік залишкових деформацій, рис. 3.17.

Так на рис. (3.14.) показаний графік деформування балки в перерізі 0,4 прольоту, в якому навантаження прикладалося в 1/4 прольоту циклами по 500 кгс.

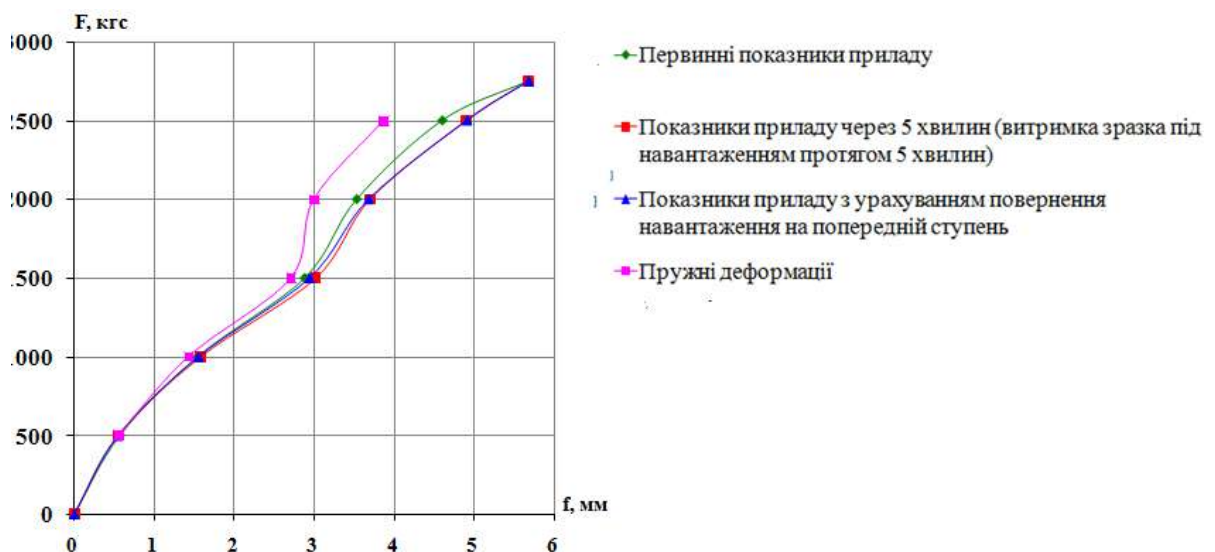


Рис 3.14 Графік залежності прогинів балки від навантаження в 0,4 прольоту балки

Слід зазначити, що за прогин балки прийнято переріз вузла, розташований в точці прикладання зосереджених сил. При руйнівному навантаженні (2750 кгс), коли жорсткість балок практично дорівнює нулю, встановлені значення прогинів, які відповідають: при первинних показниках приладу - 4,60 мм; для показників приладів через 5 хвилин - 4,90 мм, а з урахуванням повернення на попередній цикл - 4,91 мм. Пружні деформації при навантаженні 2500 кгс склали - 3,87 мм. Наголосимо, що при зміні навантаження від 500 кгс до 1500 кгс значення пружних деформацій і прогинів мають лінійну залежність.

Відповідно до цього графіка можна виділити три характерні ділянки для розтягуючої арматури:

- **I-а ділянка**, відповідає роботі елемента без тріщин, тобто з моменту завантаження зразка до моменту утворення тріщин в розтягнутих зонах бетону – при навантаженні 1500 кгс;
- **II-а ділянка** – з моменту утворення тріщин та сприйняття розтягуючих напружень арматурою – від навантаження 1500 кгс і до 2500 кгс;
- **III-я ділянка**, відповідає пластичній роботі прольотної арматури – від навантаження 2500 кгс до 2750 кгс.

Графік відображає, що при прикладанні навантаження від 0 кгс до 1500 кгс, бетон і арматура працюють сумісно. Відповідно до цього графіка можна визначити точку різкої зміни значень пружних деформацій і прогинів, які починаються при навантаженні, що дорівнює 1500 кгс, де арматура і бетон працюють незалежно один від одного.

На рис.3.15, показаний графік деформування балки в перерізі 0,5 прольоту, навантаження прикладалися в 1/4 прольоту циклами по 500 кгс.

При значеннях руйнівного навантаження, в момент, коли жорсткість балок практично дорівнює нулю, встановлені значення прогинів, які відповідають: при первинних показниках приладу - 5,1 мм; для показників приладів через 5 хвилин - 5,38 мм, а з урахуванням повернення на попередній цикл - 5,41 мм. Пружні деформації при навантаженні 2500 кгс склали - 4,09 мм.

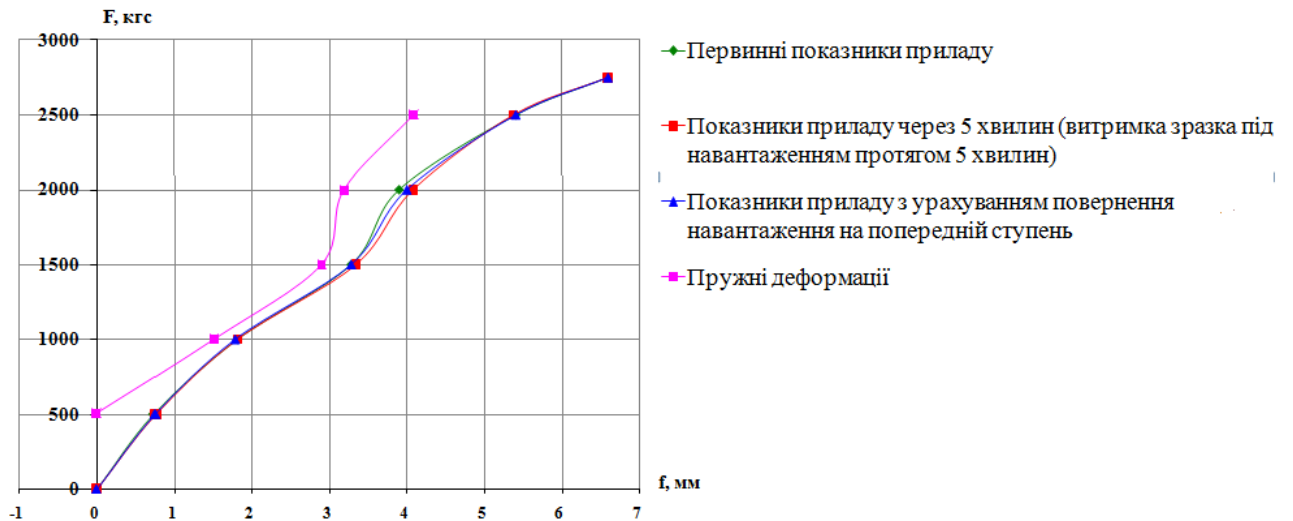


Рис 3.15 Графік залежності прогинів балки від навантаження в 0,5 прольоту балки

Відповідно до цього графіка можна виділити три характерних ділянки для розтягуючих арматур:

- **I-а ділянка**, відповідає роботі елемента без тріщин, тобто з моменту завантаження до моменту утворення тріщин у розтягнутих зонах бетону при навантаженні 1500 кгс;
- **II-а ділянка**, з моменту утворення тріщин до моменту, коли в розтягнутій арматурі прогонових перерізів починають наростати непружні деформації від навантаження 1500 кгс і до 2500 кгс;
- **III-я ділянка**, від 2500 кгс до 2750 кгс, що відповідає пластичній роботі прольотної арматури.

Графік відображає, що при прикладанні навантаження від 0 кгс до 1500 кгс, бетон і арматура працюють спільно. Відповідно до цього графіка можна визначити точку його різкого перегину зі зменшенням жорсткості балки, точка перегину дорівнює 1500 кгс.

На рис.3.16, показаний графік деформування балки в перерізі 0,6 прольоту, навантаження прикладалася в 1/4 прольоту при навантаженні циклами по 500 кгс.

При значеннях руйнівного навантаження, в момент, коли жорсткість балок практично дорівнює нулю, встановлені значення прогинів, які відповідають: при первинних показниках приладу - 5,05 мм; для показників приладів через 5 хвилин - 5,35 мм, а з урахуванням повернення на попередній цикл - 5,41 мм. Пружні деформації при навантаженні 2500 кгс склали - 3,96 мм.

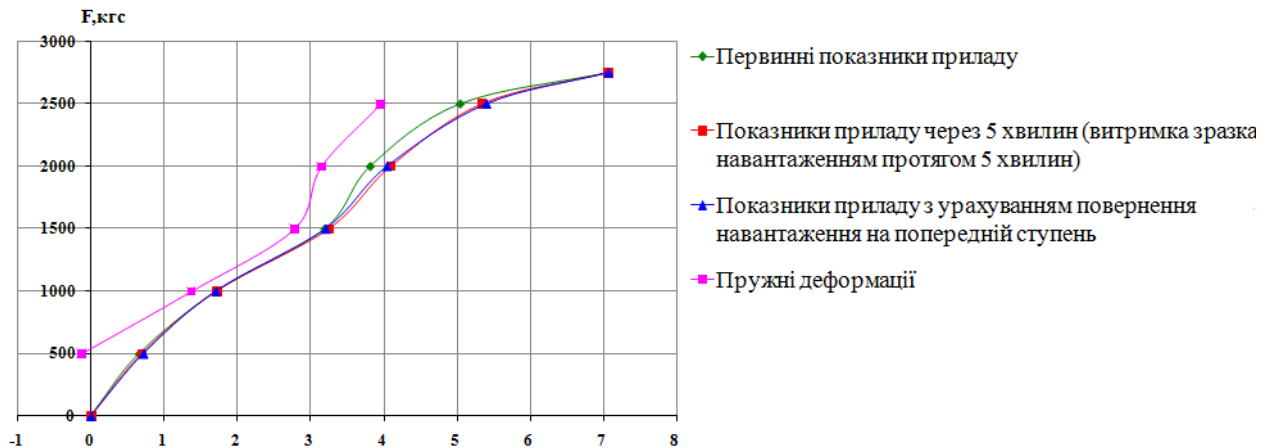


Рис 3.16 Графік залежності прогинів балки від навантаження в 0,6 прольоту балки

Відповідно до графіка, рис. 3.16, можна виділити три характерних ділянки для розтягуючих арматур:

➤ **I-а ділянка**, відповідає роботі елемента без тріщин, тобто з моменту завантаження до моменту утворення тріщин у розтягнутих зонах бетону при навантаженні 1500 кгс;

➤ **II-а ділянка**, з моменту утворення тріщин до моменту, коли в розтягнутій арматурі прогонових перерізів починають наростати непружні деформації від навантаження 1500 кгс і до 2500 кгс;

➤ **III-я ділянка**, від 2500 кгс до 2750 кгс, що відповідає пластичній роботі прольотної арматури.

Графік відображає, що при навантаженні від 0 кгс до 1500 кгс, бетон і арматура працюють сумісно. Відповідно до цього графіка можна визначити точку його різкого перегину зі зменшенням жорсткості балки, точка перегину дорівнює 1500 кгс.

Також був побудований графік залишкових деформацій по показникам трьох індикаторів годинникового типу, рис. 3.17.

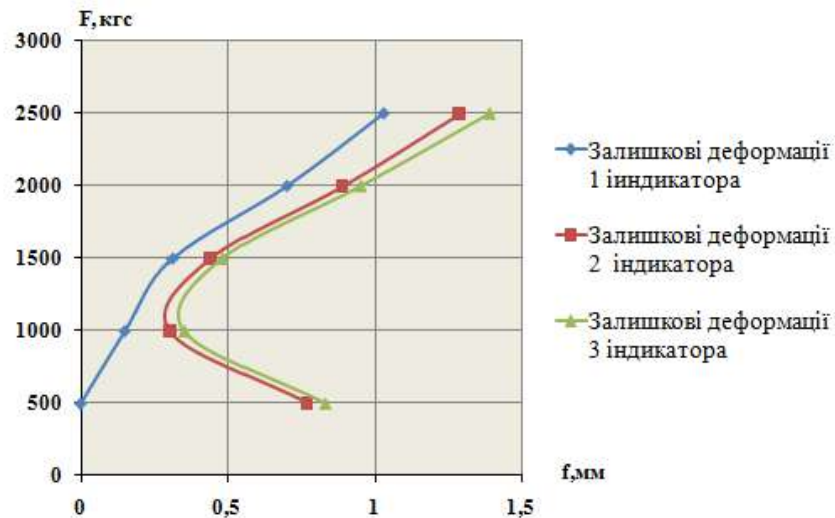


Рис 3.17 Графік залишкових деформацій

Графік відображає, що зі збільшенням навантаження, залишкові деформації збільшуються. Залишкові деформації першого індикатора склали - 1,03 мм при максимальному навантаженні в 2750 кгс. Залишкові деформації другого індикатора склали - 1,29 мм при максимальному навантаженні в 2750 кгс. Залишкові деформації третього індикатора склали - 1,39 мм при максимальному навантаженні в 2750 кгс. Відповідно до цього графіка можна визначити точку його різкого перегину, що з'явилася при навантаженні 1500 кгс.

Зміни всіх графіків відбувалися в інтервалі від 1500 кгс і до 2500 кгс. Це свідчить про те, що перші тріщини з'явилися при навантаженні 1500 кгс і розвивалися до руйнівного навантаження в 2750 кгс.

Таблиця 3.3

Показники індикаторів годинникового типу

№ цикла	Навантаження F, кгс	Індикатор годинникового типу, u=0.01 мм														
		I1					I2					I3				
		відлік	різниця n1	f1=n1·u, мм	залишкові деформації	пружні деформації	відлік	різниця n1	f1=n1·u, мм	Залишкові деформації	Пружні деформації	відлік	різниця n1	f1=n1·u, мм	залишкові деформації	пружні деформації
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	0		0			0		0			0		0		
1	500	57	57	0,57			73	73	0,73			66	66	0,66		
	500	55	55	0,55			76	76	0,76			70	70	0,7		
	0	0	0	0			65	65	0,65			10	10	0,1		
	0	0	0	0	0	0,55	77	77	0,77	0,77	-0,01	83	83	0,83	0,83	-0,13
	500	55	55	0,55			75	75	0,75			72	72	0,72		
2	1000	154	154	1,54			181	181	1,81			172	172	1,72		
	1000	158	158	1,58			181	181	1,81			172	172	1,72		
	0	18	18	0,18			33	33	0,33			38	38	0,38		
	0	0	0	0	0	0,18	7	7	0,07	0,07	1, 74	3	3	0,03	0,03	1,69
	1000	155	155	1,55			178	178	1,78			171	171	1,71		
3	1500	288	288	2,88			328	328	3,28			320	320	3,2		
	1500	302	302	3,02			334	334	3,34			326	326	3,26		
	0	37	37	0,37			47	47	0,47			51	51	0,51		
	0	0	0	0	0	3,02	0	0	0	0	3,34	0	0	0	0	3,26

Продовження таблиці 3.3

	1500	294	294	2,94			328	328	3,28			321	321	3,21		
4	2000	353	353	3,53	0,7	3	390	390	3,9	0,89	3,19	382	382	3,82	0,95	3,15
	2000	370	370	3,7			408	408	4,08			410	410	4,1		
	0	77	77	0,77			97	97	0,97			100	100	1		
	0	70	70	0,7			89	89	0,89			95	95	0,95		
	2000	368	368	3,68			400	400	4			405	405	4,05		
5	2500	460	460	4,6	1,03	3,87	510	510	5,1	1,29	4,09	505	505	5,05	1,39	3,96
	2500	490	490	4,9			538	538	5,38			535	535	5,35		
	0	105	105	1,05			129	129	1,29			140	140	1,4		
	0	130	130	1,03			129	129	1,29			139	139	1,39		

Таблиця 3.4

Показники тензометрів Аістова

Навантаження F, Кгс	$\varepsilon_b=(\varepsilon_1+\varepsilon_5)/2$	$\varepsilon_s=(\varepsilon_8+\varepsilon_4)/2$	$\varepsilon_{s2}=(\varepsilon_3+\varepsilon_7)/2$	$\varepsilon_{s3}=(\varepsilon_2+\varepsilon_6)/2$
1	2	3	4	5
	0	0	0	0
500	0,000568	5,8E-05	0,00018	0,00001
500	0,001255	-0,0003	-0,0005	5,3E-05
0	0,000325	0,00023	-0,0003	2,5E-06
0	0,00029	0,0002	0,00011	0,00013
500	-0,00001	0,00031	0,00015	5,5E-05
1000	0,0007	-2E-05	2,5E-05	0,00009
1000	0,001028	-0,0003	-0,0003	0,00008
0	0,000458	-7E-05	0,00016	8,3E-05
0	0,00029	0,0002	0,00011	0,00013
1000	-5,3E-05	0,00031	0,00032	0,00014
1500	0,00165	-0,0003	0	5,5E-05
1500	-4,8E-05	8,5E-05	-0,0002	-0,00015
0	0,001078	-0,0003	-0,0004	-5,8E-05
0	0,000325	0,00023	-0,0003	2,5E-06
1500	0,001048	-0,0003	-0,0001	-0,00022
2000	0,000218	0,00024	0,00025	1,8E-05
2000	-0,00001	0,00031	-3E-05	5,5E-05
0	0,001255	-0,0003	-4E-05	5,3E-05
0	-7,3E-05	0,00031	0,00025	0,00014
2000	0,001028	-0,0003	-0,0003	0,00008
2500	0,00029	0,0002	0,00011	0,00013
2500	-5,3E-05	0,00031	0,00032	0,00014
0	0,001455	-0,0004	-0,0006	7,8E-05
0	-8,5E-05	0,00032	0,00032	0,00014
2750	0,000865	0,00003	-0,0003	-0,00033
0	0,00075	-0,0002	-0,0002	6,3E-05

3.5 Визначення глибини технологічної тріщини в залізобетонних зразках-балках ультразвуковим методом

На балках для вимірювання глибини тріщини, що виникали в процесі навантажень, були встановлені датчики ультразвукового приладу УК-14П. Місця встановлення датчиків були попередньо змазані вазеліном для кращого проходження ультразвукових хвиль. Показання датчиків знімалися на кожному циклі двічі - після прикладання навантаження і після витримки випробовуваних балок під навантаженням через 5 хвилин.

За допомогою приладу Ук-14П було зафіксовано наявність технологічної пошкодженості у випробовуваних залізобетонних балках, а також визначена глибина технологічної тріщини. До прикладання навантаження на зразок були встановлені датчики ультразвукового приладу - в результаті прозвучування балки виявлено: глибина технологічної тріщини склала 8,6 мм. Результати вимірювань представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Розрахунок глибини технологічної тріщини в залізобетонному зразку-балці

Показники	УК-14П
База вимірювання на чистому бетоні (без дефектів), $a=1$, мм	200
Час розповсюдження повздовжньої хвилі, мкс:	-
t_1 (положення датчиків I-П1)	54
t_a (положення датчиків I-П2)	53,8
Розрахункова глибина технологічної тріщини $h_{тр}$, мм	8,6

Дані щодо розвитку силової тріщини, яка розвивалась із технологічної, під навантаженням, відображені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Розрахунок глибини силової тріщини, яка розвивалась із технологічної,
під навантаженням в залізобетонному зразку-балці

Навантаження, F, кгс	Показники приладу Ук-14П, мкс	Висота тріщини, мм	
0	<i>Вимірювання на чистому бетоні (положення датчика I-П1)</i>	$t_1=54,0$	8,6
0	<i>Вимірювання на чистому бетоні (положення датчика I-П2)</i>	$t_a=53,8$	-
500	Подача навантаження на зразок	$t_1=66,1$	70,59443
500	Витримка зразка під навантаженням протягом 5 хвилин	$t_1=65,8$	69,62667
0	Скидання навантаження	$t_1=54,0$	8,6
0	Через 5 хвилин після скидання навантаження	$t_1=54,0$	8,6
500	Повернення навантаження на попередній цикл	$t_1=66,1$	70,59443
1000	Збільшення навантаження до 1000 кгс	$t_1=66,3$	71,2347
1000	Через 5 хвилин після збільшення навантаження (витримка зразка під навантаженням)	$t_1=66,3$	71,2347
0	Скидання навантаження	$t_1=55,0$	19,3339
0	Через 5 хвилин після скидання навантаження	$t_1=55,0$	19,3339
1000	Повернення навантаження на попередній цикл	$t_1=66,3$	71,2347
1500	Збільшення навантаження до 1500 кгс	$t_1=67,4$	74,69095
1500	Через 5 хвилин після збільшення навантаження (витримка зразка під навантаженням)	$t_1=67,4$	74,69095
0	Скидання навантаження	$t_1=56,0$	27,4674
0	Через 5 хвилин після скидання навантаження	$t_1=55,6$	24,52288
1500	Повернення навантаження на попередній цикл	$t_1=68,6$	78,348
2000	Збільшення навантаження до 2000 кгс	$t_1=68,8$	78,94712
2000	Через 5 хвилин після збільшення навантаження (витримка зразка під навантаженням)	$t_1=69,3$	80,43286
0	Скидання навантаження	$t_1=57,0$	33,79313
0	Через 5 хвилин після скидання навантаження	$t_1=56,7$	32,01562
2000	Повернення навантаження на попередній цикл	$t_1=70,0$	82,4854
2500	Збільшення навантаження до 2000 кгс	$t_1=70,8$	84,7946
2500	Через 5 хвилин після збільшення навантаження (витримка зразка під навантаженням)	$t_1=70,9$	85,08065
0	Скидання навантаження	$t_1=57,1$	34,3672
0	Через 5 хвилин після скидання навантаження	$t_1=57,1$	34,3672
2500	Повернення навантаження на попередній цикл	$t_1=71,8$	87,63076
2750	Руйнування балки	$t_1=72,8$	90,4159

За результатами досліджень побудовані графіки залежності глибини тріщини від малоциклових навантажень (рис. 3.19 ... 3.21). В процесі випробувань визначено закриття тріщин при знятті навантаження і їх розкриття при подальшому навантаженні зразка, рис. 3.18.

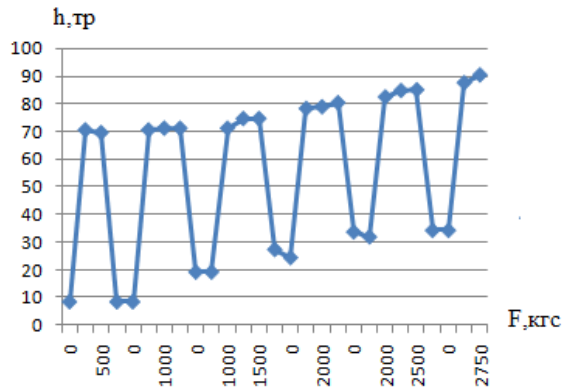


Рис.3.18 Залежність глибини тріщини від малоциклових навантажень

Графік ілюструє, що навантаження подавалося циклами, рис.3.18.

Навантаження першої ступені склали 500 кгс. Кожний наступний цикл збільшувався на 500 кгс від попереднього.

Особливість експерименту полягала в тому, що після кожного етапу навантаження зразок навантаження скидали до нуля, потім через 5 хвилин повертали на той же рівень, після чого збільшували на 500 кгс і витримували зразок протягом 5 хвилин під новим навантаженням. Таких етапів в експерименті було 5.

Нижче наведено опис розвитку глибини тріщини під навантаженням.

При початковому навантаженні, в 500 кгс, глибина тріщини склали 70,59 мм, а через 5 хвилин величина глибини тріщини склали 69,63 мм.

Далі навантаження зняли до нуля і знову зафіксували показання. Графік ілюструє (рис.3.18), що при навантаженні в 500 кгс повторно через 5 хвилин, глибина тріщини не змінилася.

Перед тим, як збільшити навантаження на зразок, поверталися на попередній ступінь в 500 кгс, зняли показники (70,59 мм), після чого збільшили навантаження до 1000 кгс, зняли наступні показники (71,23 мм) і після ви-

тримки 5 хвилин показання залишилися без зміни (71,23 мм). Після цього знову скинули навантаження до нуля, зняли нульові показання. За графіком можна визначити, що глибина тріщини стала рости при збільшенні навантаження, а скинувши навантаження до нуля помітно, що тріщина не повністю закрилася, її глибина склала 19,34 мм.

Далі, аналогічно попередньому етапу випробування - повернули навантаження на попередній цикл в 1000 кгс (71,23 мм), потім збільшили навантаження до 1500 кгс (74,69 мм). За показниками видно явне збільшення глибини тріщини, що свідчить про те, що бетон і арматура перестали працювати спільно. Скинувши навантаження і знявши первинні показання (24,47 мм) і показання після витримки (24,46 мм), видно, що тріщини продовжують закриватися.

Після відновлення навантаження на попередній цикл (1500 кгс) глибина тріщини продовжила збільшуватися (78,35 мм). Збільшивши навантаження до 2000 кгс, тріщина почала збільшуватися (первинна глибина тріщини - 78,95 мм, після витримки зразка під навантаженням - 80,43 мм). Скинувши навантаження до нуля тріщина знову почала закриватися (первинна глибина тріщини - 33,79 мм, після витримки - 32,02 мм).

Потім повернули навантаження на попередній цикл - 2000 кгс (82,49 мм), після чого - збільшили навантаження на балку до 2500 кгс, зняли показання (первинна глибина тріщини - 84,79 мм, після витримки - 85,08 мм) і скинули до нуля (34,37 мм).

Повернувшись на попередній цикл 2500 кгс (87,63 мм), експериментально необхідно було прикласти навантаження в 3000 кгс, згідно розрахунку, але при збільшенні навантаження до 2750 кгс (90,42 мм) сталося руйнування балки. Було зафіксовано, що зі збільшенням навантаження глибина тріщини продовжувала збільшуватися, навіть в стані спокою.

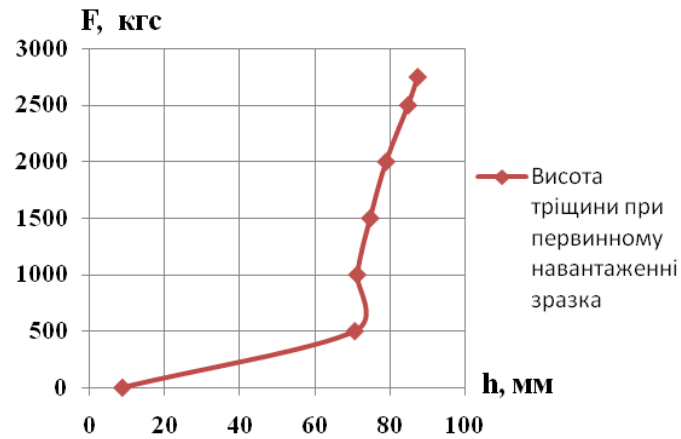


Рис. 3.19 Залежність висоти тріщини від навантаження при первинному навантаженні залізобетонного зразка-балки

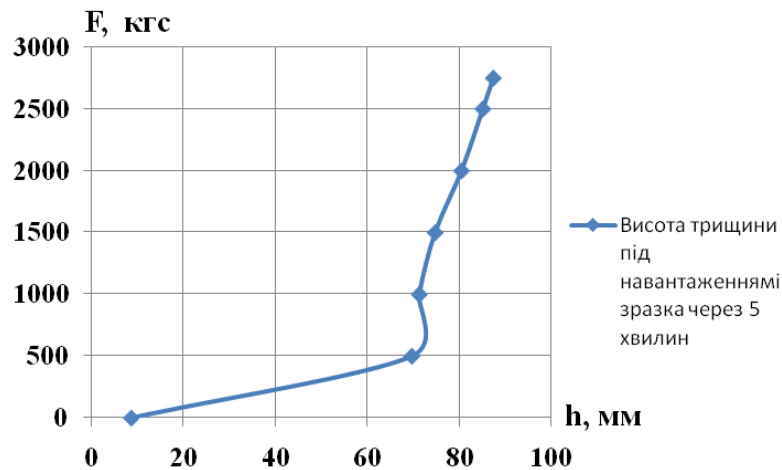


Рис. 3.20 Залежність висоти тріщини від навантаження при навантаженні залізобетонного зразка-балки через 5 хвилин

Аналізуючи отримані результати випробування на початку і в кінці кожного циклу (через 5 хвилин), можна зробити висновок, що глибина тріщини збільшувалася на кожному циклі протягом 5 хвилин, про що свідчить нижче наведений графік, рис 3.21.

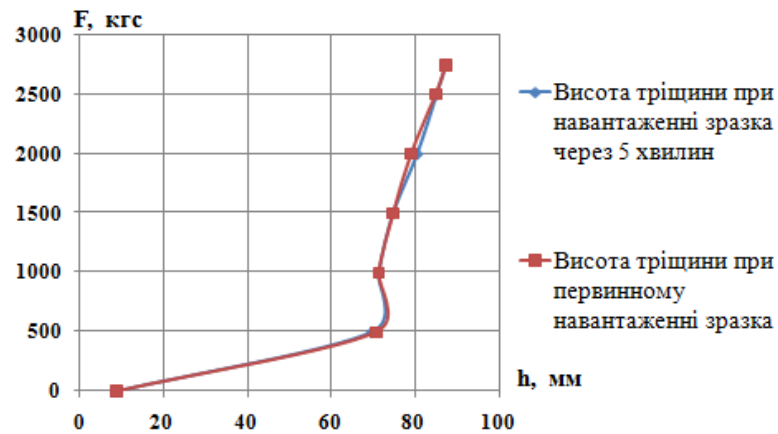


Рис. 3.21 Сумісний графік залежності тріщини, що розвивалась під навантаженням

Графік відображає, що при навантаженні від 1500 кгс до 2500 кгс глибина тріщини продовжувала збільшуватися протягом часу. Це свідчить про те, що тріщини навіть в стані спокою продовжують рости.

Таким чином, характер тріщиноутворення і розвитку тріщин від дії зовнішнього навантаження відбувається по траєкторії технологічних тріщин в зоні дії максимального згинального моменту. Силова тріщина проходить по енергетично вигідному шляху. Ширина розкриття технологічних тріщин склала 0,005 ... 0,3 мм, на що звернуто увагу в роботі, а глибина тріщини в зоні розтягнутої робочої арматури склала 5,0 ... 8,0 мм. Велику глибину технологічних тріщин в захисному шарі бетону можна пояснити впливом усадочних деформацій, тим більше, що дослідні зразки випробовувалися у віці 205, 225 днів.

Перед руйнуванням балок розвиток вертикальних тріщин припинявся, критична тріщина почала перетинати блоки, і почалося дроблення стиснутої зони бетону. При цьому, в обох досліджених зразках з'явилася похила тріщина, що проходила від опори до сили. Це можна пояснити впливом поперечних сил на характер руйнування.

Таким чином, наявність технологічних тріщин в конструкціях істотно впливає на характер утворення і розкриття тріщин від дії експлуатаційних

навантажень, і, в кінцевому рахунку, визначає роботу матеріалів в конструкціях: деформативність, утворення тріщин і характер руйнування.

3.6 Врахування роботи розтягнутого бетону над тріщинами

Аналізуючи вище сказане, а також експерименти виконані Я.М. Немировським, який досліджував НДС залізобетонних елементів з урахуванням роботи розтягнутого бетону над тріщинами можна говорити про те, що епюра напружень в бетоні є двозначною, тобто що в перерізах з тріщинами є не тільки стисла, але і розтягнута зона бетону. Ефект роботи розтягнутої зони бетону над тріщинами в згинальному залізобетонному елементі наведено на рис 3.22.

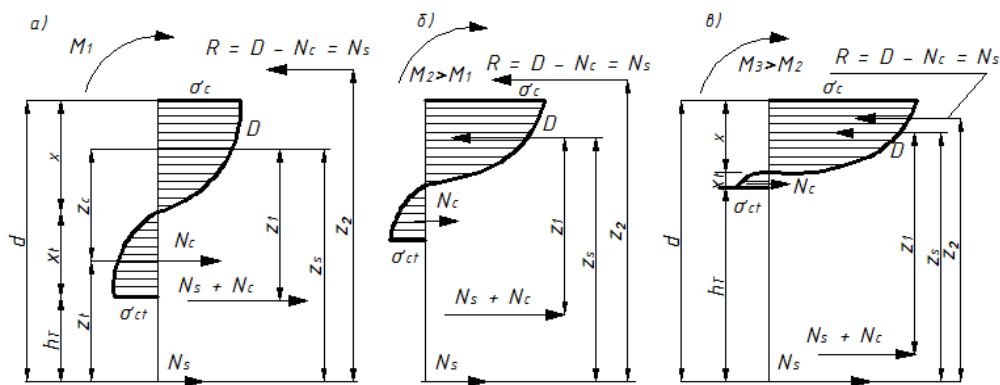


Рис. 3.22 Ефект роботи розтягнутої зони бетону над тріщинами в звичайному згинальному залізобетонному елементі

- а) поява тріщин; б) процес утворення тріщин;
- в) стабілізація процесу тріщиноутворення

Автор доводить, що при неврахуванні роботи розтягнутого бетону над тріщинами після появи тріщин в згинальному або позацентрово навантаженому елементі відбувається збільшення напружень в арматурі в перерізах з тріщинами. Це нібито викликає вимикання бетону над тріщинами з роботи, а також призводить до спотворення коефіцієнта ψ_s , що характеризує роботу бетону розтягнутої зони між тріщинами.

За отриманими даними можна сформувати принципову схему змін коефіцієнта ψ_s : спочатку він близький до одиниці, тому що зв'язок арматури і бетону на ділянках між тріщинами майже повністю зберігається, а в кінці навантаження коефіцієнт ψ_s наближається до одиниці через майже повне виключення бетону між тріщинами з роботи внаслідок порушення зв'язку його з арматурою при настанні її плинності.

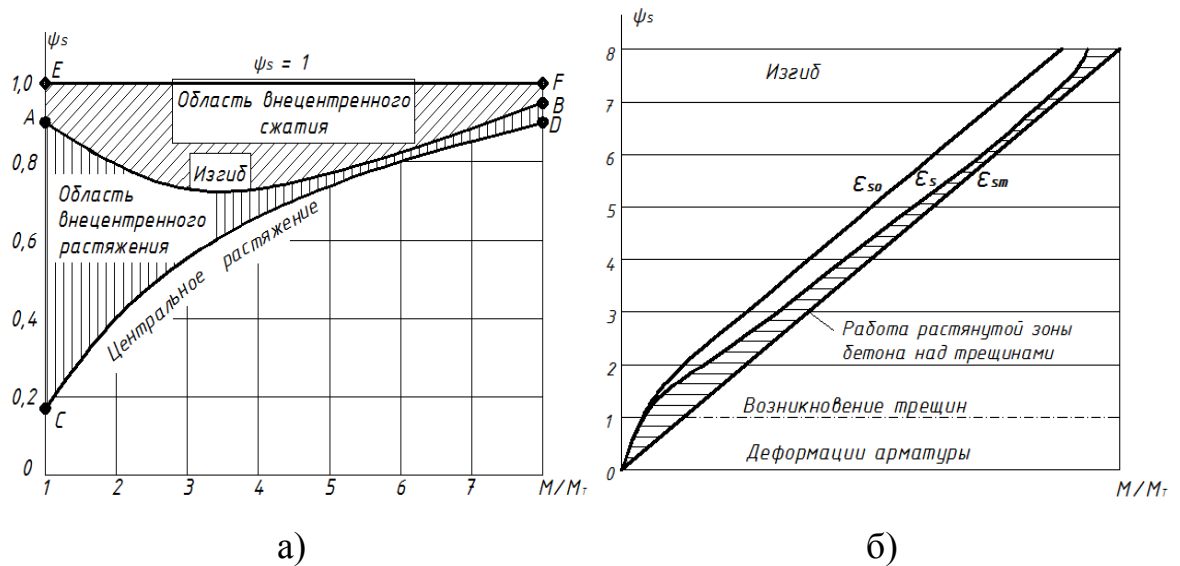


Рис. 3.23 Принципова схема зміни коефіцієнта ψ_s в залізобетонних елементах при різних впливах

а) зміна коефіцієнта ψ_s при згині (AB), центральному розтягу (CD), позацинтровому розтягу (область, обмежена кривими AB і CD) і позацинтровому стисканні (область, обмежена кривими AB і EF) в залежності від M/M_T ; б) зміна деформацій ϵ_{so} , ϵ_s , ϵ_{sm} , при згині в залежності від M/M_T .

Таким чином, епюра напружень в бетоні є двозначною, тобто в перерізах з тріщинами є не тільки стисла, але і розтягнута зона бетону. Неврахування роботи розтягнутого бетону над тріщинами призводить до спотворення коефіцієнта ψ_s , що характеризує роботу розтягнутої зони між тріщинами.

3.7. Список використаних джерел у розділі 3

У розділі 3 використано [34] літературне джерело. Його найменування наведено в загальному списку використаних джерел.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3:

1. Запропонована модель, яка дозволить встановити характер розподілу напружень та утворення тріщин в згинальних елементах. Методом фотопружності отримана картина розподілу максимальних дотичних і головних нормальних напружень в прозорих моделях - зразках. На підставі проведеного експерименту підтверджено, що при послідовному навантаженні моделі-зразка ізохроми спочатку з'являються в найбільш перевантажених і недо-вантажених перерізах.

2. Експериментально доведено, що методи неруйнівного контролю, не змінюючи якості, параметрів і характеристик виробу, дозволяють за непря-мими ознаками виявити приховані дефекти.

3. Отримана модель визначення глибини технологічних тріщин в зги-нальних елементах до прикладання навантаження. Знайдена глибина техно-логічної тріщини, величина якої - 8,6 мм. Запропонована модель дала можли-вість удосконалити методику визначення технологічної пошкодженості. Це дає можливість прогнозувати появу силової тріщини в згинальних елементах та ріст похилої тріщини в зоні сумісної дії моменту та поперечної сили, а та-кож прогнозувати зчеплення старого бетону з новим під час реконструкції портових споруд, адгезію, нормальні та дотичні напруження у зоні контакту.

4. Глибина технологічних та силових тріщин, що виходили на поверх-ню випробуваних зразків, коливалася у межах 8..87 мм при товщині захис-ного шару 10 мм. Характер поширення силових тріщин повторює "рисунок" технологічних тріщин, які проходять по енергетично вигідному шляху, і при-зупиняють розвиток в стислій зоні у зв'язку з впливом поперечних сил.

5. Запропоновані моделі розвитку тріщин на мікро- та макрорівнях пі-сля прикладання зовнішніх навантажень дозволяють врахувати підростання технологічних тріщин і їх вплив на деформативність і довговічність констру-кцій.

6. Експериментально встановлено, що залишкові деформації зі збіль-шенням навантаження підростають до 0,3 від руйнівного навантаження.

РОЗДІЛ 4
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПИСУ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ БАЛОК

4.1. Асимптотичне рішення задачі про зростання тріщини в середовищі з пошкодженням

Тріщина починає розвиватися зазделегідь до повного руйнування, вона виникає і навіть розповсюджується до вичерпання конструкцією своєї несучої здатності. Тому володіння законами розповсюдження тріщини нормального відриву та їх використання дозволяє прогнозувати несучу здатність конструкції.

Для дослідження напружень та переміщень у лінійно пружних тілах нині широке застосування має метод розкладання за власними функціями [79].

Цей метод заслуговує, щоб акцентувати на ньому увагу в лінійному випадку. Скористаємося методом розкладання за власними функціями та проаналізуємо напружено-деформований стан біля вершини тріщини нормального відриву.

Приведемо асимптотичне рішення задачі про зростання тріщини в балці А1 (в середовищі з пошкодженням), що ґрунтується на двочленних асимптотичних розкладаннях функції напружень $E\epsilon_1$ і параметра суцільності біля вершини тріщини в реалізації плоского напруженого стану:

$$\chi(r, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k r^{\lambda_k + 2} f_k(\theta), \quad (4.1)$$

$$\psi(r, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k r^{\mu_k} g_k(\theta). \quad (4.2)$$

де $f_k(\theta)$, $g_k(\theta)$. $k=0,1,\dots$, – кутові розподіли асимптотичних розкладань функції напружень $E\epsilon_1$ та параметра суцільності ψ ; α_k , β_k – масштабні (ам-

плітудні) множники, залежні від геометрії зразка та системи прикладених навантажень; λ_k , μ_k – показники мір асимптотичних розкладань, що підлягають визначенню.

Під дією циклічних навантажень у результаті циклічних пластичних деформацій можуть утворюватися тріщини [96, 97]. Навіть, якщо номінальне напруження набагато нижче межі пружності, локальне напруження внаслідок наявності концентрацій напруження на включеннях або механічних ушкодженнях може бути вищим за межу плинності, тобто пластичні деформації утворюються локально.

Відмітимо, що вивчення зростання тріщини та оцінка життєздатності конструкції, в якій може утворитися та рости тріщина, є актуальним завданням сучасної механіки твердого тіла, що деформується [98, 99] та вимагає залучення математично розвинених методів, здатних привести до аналітичних результатів, до рішень в замкнутій формі.

Нижче описано результат аналітичного рішення задачі про зростання тріщини в балці A1, в пошкодженому середовищі: знайдені аналітичні залежності для кутових розподілів коефіцієнтів асимптотичних розкладань компонент тензора напруження $\sigma_{ij}^{(1)}(\theta)$ та параметра суцільності $g_1(\theta)$.

Грунтуючись на класичних гіпотезах континуальної механіки пошкодженості [98, 100], можна прийняти, що накопичення розсіяних ушкоджень описується скалярним параметром ψ , еволюційне рівняння для якого постулювало степенний закон накопичення пошкоджень [99] (4.3):

$$\frac{d\psi}{dN} = \begin{cases} -c\sigma_e^m\psi^{-n}, & (\sigma_e \geq \sigma_{th}\psi^\gamma) \\ 0, & (\sigma_e < \sigma_{th}\psi^\gamma) \end{cases} \quad (4.3)$$

де N - число циклів навантаження; c , m , n , γ та σ_{th} – додатні постійні матеріалу, що визначаються експериментально;

$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{rr}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2 + \sigma_{rr}\sigma_{\theta\theta} + 3\sigma_{r\theta}^2}$ – інтенсивність дотичного напруження у разі плоского напруженого стану.

У двовимірній постановці задачі зручно звернутися до функції напруження $E\varepsilon_i$, що пов'язане з компонентами тензора напруження співвідношен-

нями (4.4):

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2}, \quad \sigma_{rr} = \Delta \chi - \sigma_{\theta\theta}, \quad \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} \right). \quad (4.4)$$

Двочленне асимптотичне представлення функції напруги E_{pi} та параметра суцільності в області, що оточує вершину тріщини ($r \rightarrow 0$) (де формується область активного накопичення ушкоджень і параметр суцільності еволюціонує відповідно до (4.3)) розшукуються у формі (4.5) та (4.6) :

$$\chi(r, \theta) = \alpha_0 r^{\lambda_0+2} f_0(\theta) + \alpha_1 r^{\lambda_1+2} f_1(\theta) + \dots, \quad (4.5)$$

$$\psi(r, \theta) = \beta_0 r^{\mu_0} g_0(\theta) + \beta_1 r^{\mu_1} g_1(\theta) + \dots \quad (4.6)$$

Двочленні асимптотичні розкладання компонент тензора напруги у безпосередній області, що оточує вершину тріщини в силу (4) та (5) мають таку структуру (4.7):

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \alpha_0 r^{\lambda_0} \sigma_{ij}^{(0)}(\theta) + \alpha_1 r^{\lambda_1} \sigma_{ij}^{(1)}(\theta) + \dots \quad (4.7)$$

Структура асимптотичних розкладань компонент тензора деформацій в області, що оточує вершину тріщини, задається співвідношеннями (4.8):

$$\begin{aligned} 1. \quad \varepsilon_{\theta\theta}(r, \theta) &= \frac{\alpha_0}{E\beta_0} r^{\lambda_0-\mu_0} \varepsilon_{\theta\theta}^{(0)}(\theta) + \frac{\alpha_1}{E\beta_0} r^{\lambda_1-\mu_0} \varepsilon_{\theta\theta}^{(1)}(\theta) + \dots, \\ 2. \quad \varepsilon_{rr}(r, \theta) &= \frac{\alpha_0}{E\beta_0} r^{\lambda_0-\mu_0} \varepsilon_{rr}^{(0)}(\theta) + \frac{\alpha_1}{E\beta_0} r^{\lambda_1-\mu_0} \varepsilon_{rr}^{(1)}(\theta) + \dots, \\ 3. \quad \varepsilon_{r\theta}(r, \theta) &= \frac{1+\nu}{E} \frac{\alpha_0}{\beta_0} r^{\lambda_0-\mu_0} \varepsilon_{r\theta}^{(0)}(\theta) + \frac{1+\nu}{E} \frac{\alpha_1}{\beta_0} r^{\lambda_1-\mu_0} \varepsilon_{r\theta}^{(1)}(\theta) + \dots, \end{aligned} \quad (4.8)$$

де функція $\varepsilon_{ij}^{(k)}(\theta)$, $k=0,1$ визначається формулами (4.9):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta\theta}^{(0)}(\theta) &= \left(\sigma_{\theta\theta}^{(0)} - \nu \sigma_{rr}^{(0)} \right) (g_0)^{-1}, & \varepsilon_{rr}^{(0)}(\theta) &= \left(\sigma_{rr}^{(0)} - \nu \sigma_{\theta\theta}^{(0)} \right) (g_0)^{-1}, \\ \varepsilon_{r\theta}^{(0)}(\theta) &= \sigma_{r\theta}^{(0)} (g_0)^{-1}, \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(1)}(\theta) &= \frac{\theta_{\theta\theta}^{(1)} - \nu \sigma_{rr}^{(1)}}{g_0} - \frac{g_1}{g_0^2} \left[\sigma_{\theta\theta}^{(0)} - \nu \sigma_{rr}^{(0)} \right], \\ \varepsilon_{rr}^{(1)}(\theta) &= \frac{\sigma_{rr}^{(1)} - \nu \sigma_{\theta\theta}^{(1)}}{g_0} - \frac{g_1}{g_0^2} \left[\sigma_{rr}^{(0)} - \nu \sigma_{\theta\theta}^{(0)} \right], & \varepsilon_{r\theta}^{(1)} &= \frac{\sigma_{r\theta}^{(1)}}{g_0} - \frac{g_1}{g_0^2} \sigma_{r\theta}^{(0)}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Підстановка (4.8) в умову спільності деформацій (4.10):

$$2 \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varepsilon_{r\theta}}{\partial \theta} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{rr}}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial \varepsilon_{r\theta}}{\partial r} + r \frac{\partial^2 (r \varepsilon_{\theta\theta})}{\partial r^2} \quad (4.10)$$

та виділення коефіцієнтів при однакових степенях r приводять до системи нелінійних звичайних диференціальних рівнянь (4.11), (4.12):

$$2(1+\nu)(\lambda_0 - \mu_0 + 1) \frac{d\varepsilon_{r\theta}^{(0)}}{d\theta} = \frac{d^2 \varepsilon_{rr}^{(0)}}{d\theta^2} - (\lambda_0 - \mu_0) \varepsilon_{rr}^{(0)} + (\lambda_0 - \mu_0 + 1)(\lambda_0 - \mu_0) \varepsilon_{\theta\theta}^{(0)}, \quad (4.11)$$

$$2(1+\nu)(\lambda_1 - \mu_0 + 1) \frac{d\varepsilon_{r\theta}^{(1)}}{d\theta} = \frac{d^2 \varepsilon_{rr}^{(1)}}{d\theta^2} - (\lambda_1 - \mu_0) \varepsilon_{rr}^{(1)} + (\lambda_1 - \mu_0 + 1)(\lambda_1 - \mu_0) \varepsilon_{\theta\theta}^{(1)} \quad (4.12)$$

Асимптотичний аналіз кінетичного рівняння накопичення ушкоджень (4.3) дозволить вивести звичайні диференціальні рівняння (4.13), (4.14):

$$g'_0 \sin \theta - \mu_0 g_0 \cos \theta = -f_e^m g_0^{-n}, \quad (4.13)$$

$$g'_0 \sin \theta - \mu_1 g_1 \cos \theta = -f_e^m g_0^{-n} \left[\frac{m}{2} \frac{f_1}{f_e^2} - n \frac{g_1}{g_2} \right] \quad (4.14)$$

Тому інтерес представляє рішення системи двох нелінійних звичайних диференціальних рівнянь (4.12), (4.14) з крайовими умовами (4.15):

$$\begin{aligned} f_1(\theta=0) &= 0, & f_1'''(\theta=0) &= 0, & g_1'(\theta=0) &= 0, \\ f_1(\theta=\pi) &= 0, & f_1'(\theta=\pi) &= 0, & g_1(\theta=\pi) &= 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Початкові умови яких мають (16), (17):

$$f_1(\theta=0) = A_1, \quad f_1'(\theta=0) = 0, \quad f_1''(\theta=0) = A_2, \quad f_1'''(\theta=0) = 0, \quad (4.16)$$

$$g_1(\theta=0) = \frac{\mu_0^{1-1/m}}{2(\mu_1 + n\mu_0)} \frac{f_1(\theta=0)}{(g_0(\theta=0))^{(n+1)/m}}, \quad g_1'(\theta=0) = 0. \quad (4.17)$$

Згідно з [100] ретельний аналіз системи рівнянь (4.12) та (4.14) дозволить знайти аналітичні представлення рішення (4.18), (4.19):

$$\sigma_{rr}^{(1)} = \kappa r^{\mu_1} \sin^2 \theta (\cos \theta)^{\mu_1}, \quad \sigma_{\theta\theta}^{(1)} = \kappa r^{\mu_1} (\cos \theta)^{\mu_1+2}, \quad (4.18)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(1)} = \kappa r^{\mu_1} \sin \theta (\cos \theta)^{\mu_1+1}, \quad g_1(0) = \frac{1}{2} \kappa^{m/(n+1)} r^{\mu_1} (\cos \theta)^{\mu_1} \quad \mu_1 = 2\mu. \quad (4.19)$$

Таким чином, описано аналітичні представлення кутових розподілів компонент тензора напруження та параметра суцільності - коефіцієнтів двочленних асимптотичних розкладань функції напруги E_{pi} біля вершини зростаючої тріщини нормального відриву для залізобетонних елементів, що згинаються.

4.2 Опис напружено-деформованого стану біля вершини тріщини експериментальних балок в умовах змішаного деформування

На підставі [63, с.7] наведемо математичну постановку задачі, що отримується з проблеми визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини в балці А1 в умовах змішаного деформування елемента конструкції в матеріалі зі степенними визначальними рівняннями:

$$\varepsilon_{ij} = 3B\sigma_e^{n-1}s_{ij}/2, \quad (4.20)$$

де ε_{ij} - компоненти тензора деформацій, s_{ij} – компоненти девіатора тензора напружень, $\sigma_e = (3s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – інтенсивність дотичних напружень, B, n – матеріальні константи. Описана задача зводиться до необхідності дослідження рівнянь рівноваги (в полярній системі координат з полюсом в вершині тріщини):

$$r\sigma_{rr,r} + \sigma_{r\theta,\theta} + \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} = 0, \quad r\sigma_{r\theta,r} + \sigma_{\theta\theta,\theta} + 2\sigma_{r\theta} = 0 \quad (4.21)$$

і умови сумісності деформацій:

$$2(r\varepsilon_{r\theta,\theta})_{,r} = \varepsilon_{rr,\theta\theta} - r\varepsilon_{rr,r} + r(r\varepsilon_{\theta\theta})_{,rr} \quad (4.22)$$

разом з визначальними рівняннями (4.21).

Відповідно до методу розкладання за власними функціями, асимптотичне представлення функції напружень Ері $\chi(r, \theta)$ біля вершини тріщини ($r \rightarrow 0$) розшукується в формі:

$$\chi(r, \theta) = Kr^{\lambda+1}f(\theta). \quad (4.23)$$

Компоненти тензора напружень в безпосередньому місці біля вершини тріщини приймають вид $\sigma_{ij}(r, \theta) = r^{\lambda-1}\tilde{\sigma}_{ij}(r, \theta)$ або

$$\sigma_{rr} = r^{\lambda-1}[(\lambda+1)f + f''], \quad \sigma_{\theta\theta} = r^{\lambda-1}\lambda(\lambda+1)f, \quad \sigma_{r\theta} = -r^{\lambda-1}\lambda f'. \quad (4.24)$$

Асимптотичне представлення інтенсивності дотичних напружень в умовах плоского деформованого стану біля вершини тріщини має форму

$$\sigma_e(r, \theta) = r^{\lambda-1}f_e(\theta), \quad \text{де } f_e(\theta) = \sqrt{[f''(\theta) + (1-\lambda^2)f(\theta)]^2 + 4\lambda^2[f'(\theta)]^2}.$$

Таким чином, в силу (4.20), (4.23), і (4.24) компоненти тензора деформацій при плоскому деформованому стані біля вершини тріщини мають наступну структуру:

$$\varepsilon_{rr}(r, \theta) = -\varepsilon_{\theta\theta}(r, \theta) = Br^{(\lambda-1)n} \tilde{\varepsilon}_{rr}(\theta), \quad \varepsilon_{r\theta}(r, \theta) = Br^{(\lambda-1)n} \tilde{\varepsilon}_{r\theta}(\theta), \quad (4.25)$$

$$\text{где } \tilde{\varepsilon}_{rr}(\theta) = 3f_e^{n-1} [f''(\theta) + (1-\lambda^2)f(\theta)]/4, \quad \tilde{\varepsilon}_{r\theta}(\theta) = -3f_e^{n-1} \lambda f'(\theta)/2.$$

Підстановка виразу (4.25) в умову сумісності (4.22) дозволяє отримати нелінійне звичайне диференціальне рівняння четвертого порядку щодо функції $f(\Theta)$, (4.26):

$$2[(\lambda-1)n+1]\tilde{\varepsilon}_{r\theta,\theta} = \tilde{\varepsilon}_{rr,\theta\theta} - (\lambda-1)n[(\lambda-1)n+2]\tilde{\varepsilon}_{rr} \quad (4.26)$$

Або в термінах функції $f(\Theta)$, (4.27):

$$\begin{aligned} & f_e^2 f^{(4)} \left\{ (n-1) \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right]^2 + f_e^2 \right\} + (n-1)(n-3) \times \\ & \times \left\{ \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] \left[(1-\lambda^2)f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] + \\ & + (n-1) f_e^2 \left\{ \left[(1-\lambda^2)f' + f''' \right]^2 + \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] \left[(1-\lambda^2)f'' + 4\lambda^2(f''^2 + f f''') \right] \right\} \\ & \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] + 2(n-1) f_e^2 \times \left\{ \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] \left[(1-\lambda^2)f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} \\ & \left[(1-\lambda^2)f' + f''' \right] + C_1(n-1) f_e^2 \left\{ \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] \left[(1-\lambda^2)f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} f' + \\ & + C_1 f_e^4 f'' - C_2 f_e^4 \left[(1-\lambda^2)f + f'' \right] + f_e^4 (1-\lambda^2) f'' = 0, \end{aligned} \quad (4.27)$$

де прийняті позначення (4.28):

$$C_1 = 4\lambda[(\lambda-1)n+1], \quad C_2 = (\lambda-1)n[(\lambda-1)n+2] \quad (4.28)$$

Рішення нелінійного рівняння (4.27) має задовольняти крайовим умовам (4.30), які прямують з вимоги відсутності поверхневих зусиль на берегах тріщини (4.29).

Умови відсутності поверхневих зусиль на берегах тріщини:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta = \pm\pi) = 0, \quad \sigma_{r\theta}(r, \theta = \pm\pi) = 0. \quad (4.29)$$

крайові умови (4.30):

$$f(\theta = 0 \pm \pi) = 0, \quad f'(\theta = \pm\pi) = 0. \quad (4.30)$$

Таким чином для рівняння (4.27), рішення якого підпорядковується крайовим умовам (4.30), сформульована нелінійна задача на власні значення: необхідно знайти власні значення λ , Що відповідають нетривіальним

рішенням рівняння (4.27), що задовольняє крайовим умовам (4.30). При дослідженні тріщин нормального відриву для чисельного рішення рівняння (4.27) вдаються до умов симетрії або антисиметрії і рівняння (4.27) інтегрується на відрізку $[0, \pi]$ з початковими умовами: для тріщин нормального відриву (4.31):

$$f(\theta=0)=1, \quad f'(\theta=0)=0, \quad f''(\theta=0)=A_2, \quad f'''(\theta=0)=0. \quad (4.31)$$

Спираючись на роботу [101] опишемо алгоритм чисельного рішення всього спектра власних значень в нелінійної задачі на власні значення, що отримується з проблеми визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини в матеріалі зі степенними визначальними рівняннями в умовах змішаного деформування в діапазоні змішаних форм деформування: від чистого зсуву до нормального відриву.

У разі змішаного деформування міркування симетрії і антисиметрії використані бути не можуть і необхідно шукати рішення рівняння (4.27) на відрізку $[-\pi, \pi]$. В умовах змішаного навантаження при чисельному рішенні рівняння (4.27) відрізок інтегрування $[-\pi, \pi]$ можна розбити на два відрізки: $[-\pi, 0]$ і $[0, \pi]$ Коші з початковими умовами. Спочатку рівняння (4.27) інтегрується на відрізку $[0, \pi]$ і крайова задача зводиться до задачі Коші з початковими умовами (4.32):

$$\begin{aligned} f(\theta=0)=1, \quad f'(\theta=0)=-(\lambda+1)/\operatorname{tg}(M^p \pi/2), \\ f''(\theta=0)=A_2, \quad f'''(\theta=0)=A_3. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Значення похідної першого порядку знаходиться з заданого виду змішаного навантаження (значення параметра змішаності навантаження (4.22), що задає вид навантаження, відомо). невідомі постійні A_2 і A_3 визначаються таким чином, щоб виконувалися крайові умови на верхньому березі тріщини (4.33):

$$f(\theta=\pi)=0, \quad f'(\theta=\pi)=0. \quad (4.33)$$

Після того, як підібрані постійні A_2 і A_3 рівняння (4.27) інтегрується на відрізку $[-\pi, 0]$, для чого двоточкова крайова задача для рівняння (4.27) з граничними умовами (4.34):

$$\begin{aligned} f(\theta = -\pi) = 0, \quad f'(\theta = -\pi) = 0, \\ f(\theta = 0) = 1, \quad f'(\theta = 0) = -(\lambda + 1) / \operatorname{tg}(M^p \pi / 2) \end{aligned} \quad (4.34)$$

замінюється завданням Коші з початковими умовами (4.34):

$$f(\theta = -\pi) = 0, \quad f'(\theta = -\pi) = 0, \quad f''(-\pi) = B_2, \quad f'''(\theta = -\pi) = -B_3. \quad (4.35)$$

Невідомі постійні B_2 і B_3 підбираються таким чином, щоб виконувалися умови рівноваги елемента, розташованого на промені $\Theta = 0$. Рівняння рівноваги даного елемента вимагають безперервності компонент тензора напружень на промені $\Theta = 0$, що тягне за собою безперервність функцій (і, отже, крайові умови (4.34)). Тому дві невідомі постійні B_2 і B_3 визначаються таким чином, щоб рішення, що розшукується на відрізку $[-\pi, 0]$, задовольняло б крайовим умовам при $\Theta = 0$.

Таким чином визначення всього спектру власних значень нелінійної задачі на власні значення дає можливість правильно описати структуру ділянки біля вершини тріщини в умовах змішаного деформування.

Запропоновано етапи чисельного відшукування всього спектра власних значень в нелінійної задачі на власні значення, що отримується з проблеми визначення напружено-деформованого стану у вершини тріщини в умовах змішаного деформування в діапазоні змішаних форм деформування: від чистого зсуву до нормального відриву.

Дотримуючись алгоритму, наведеного у дисертаційній роботі відкривається можливість отримати власні значення, які можуть бути використані для побудови багатомасштабного, багаторівневого опису процесів руйнування біля вершини тріщини. Алгоритм, дозволяє виконати чисельний аналіз, який дозволить оцінити асимптотику механічних полів біля вершини тріщини в залізобетонних елементах, що згинаються, на відстанях, порівнянних із зоною розпушення (з областю диспергірованого матеріалу).

4.3 Модель Леонова-Панасюка-Дагдейла як модель аналізу локалізації пластичних деформацій біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних конструкціях, що згинаються

Перенесемо на досліджуваний залізобетонний зразок модель Леонова-Панасюка-Дагдейла. Згідно з якою, в тонких металевих пластинах в умовах плоского напруженого стану пластична течія біля вершини тріщини нормального відриву реалізується у вигляді локальних шийок, витягнутих уздовж лінії тріщини, ковзання в яких відбувається в двох вузьких перехрещуваних шарах, які пронизують пластину по товщині і нахилених під кутом 45° до площині пластини.

Модель Леонова-Панасюка-Дагдейла використовується в якості ефективно розрахункової схеми при аналізі локалізації пластичних деформацій біля вершини тріщини нормального відриву в пружно ідеально пластичному тілі в умовах плоского напруженого стану у всіх випадках, коли пластична зона являє собою вузький відрізок, який продовжує тріщину. В якості умови плинності тут виступає критерій Треска. Пластичне ковзання в зонах локальних шийок перед тріщиною спрощено описується розривом нормальної складової переміщення. Відповідна подібній схемі крайова задача математичної теорії пружності допускає просте замкнуте рішення.

Нами було досліджено вплив очага локалізації пластичних деформацій і пошкодження, віддаленого від вершини тріщини нормального відриву, на тріщину в умовах плоского напруженого стану. Віддалені локалізовані зони пластичного течіння, супроводжуваного розвитком в цих зонах ушкоджень зароджуються в процесі циклічного навантаження.

Ми використовуємо класичне рішення Леонова-Панасюка-Дагдейла.

Навантаження тріщини нормального відриву в умовах плоского напруженого стану в полі залишкових напружень (пов'язаних з попереднім циклом навантаження) може призводити до утворення двох очагів пластичного течіння (двохзонна локалізація пластичних деформацій): безпосередньо біля

вершини тріщини і в зоні максимального залишкового розтягування, яке в разі циклічного навантаження досягає однієї третини межі текучості. Моделюючи за схемою Леонова-Панасюка-Дагдейла пластичні зони відрізками, для визначення трьох безрозмірних параметрів, що характеризують положення пластичних зон, отримана система нелінійних рівнянь, яка аналізується за допомогою оригінального чисельного алгоритму, розробленого спеціально для цієї мети. Отримана точна формула для обчислення розкриття тріщини при двозонно локалізованих пластичних деформаціях. Асимптотический аналіз величини розкриття тріщини для випадку, коли лінійний розмір віддаленої пластичної зони малий у порівнянні з довжиною тріщини, приводить до висновку, що вплив віддаленої пластичної зони на тріщину проявляється у формі її додаткового закриття.

Циклічне навантаження тріщини з локалізованою біля її вершини пластичної зони активізує процес звільнення прихованої вільної енергії, пов'язаної з мікронеоднорідним в межах пластичної зони полем напруження. На частку мікронеоднорідного розподілу доводиться до 15% від всієї роботи, витраченої на пластичне деформування [54, 55]. Енергія, що звільняється, є основним джерелом розвитку пошкодженості в зонах локалізації необоротних деформацій. Пошкодженість, в свою чергу, спотворюючи поле напружень і геометрію локалізованих зон, впливає на стан тріщини. Однією з характеристик подібного впливу може служити зміна розкриття тріщини, обумовлена перерозподілом напружень і зміною зон локалізації пластичних деформацій внаслідок зростання пошкодженості.

4.3.1 Розподіл нормальних напружень і переміщень на продовженні тріщини нормального відриву

Дослідження плоского напруженого стану тріщини нормального відриву було вперше виконано в роботах [102], [103].

Аналогічна по суті схема була запропонована Г.І. Баренблаттом, [104], [105] при дослідженні сил зчеплення біля вершини тріщини нормального відриву.

Передбачалося, відповідно до експериментальних даних, що пластична зона представляє собою відрізок, що знаходиться на продовженні лінії тріщини [106], [107].

Розглядається навантаження балки А1 з тріщиною нормального відриву, при якому виникає додаткова, віддалена від вершини тріщини, зона пластичного розтягування. Подібна ситуація, як показують розрахунки, дійсно реалізується при циклічному навантаженні зі змінною амплітудою напружень. Розвантаження тріщини супроводжується миттєвим утворенням біля вершини тріщини стислої пластичної зони, в той час як на деякому віддалені від кінчика тріщини виникає зона залишкового розтягування, в якій напруження можуть досягати третини від межі текучості. В цій останній зоні протягом наступних циклів навантаження можуть локалізуватися пластичні деформації, утворюючи новий осередок пластичної течії.

Обчислення параметрів, що визначають локалізацію зон пластичної течії, пов'язане з рішенням складної системи двох нелінійних рівнянь і тому реалізовано чисельно. Величина розкриття тріщини при повторному навантаженні обчислюється за допомогою отриманої точної формули, в яку входять тільки зазначені параметри локалізації. Ця формула тим самим дозволяє оцінити вплив віддаленої пластичної зони на величину розкриття тріщини.

Пошкодженість також вважається локалізованою в межах пластичної зони, що дещо спрощує аналіз, оскільки відпадає необхідність окремого аналізу локалізації пошкодження.

Розглянемо тріщину нормального відриву $|x_1| \leq \ell$ в балці А1 в умовах плоского напруженого стану. Позначимо через U межу плинності при одновісному розтягуванні. Напруження і переміщення представляються через єдиний комплексний потенціал за формулами Колосова-Мусхелишвили:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^* &= 2 \operatorname{Re}[\partial_z \varphi^*] - 2x_2 \operatorname{Im}[\partial_z^2 \varphi^*], \\ \sigma_{22}^* &= 2 \operatorname{Re}[\partial_z \varphi^*] - 2x_2 \operatorname{Im}[\partial_z^2 \varphi^*],\end{aligned}\quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{12}^* &= -2x_2 \operatorname{Re}[\partial_z^2 \varphi^*]; \\ 2Gu_1^* &= (k-1) \operatorname{Re}[\varphi^*] - 2x_2 \operatorname{Im}[\partial_z \varphi^*], \\ 2Gu_2^* &= (k+1) \operatorname{Im}[\varphi^*] - 2x_2 \operatorname{Re}[\partial_z \varphi^*]\end{aligned}\quad (4.37)$$

В ЯКИХ:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^* &= \sigma_{11}, \quad \sigma_{12}^* = \sigma_{12}, \quad \sigma_{22}^* = \sigma_{22} - \hat{\sigma}_{22}^\infty, \\ u_1^* &= u_1, \quad u_2^* = u_2 - x_2 E^{-1} \hat{\sigma}_{22}^\infty, \\ \kappa &= (3-\nu)/(1+\nu),\end{aligned}\quad (4.38)$$

$\varphi^*(z)$ - комплексний потенціал, який є аналітичною у верхній площині $\operatorname{Im}z > 0$ функцією комплексної змінної $z = x_1 + ix_2$, G — модуль зсуву, ν — коефіцієнт Пуассона, E — модуль Юнга, $\hat{\sigma}_{22}^\infty$ — нормальні напруження розтягу на нескінченності.

Позначимо через $\hat{\sigma}_{ij}$, \hat{u}_i напруження і переміщення, а через ℓ - координату $x_1 = \ell + \hat{c}$ координату пластичної зони при першому навантаженні напруженням $\hat{\sigma}_{22}^\infty$.

Відповідно до Леонова-Панасюка-Дагдейла знаходимо:

$$\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y} = 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \arcsin \frac{\sec^2 \hat{\beta} + \xi}{(1 + \xi) \sec \hat{\beta}} \right\}, \quad (|\xi| \geq \sec \hat{\beta}) \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned}\frac{\pi E \hat{u}_2}{2Yl} &= -\ln(\xi^2 - 1) - 2 \ln \cos \hat{\beta} + 2 \ln \left(\sin \hat{\beta} + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} \right) + \\ &+ \xi \ln \frac{\xi - 1}{\xi + 1} + \xi \ln \frac{\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} + \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1}{\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} - \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1}\end{aligned}\quad (4.40)$$

$$(1 \leq |\xi| \leq \sec \hat{\beta})$$

$$\frac{\hat{c}}{l} = \sec \hat{\beta} - 1,$$

де введені наступні безрозмірні величини:

$$\xi = \frac{x_1}{l}, \quad \hat{\beta} = \frac{\pi}{2Y} \hat{\sigma}_{22}^{\infty} \quad (4.41)$$

Розподіл нормальних переміщень і напружень на продовженні тріщини для зростаючих значень відношення:

$$\frac{\hat{\sigma}_{22}^{\infty}}{Y} = 0.1, 0.2, \dots, 0.9 \quad (4.42)$$

представлені на рис. 4.1, 4.2.

Для дослідження напружено-деформованого стану після розвантаження пластини введемо такі різниці:

$$\tilde{\sigma}_{ij} \text{ и } \tilde{u}_i \quad \Delta\sigma_{ij} = \tilde{\sigma}_{ij} - \hat{\sigma}_{ij}, \quad \Delta u_i = \tilde{u}_i - \hat{u}_i, \quad (4.43)$$

де $\hat{\sigma}_{ij}, \hat{u}_i$ — залишкові напруження і переміщення, котрі спостерігаються в балці з тріщиною після розвантаження.

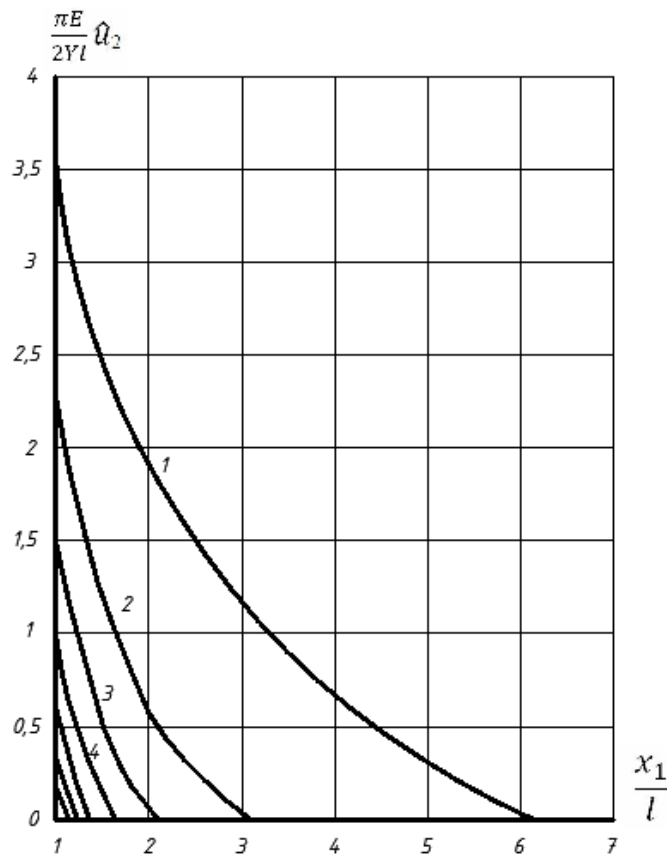


Рис. 4.1. Графіки розподілу нормальних напружень на продовженні тріщини нормального відриву

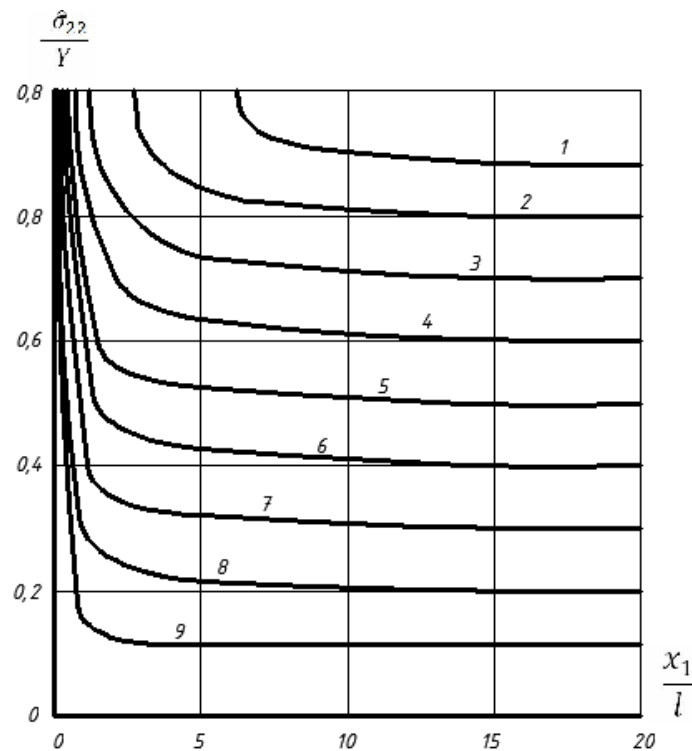


Рис. 4.2. Графіки розподілу нормальних переміщень на продовженні тріщини нормального відриву

4.3.2 Розподіл залишкових напружень і переміщень уздовж лінії тріщини нормального відриву після першого циклу навантаження-розвантаження

Основою подальшого аналізу є припущення про те, що після зняття навантаження біля вершини тріщини миттєво відбувається перерозподіл напружень: нормальні напруження розтягу на межі текучості миттєво змінюються стискаючими, рівними межі текучості при стиску. Таким чином, поле залишкових напружень стискає вершину тріщини, що призводить до її закриття. Що стосується переміщень, то оскільки зняття навантаження за межами локалізованої зони стиснення призводить до зворотнього переходу з пластичності в пружний стан, то зміни нормальних переміщень поза зазначеної зони залишкового стиснення не відбувається.

Виходячи з наведеного вище аналізу, для визначення комплексного потенціалу $\Delta\phi^*$ граничні умови можуть бути сформульовані у вигляді:

$$\begin{aligned}
\Delta\sigma_{22}^* &= \hat{\sigma}_{22}^\infty \quad (|x_1| \leq l, \quad x_2 = 0), \\
\Delta\sigma_{22}^* &= -2Y + \hat{\sigma}_{22}^\infty \quad (l \leq |x_1| \leq l + \tilde{c}, \quad x_2 = 0), \\
\Delta u_2 &= 0 \quad (|x_1| \geq l + \tilde{c}, \quad x_2 = 0), \\
\partial_z \Delta\varphi^*(z) &= O(z^{-2}) \quad (z \rightarrow \infty),
\end{aligned} \tag{4.44}$$

де $\Delta\sigma_{22}^* = \Delta\sigma_{22} + \hat{\sigma}_{22}^\infty$, $x_1 = l + \tilde{c}$ – координата залишкової стиснутої пластичної зони.

Передбачається (і це підтверджується отриманими рішенням), що при повторному навантаженні балки розтягуючим напруженням $\check{\sigma}_{22}^\infty$ утворюються дві локалізовані пластичні зони

$$\begin{aligned}
l &\leq x_1 \leq l + \tilde{c}, \\
l + c' &\leq x_1 \leq l + c'',
\end{aligned}$$

перша з яких, примикає до вершини тріщини, а друга - знаходиться на деякому віддаленні від першої.

Відносно різностей

$$\begin{aligned}
\Delta\sigma_{ij} &= \check{\sigma}_{ij} - \check{\sigma}_{ij}, \\
\Delta u_i &= \check{u}_i - \check{u}_i
\end{aligned}$$

знову отримується пружна задача с граничними умовами виду:

$$\begin{aligned}
\Delta\sigma_{22}^* &= -\check{\sigma}_{22}^\infty \quad (|x_1| \leq l, \quad x_2 = 0), \\
\Delta\sigma_{22}^* &= 2Y - \check{\sigma}_{22}^\infty \quad (l \leq |x_1| \leq l + \tilde{c}, \quad x_2 = 0), \\
\Delta\sigma_{22}^* &= Y - \check{\sigma}_{22} - \check{\sigma}_{22}^\infty \quad (l + c' \leq |x_1| \leq l + c'', \quad x_2 = 0), \\
\Delta u_2 &= 0 \quad (l + \tilde{c} \leq |x_1| \leq l + c', \quad x_2 = 0; \quad |x_1| \geq l + c'', \quad x_2 = 0), \\
\partial_z \Delta\varphi^*(z) &= O(z^{-2}) \quad (z \rightarrow \infty),
\end{aligned} \tag{4.45}$$

де $\Delta\sigma_{22}^* = \Delta\sigma_{22} - \check{\sigma}_{22}^\infty$.

Рішення граничної задачі (4.44) може бути отримано в замкнутому вигляді. Для визначення комплексного потенціалу $\Delta\varphi^*$ краєвої задачі відносно прирістів може бути отримано наступне рівняння:

$$d\Delta\varphi^*(z) = -\frac{1}{\pi\sqrt{z^2 - (l + \tilde{c})^2}} \left\{ \frac{\hat{\sigma}_{22}^\infty - 2Y}{2} J_1 + YJ_2 \right\} \quad (4.46)$$

де прийняті позначення:

$$J_1 = \int_{-(l+\tilde{c})}^{l+\tilde{c}} \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{z-t} dt,$$

$$J_2 = \int_{-l}^l \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{z-t} dt,$$

та аналітична гілка кореню визначається умовою:

$$\sqrt{z^2 - (l + \tilde{c})^2} = z - \frac{(l + \tilde{c})^2}{2z} + \dots \quad (z \rightarrow \infty).$$

Інтеграли у формулі (4.46), по суті аналогічні тим, які входять в схему Леонова-Панасюка-Дагдейл, обчислюються, як це наводиться нижче:

$$\int_{-(l+\tilde{c})}^{l+\tilde{c}} \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{z-t} dt = -\pi \left(\sqrt{z^2 - (l+\tilde{c})^2} - z \right),$$

$$(z \notin [-l - \tilde{c}, l + \tilde{c}]) \quad (4.47)$$

$$\int_{-(l+\tilde{c})}^{l+\tilde{c}} \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{t-x_1} dt = -\pi x_1 \quad (x_1 \notin [-l - \tilde{c}, l + \tilde{c}]), \quad (4.48)$$

$$\int_{-(l+\tilde{c})}^{l+\tilde{c}} \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{z-t} dt = -2z \arcsin \frac{l}{l+\tilde{c}} + \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - z^2} \ln \frac{z-l}{z+l} +$$

$$+ \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - z^2} \ln \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - l^2} \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - z^2} + (l+\tilde{c})^2 + zl}{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - l^2} \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - z^2} + (l+\tilde{c})^2 - zl},$$

$$(z \notin [-l, l]) \quad (4.49)$$

$$\int_{-l}^l \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{t-x_1} dt = -2x_1 \arcsin \frac{l}{l+\tilde{c}} + \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - x_1^2} \ln \left| \frac{x_1 - l}{x_1 + l} \right| -$$

$$- \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - x_1^2} \ln \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - l^2} \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - x_1^2} + (l+\tilde{c})^2 + x_1 l}{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - l^2} \sqrt{(l+\tilde{c})^2 - x_1^2} + (l+\tilde{c})^2 - x_1 l},$$

$$(|x_1| \leq l + \tilde{c}) \quad (4.50)$$

$$\int_{-l}^l \frac{\sqrt{(l+\tilde{c})^2 - t^2}}{t-x_1} dt = -2x_1 \arcsin \frac{l}{l+\tilde{c}} + \sqrt{x_1^2 - (l+\tilde{c})^2} \times \quad (4.51)$$

$$\times \left\{ \arcsin \frac{(l + \tilde{c})^2 + x_1 l}{(l + x_1)(l + \tilde{c})} + \arcsin \frac{(l + \tilde{c})^2 - x_1 l}{(l - x_1)(l + \tilde{c})} \right\} \\ (|x_1| \geq l + \tilde{c})$$

В наведених вище формулах

$$\sqrt{(l + \tilde{c})^2 - z^2}$$

позначає аналітичну гілку, яка приймає речові позитивні значення, якщо $z \in (-l - \tilde{c}, l + \tilde{c})$, символ l позначає аналітичну гілку, котра приймає речові значення, якщо $l < z < l + \tilde{c}$.

Довжина залишкової пластичної зони обчислюється за формулою;

$$\frac{\tilde{c}}{l} = \sec \frac{\hat{\beta}}{2} - 1. \quad (4.52)$$

Поле залишкових напружень визначається у вигляді:

$$Y^{-1} \tilde{\sigma}_{22} = -1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \arcsin \frac{\sec^2 \hat{\beta} + \xi}{(1 + \xi) \sec \hat{\beta}} + \arcsin \frac{\sec^2 \hat{\beta} - \xi}{(1 - \xi) \sec \hat{\beta}} \right\} + \\ + \frac{2}{\pi} \left\{ \arcsin \frac{\sec^2(\hat{\beta}/2) + \xi}{(1 + \xi) \sec(\hat{\beta}/2)} + \arcsin \frac{\sec^2 \hat{\beta} - \xi}{(1 - \xi) \sec \hat{\beta}} \right\} \\ (|\xi| \geq \sec \hat{\beta}) \quad (4.53)$$

$$Y^{-1} \sigma_{22} = -1 + \frac{2}{\pi} \left\{ \arcsin \frac{\sec^2(\hat{\beta}/2) + \xi}{(1 + \xi) \sec(\hat{\beta}/2)} + \arcsin \frac{\sec^2(\hat{\beta}/2) - \xi}{(1 - \xi) \sec(\hat{\beta}/2)} \right\}. \\ (\sec(\hat{\beta}/2) \leq |\xi| \leq \sec \hat{\beta}) \quad (4.54)$$

Залишкові переміщення визначаються у вигляді:

$$\frac{\pi E \tilde{u}_2}{2Yl} = 2 \ln \frac{\cos^2(\hat{\beta}/2)}{\cos \hat{\beta}} + 2 \ln \frac{\sin \hat{\beta} + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}}}{\left[\sin(\hat{\beta}/2) + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2(\hat{\beta}/2)} \right]^2} - \\ - \xi \ln \frac{\xi - 1}{\xi + 1} + \ln(\xi^2 - 1) + \xi \ln \frac{\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} + \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1}{\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} - \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1} + \\ + \xi \ln \frac{\left(\sin(\hat{\beta}/2) \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2(\hat{\beta}/2)} - \xi \cos^2(\hat{\beta}/2) + 1 \right)^2}{\left(\sin(\hat{\beta}/2) \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2(\hat{\beta}/2)} + \xi \cos^2(\hat{\beta}/2) + 1 \right)^2}, \quad (4.55)$$

$$(1 \leq |\xi| \leq \sec(\hat{\beta}/2))$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi E \tilde{u}_2}{2Yl} = & -\ln(\xi^2 - 1) - 2 \ln \cos \hat{\beta} + 2 \ln \left(\sin \hat{\beta} + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} \right) + \\ & + \xi \ln \frac{(\xi - 1) \left(\sin \hat{\beta} + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} + \xi^2 \cos^2 \hat{\beta} + 1 \right)}{(\xi + 1) \left(\sin \hat{\beta} + \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta} + 1 \right)}. \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$(\sec(\hat{\beta}/2) \leq |\xi| \leq \sec \hat{\beta})$$

Як отримується з наведеного рішення, біля вершини тріщини поле залишкових напружень є стискаючим і прагне закрити тріщину. У міру віддалення від тріщини стискаючі напруження змінюються розтягуючими. Максимум залишкового розтягуючого напруження досягається у правій границі пластичної зони, яка утворилася безпосередньо перед розвантаженням, і дорівнює:

$$\max \frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y} = -1 + \frac{2}{\pi} \left\{ \arcsin \frac{3 \cos^2(\hat{\beta}/2) - 1}{2 \cos^3(\hat{\beta}/2)} + \arcsin \frac{\sec(\hat{\beta}/2)}{2} \right\}. \quad (4.57)$$

При малих значеннях відношення $\tilde{\sigma}_{22}/Y$ цей максимум досягає значної величини, що дорівнює третині межі текучості.

Розподіл залишкових напружень і переміщень для зростаючих значень відношення:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{22}}{Y} = 0.1, 0.2, \dots, 0.9$$

представлені на рис. 4.3, 4.4.

Безрозмірна координата точки, навколо якої залишковий стиск переходить в залишковий розтяг, є

$$\xi = \sqrt{\sec \hat{\beta}}.$$

Локалізація максимального залишкового переміщення визначається з рівня:

$$\frac{d}{d\xi} \frac{\pi E}{2Yl} \tilde{u}_2(\xi, 0) = 0 \quad (1 \leq \xi \leq \sec \hat{\beta}),$$

котрі можна привести до еквівалентного –

$$\frac{\left(\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} + \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1\right) \left(\sin(\hat{\beta}/2) \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2(\hat{\beta}/2)} - \xi \cos^2(\hat{\beta}/2) + 1\right)^2}{\left(\sin \hat{\beta} \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2 \hat{\beta}} - \xi \cos^2 \hat{\beta} + 1\right) \left(\sin(\hat{\beta}/2) \sqrt{1 - \xi^2 \cos^2(\hat{\beta}/2)} + \xi \cos^2(\hat{\beta}/2) + 1\right)^2} - \frac{\xi - 1}{\xi + 1} = 0. \quad (4.58)$$

Чисельний аналіз цього рівняння для значення безрозмірного параметру $0 < \hat{\beta} < \pi/2$ дозволяє побудувати графік залежності безрозмірної координати локалізації максимального залишкового розтягу ξ_{\max} в залежності від безрозмірного відношення $\tilde{\sigma}_{22}/Y$. Цей графік зображений на рис.4.3.

Якщо $\hat{\beta} \rightarrow \pi/2$, то рівняння, що визначає локалізацію максимального залишкового переміщення, наводиться до кубічного рівняння:

$$5\xi^3 + \xi^2 - 9\xi - 1 = 0 \quad (1 \leq \xi \leq \sqrt{2})$$

Корінь цього рівняння (результат чисельного аналізу) є $\xi = 1,301317\dots$

Рішенню, таким чином, підлягає крайова задача з умовами (4.45), в котрих залишкове поле напружень вираховується за формулами (4.53), (3.54).

$$\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y}$$

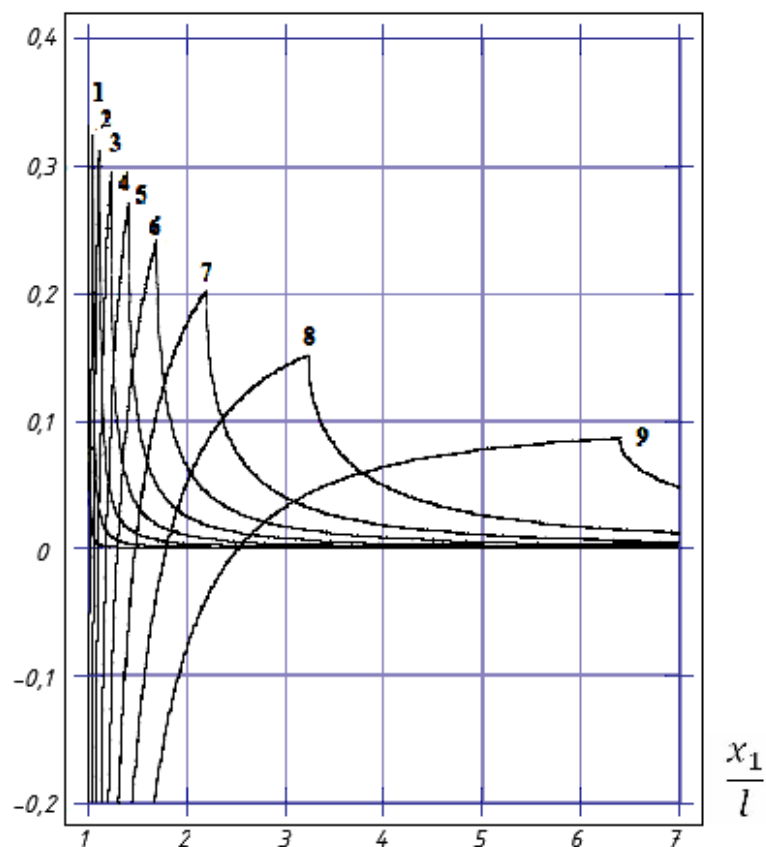


Рис. 4.3. Графіки розподілу залишкових напружень вздовж лінії тріщини нормального відриву після першого циклу навантаження-розвантаження

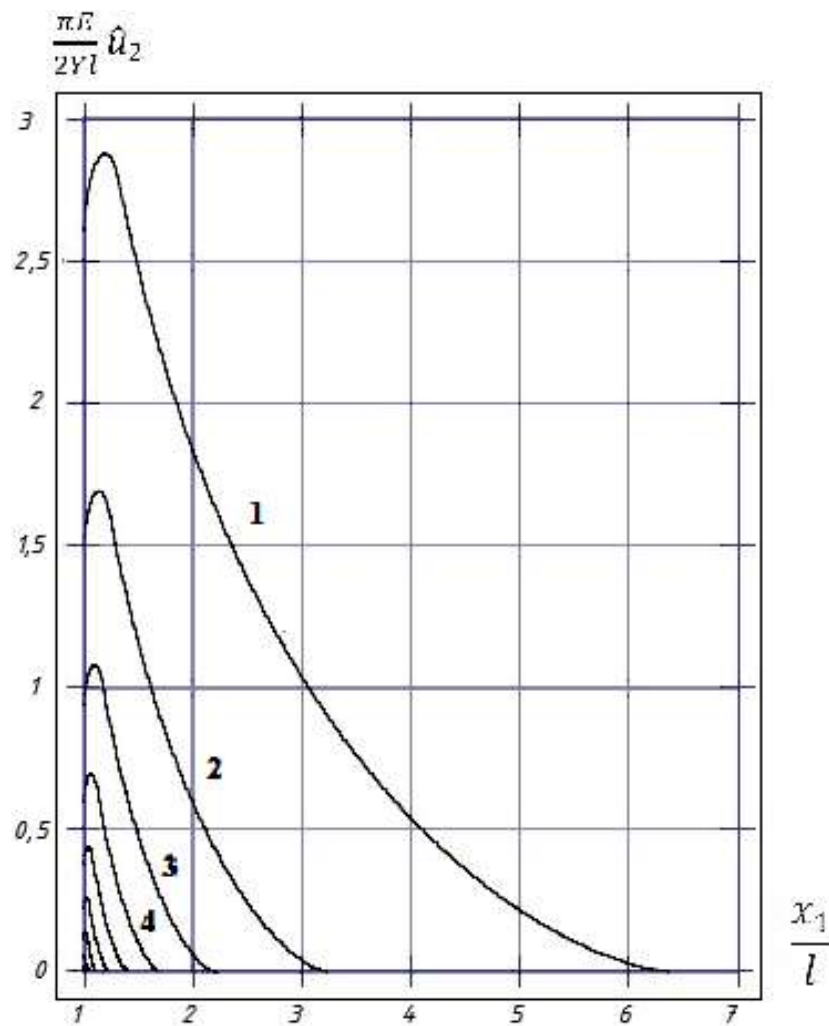


Рис. 4.4. Графіки розподілу залишкових переміщень вздовж лінії тріщини нормального відриву після першого циклу навантаження-розвантаження

4.4 Список використаних джерел у розділі 4

У розділі 4 використані [54, 55, 63, 79, 96 – 100, 102 – 107] літературні джерела. Їх найменування наведені в загальному списку використаних джерел.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА ДИСЕРТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ

1. Подальше вивчення напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних елементів, що згинаються, та узагальнення інформації про тріщиноутворення в матеріалах і конструкціях на мікро- і макрорівнях дозволило зробити висновок, що наявність технологічних тріщин в конструкціях в значній мірі впливає на характер утворення та розкриття тріщин під впливом експлуатаційних навантажень, та визначає роботу матеріалів в конструкціях, деформації, тріщиноутворення, характер руйнування.

2. Систематизовано та узагальнено існуючі данні про роботу матеріалів на мікро- і макрорівнях та тріщиностійкість залізобетонних балок під час експлуатації. Аналіз механізмів зародження та розвитку тріщин дозволяє зробити висновок, що технологічні тріщини зумовлюють виникнення градієнтів деформацій за величиною і напрямком, що змінюють початковий деформаційний стан бетонних та залізобетонних конструкцій. Деформації і напружений стан за рахунок підростання і утворення технологічних тріщин сприяють збільшенню пошкодження матеріалу, що веде до збільшення деформацій залізобетонних елементів.

Запропонована комплексна модель структури будівельних матеріалів на мікро- і макрорівнях на базі енергетичних та силових критеріїв руйнування, яка дає можливість описати процес зростання макротріщини.

3. Проведено лабораторний експеримент на моделях-зразках із епоксидної смоли, який дозволив визначити розподіл напружень в композитах регулярної структури до виникнення тріщин на мікрорівні з концентрацією напружень на включеннях, а також використовувати співвідношення лінійної теорії пружності для кусково-однорідного тіла без розривів і тріщин.

Результати експерименту на залізобетонних зразках-балках підтвердили, що всі тріщини в дослідних зразках розвивалися із технологічних. Це дає можливість прогнозувати місце їх виникнення і напрямок розвитку. Підтверджено, що із збільшенням коефіцієнта технологічної пошкодженості в залізобетонних зразках, збільшується ступінь тріщиноутворення в процесі ви-

пробувань. Характер поширення силових тріщин повторює траєкторію технологічних тріщин, які проходять по енергетично вигідному шляху, і призупиняють розвиток в стислій зоні у зв'язку з впливом поперечних сил і місцевого стискання.

Експериментально доведено, що методи неруйнівного контролю, не змінюючи параметрів і характеристик виробу, дозволяють за непрямыми ознаками виявити приховані дефекти. Ультразвукові дослідження підтвердили присутність невидимих технологічних тріщин до дії зовнішнього навантаження. Глибина технологічних тріщин склала 8,6 мм.

4. Запропонована модель, яка дозволить встановити характер розподілу напружень та утворення тріщин в елементах, що згинаються. Методом фотопружності отримана картина розподілу максимальних дотичних і головних нормальних напружень в прозорих моделях - зразках. На підставі проведеного експерименту підтверджено, що при послідовному навантаженні моделі-зразка ізохроми спочатку з'являються в найбільш перевантажених і недовантажених точках. Зі збільшенням навантаження нові смуги з'являються на поверхні виробу і зсуваються у зону з найменшим рівнем напружень. Локалізація напружень відбувалася по похилій лінії від опори до сили в зоні сумісної дії моменту і поперечної сили.

5. Запропонована математична модель опису та алгоритм чисельного визначення напружено-деформованого стану біля вершини тріщини нормального відриву в залізобетонних елементах, що згинаються, в умовах змішаного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой, А.В. Сиренко. – Киев: Будівельник, 1991. – 144 с.
2. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. – О.: Город мастеров, 1998. – 168 с.
3. Шоршоров М.Х. Физико-химическое взаимодействие компонентов композиционных материалов // Композиционные материалы: Сб. науч. тр. МИСИ. – М.: Наука, 1980. – С. 11-18.
4. Карпенко Р.И. К построению условия прочности бетона при одноосных напряженных состояниях // Бетон и железобетон. – 1985. – №10. – С. 35-37.
5. Комохов П.Г. Структурная механика и теплофизика легкого бетона / П.Г. Комохов, В.С. Грызлов. – Вологда: Изд-во Вологодского научного центра, 1992. – 321 с.
6. Куксенко В.С. Физические принципы прогнозирования разрушения гетерогенных материалов / В.С. Куксенко, А.И. Ляшенко, В.Н. Савельев, Д.И. Фролов // Механика композитных материалов. – 1982. – №4. – С. 710-714.
7. Пушкарь Н.В. Технологическая поврежденность и работа железобетонных изгибаемых элементов по наклонным сечениям: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Одесса, 2003. – 155 с.
8. Композиционные материалы / Под ред. Л.Браутмана и Р.Крока – М.: Мир, Машиностроение, 1978. – 314 с.
9. Неупругие свойства композиционных материалов / Под ред. К.Н. Геракович. – М.: Мир, 1978. – 295 с.

10. Соломатов В.И. Полиструктурные композиционные материалы в строительстве / В.И. Соломатов, А.Н. Бобрышев, К.Г. Химмлер. – М.: Стройиздат, 1988. – 312 с.
11. Гладышев Б.М. Механическое взаимодействие элементов структуры и прочность бетонов. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьковском университете, 1987. – 168 с.
12. ТУ У 24.7 - 32781078 - 001:2006. Волокно армирующее полипропиленовое ВАП (фибра). 2004. – Днепропетровск – 31 с.
13. Десов А.Е. Макроструктурная гипотеза прочности бетона при сжатии и её экспериментальная проверка // Бетон и железобетон. – 1972. – №7. – С. 28-30.
14. Фенко Г.А. Влияние структурных напряжений на деформативные свойства бетона // Изв. вузов. Строительство. – 2001. – №4. – С. 142-145.
15. Hsu T.T.S. Mathematical Analyses of Shrinkage Stresses in a Model of Hardened Concrete // ACI Journal. – 1963. – №3. – P. 371-378.
16. Квернадзе А.М. Изучение твердения и усадки бетона в ранней стадии методом голографической интерферометрии / А.М. Квернадзе, В.Н. Гогонидзе, Г.Г. Иванидзе, Г.А. Далакишвили // Бетон и железобетон. – 1990. – №7. – С. 19-20.
17. Грушко И.М. Активация заполнителей цементного бетона / И.М. Грушко, А.Г. Ольгинский, Ю.М. Мельник, И.Г. Львовский // Бетон и железобетон. – 1987. – №7. – С. 29-30.
18. Лучко Й.Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування / Й.Й. Лучко, В.Н. Чубріков, В.Ф. Лазар. – Львів: Каменяр, 1999. – 348 с.
19. Бартенев Г.М. Прочность и механика разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
20. Гордон С.С. Повышение однородности бетона в массовом производстве. // Повышение технологичности и снижение материалоемкости и

энергоёмкости сборного железобетона. Сб. науч. тр. / Под ред. Ю.М.Чумакова. – М.: ВНИИЖелезобетон, 1982. – 184 с..

21. Черепанов Г.Л. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1983. – 294 с.

22. Свиридов Н.В. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементях / Н.В. Свиридов, М.Г. Коваленко // Бетон и железобетон. – 1990. – №2. – С. 21-22.

23. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая шк., 1991. – 288 с.

24. Добуш И.М. Экспериментальные исследования выносливости наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов без предварительного напряжения: Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Львов, 1987. – 14 с.

25. Ромалис Н.Б. Разрушение структурно-неоднородных тел / Н.Б. Ромалис, В.П. Тамуж. – Рига: Зинатне, 1989. – 224 с.

26. Холмянский М.М. Несущая способность бетона и место линейной механики разрушения в её прогнозе // Бетон и железобетон. – 1984. – №7. – С. 38-39.

27. Выровой В.Н. Способ выявления трещин в бетонных и железобетонных конструкциях на неорганическом вяжущем / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, С.С Макарова, С.А. Абакумов / Полож. реш. №5008907/33 (059304) от 03.07.91.

28. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. [Электронный ресурс: <http://vsegost.com/Catalog/14/14718.shtml>]

29. Серьезнов А.Н. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте / А.Н. Серьезнов, А.К. Машурин. – М: Изд-во МАИ, 1990. - 200с.

30. ДСТУ Б В.2.7-226:2009 «Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності».

31. Биргер Х. Фотоупругость. В сб. «Экспериментальная механика». Кн.1 Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990, с. 195-327.
32. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. М.: Мир, 1970.
33. Introduction to stress analysis by the photostress method. Tech Note 702. Vishay Measurements Group, Inc. Raleigh, North Carolina, 1989.
34. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах М.: Наука, 1996.
35. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции: Структура, самоорганизация, свойства / В. Н. Выровой., В. С. Дорофеев., В. Г. Суханов ; под ред. В. Н. Вырового. – Одесса : 2010. – 91 с.
36. Griffith A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids // Phil. Trans. Roy. Soc., London. 1920. V. A221. P. 162-198.245.
37. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А.. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – 92 с.
38. Atkinson C., Eshelby J. D. The flow of energy into the tip of a moving crack// Int. J. Fracture Mechanics. 1968. V. 4. No. 1. P. 3-18.
39. Eshelby J. D. The Force on an Elastic Singularity // Phil. Trans. Roy. Soc., London. 1951. V. A244. P. 87-112.
40. Gunter W. Uber einige Randintegrale der Elasto-Mechanik // Abh. Braunsch. Wiss. Ges.1962. H. 14. S. 53-72.
41. Noether E. Invariante Variationsprobleme // Kgl. Ges. Wiss. Nachr. Gottingen. Math.-Physik. Kl. 2. 1918. S. 235-257.
42. Atkinson C., Eshelby J. D. The flow of energy into the tip of a moving crack// Int. J. Fracture Mechanics. 1968. V. 4. No. 1. P. 3-18.
43. Freund L. B. Energy flux into the tip of an extending crack in an elastic body // J. Elasticity.1972. V. 2. P. 341-349.

44. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. / Г. П. Черепанов – М.: Наука, 1974. – 640 с.
45. Fletcher D. C. Conservation laws in linear elastodynamics // Arch. Rat. Mech. Anal. 1976.V. 60. P. 329-353.
46. Atluri S. N., Nishioka T. Path-independent integrals, energy release rates and general solutions of near-tip fields in mixed mode dynamic fracture mechanics// Engn. Fracture Mechanics. 1983. V. 18. P. 1-22.
47. Ehrlacher A. Path-independent Integral for the Calculation of the Energy-release Rate in Elastodynamics / In: Advances in Fracture Research. CFA Paris, Fracture 81, 1981. Ed. D. Francois. V. 5. P. 2187-2194.
48. Knowles J. K., Sternberg E. On a class of conservation laws in linearized and finite elastostatics // Arch. Rat. Mech. Anal. 1972. V. 44. P. 187-211.
49. Olver P. J. Conservation laws in elasticity I. General results// Arch. Rational Mech. Anal.1984. V. 85. P. 119-129.
50. Rice J. R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1968. No. 35. P. 379-386.
51. Черепанов Г. П. О распространении трещин в сплошной среде / Г. П. Черепанов // Прикл. матем. и механика. 1967. – Т. 31. – Вып. 3. – С. 476-488.
52. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. / Г. П. Черепанов // М.: Наука, 1974. 640 с.
53. Rice J. R. Conserved Integrals and Energetic Forces/ In: Fundamentals of Deformation and Fracture. Eshelby Memorial Symposium, Sheffield 2-5 April, 1984. Eds. B. A. Bilby et al. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. P. 33-56.
54. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле // Прикладная механика. 1959. Т. 5. №4. С. 391-401.

55. Dugdale D. S. Yielding of steel sheets containing slits// J. Mech. Phys. Solids. 1960. V. 8. No. 2. P. 100-104.
56. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – С. 87-97.
57. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – 97-98 с.
58. Wei R. P. Fracture Mechanics. Integration of Mechanics, Materials Science and Chemistry. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. –232 p.
59. Duality. Symmetry and symmetry lost in solid mechanics. Selected works of H.D. Bui / Eds. A. Ehrlacher, H. Markenscoff. – Paris: Presses des Ponts, 2011. – 396 p.
60. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2012. – 552 с.
61. Kuna M. Finite Element in Fracture Mechanics. Theory-Numerics-Applications. – Dordrecht: Springer, 2013. – 336 p.
62. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / под ред В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.
63. Яковлева Е. М. Краевые задачи о смешанном нагружении тел с разрезами с учетом накопления рассеянных повреждений в связанной постановке: Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - Самара, 2016. - 3 с.
64. Шлянников В.Н., Кислова С.Ю. Параметры смешанных форм-деформирования для трещины в виде математического разреза // Известия Саратовского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2009. – Т. 9. – Вып. 1. – С. 77–84.

65. Шлянников В.Н., Кислова С.Ю., Туманов А.В. Поля напряжений в вершине наклонных трещин образцов различных геометрий // Труды Академэнерго. – 2013. – № 2. – С. 79–90.
66. Шлянников В.Н. Решение задач нелинейного деформирования и разрушения материалов при сложном напряженном состоянии // Физическая мезомеханика. – 2012. – № 1. – С. 57–67.
67. Развитие пластических зон и поврежденности при различных видах нагружения / Л. Р. Ботвина, Н. А. Жаркова, М. Р. Тютин, А. П. Солдатенков, Ю. А. Демина, В. П. Левин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 5. – С. 46–55.
68. Hello G., Tahar M.B., Roelandt J.M. Analytical determination of coefficients in crack-tip stress expansions for a finite crack in an infinite plane medium // International Journal of Solids and Structures. – 2012. – Vol. 49. – P. 556–566.
69. Шлянников В. Н., Захаров А. П., Герасименко А. А. Характеристики циклической трещиностойкости стали СТ-3 при двухосном нагружении // Труды Академэнерго. – 2013. – № 4. – С. 91–101.
70. Степанова Л. В., Адылина Е. М. Автомодельное решение задачи о смешанном деформировании пластины с трещиной в среде с поврежденностью // Вестник Самарского государственного университета. – 2013. – № 9.1 (110). – С. 76–93.
71. Ломакин Е. В., Мельников А. М. Пластическое плоское напряженное состояние тел, свойства которых зависят от вида напряженного состояния // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 48–64.
72. Ломакин Е. В., Мельников А. М. Задачи плоского напряженного состояния тел с вырезами, пластические свойства которых зависят от вида напряженного состояния // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1. – С. 77–94.

73. Мельников А. М. Плоское напряженное состояние полосы из материала, свойства которого зависят от вида напряженного состояния // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – С. 2352–2353.

74. Вильдеман В. Э., Ломакин Е. В., Третьяков М. П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Изв. РАН. МТТ. – 2014. – № 1. – С. 26–36.

75. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций: Моногр. / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. – О.: Город мастеров, 1998.– 19 с.

76. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции: Структура, самоорганизация, свойства / В. Н Выровой., В. С. Дорофеев., В. Г. Суханов ; под ред. В. Н. Вырового. – Одесса : 2010. – С. 133-135.

77. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М. : Изд-во АН СССР, 1954. – 648 с.

78. Уфлянд Я. С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости / Я. С. Уфлянд. – Л.: Наука. Ленингр. отд., 1967. – 402 с.

79. Williams M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack / M. L. Williams // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1975. – V. 24. – P. 109-114.

80. Выровой В. Н. Способ выявления трещин в бетонных и железобетонных конструкциях на неорганическом вяжущем / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, С.С Макарова, С.А. Абакумов / Полож. реш. №5008907/33 (059304) от 03.07.91.

81. ДСТУ Б В.2.7-214: 2009 «Будівельні матеріали.Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками».

82. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. СТУ Б В.2.7-170:2008. «Бетони. Методи визначення середньої щільності, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності».
83. Пушкарь Н.В. Технологическая поврежденность и работа железобетонных конструкций на физико-механические характеристики бетона // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вып. №8. – Ровно, 2002. – с. 25-30.
84. Griffith A. A. The Theory of Rupture // Proc. of First Int. Congress of Applied Mechanics. Delft, 1924. P. 55-63.
85. Irwin G. R. Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1957. V. 24. P. 361-364. 247
86. Irwin G. R. Fracture / In: Springer Encyclopedia of Physics. V. 6. 1958. P. 551-590.
87. Orowan E. Fundamentals of brittle behaviour of metals/ In: Fatigue and Fracture of Metals. New York: Wiley, 1952. P. 139-167.
88. Астафьев В.А. Нелинейная механика разрушения / В.А.. Астафьев, Ю.Н. Радаев., Л.В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – 89 с.
89. Качанов Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. - М.: Наука, 1974. – с. 235-236.
90. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – С. 171-174.
91. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – 83 с.
92. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – С. 87-97.

93. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – С. 59-60.
94. Степанова Л. В. Математические методы механики разрушения / Л. В. Степанова. – М.: Физмалит, 2009. – 336 с.
95. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / В. А. Астафьев, Ю. Н. Радаев., Л. В. Степанова. – Самара : Издательство «Самарский университет», 2001. – С. 60-62.
96. Wood W. A. Recent observations on fatigue fracture in metals. ASTM STP. – 1958. – Vol. 237.– P. 110 – 121.
97. Tetelman A. S., MacEvily A. J. Fracture of structural materials. – N. Y.: John Wiley, 1967. – 697 p.
98. Степанова Л. В. Математические методы механики разрушения / Л. В. Степанова. - Самара : Самарский ун-т, 2006. – 336 с.
99. Степанова Л. В. Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в условиях циклического нагружения / Л. В. Степанова // Самара: Вестн. Самарского государственного ун-та, 2011. – № 2 (83). – С. 105-115.
100. Murakami S. Continuum Damage Mechanics. A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. — Dordrecht : Springer, 2012. – 423 p.
101. Адылина Е.М. Численный метод построения спектра собственных значений нелинейной задачи, следующей из одной проблемы смешанного деформирования пластины с трещиной / Е.М. Адылина // Вестник Сам ГУ. Естественнонаучная серия, 2013. – № 6(107). – С. 70–83.
102. Леонов М.Я., Панасюк В.В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле// Прикладная механика. 1959. Т. 5. №4. С. 391-401.
103. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits// J. Mech. Phys. Solids. 1960. V. 8. No. 2. P. 100-104.

104. Баренблатт Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. Общие представления и гипотезы. Осесимметричные задачи// Прикл. матем. и механика. 1959. Т. 23. Вып. 3. С. 434-444.

105. Баренблатт Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. Прямолинейные трещины в плоских пластинах// Прикл. матем. и механика. 1959. Т. 23. Вып. 4. С. 706-721.

106. Баренблатт Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. Устойчивость изолированных трещин// Прикл. матем. и механика. 1959. Т. 23. Вып.5. С. 893-900.

107. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits// J. Mech. Phys. Solids. 1960. V. 8. No. 2. P. 100-104.

ДОДАТОК 1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з НІР


 Валерій МАРКОВ
 «25» 03 2021 р.

АКТ ВІПРОВАДЖЕННЯ

в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Зінченко Г.В. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Зінченко Ганни Валеріївни на тему «Напружено-деформований стан і руйнування технологічно пошкоджених залізобетонних конструкцій» використовувались в навчальному процесі на факультеті Водотранспортних і шельфових споруд (кафедра «Цивільна інженерія та архітектура») при виконанні наукових магістерських робіт спеціальностей 192 "Будівництво та цивільна інженерія".

Начальник Навчально-методичного відділу
ОНМУ



Ігор ГЕРАСИМОВ

Декан факультету
Водотранспортних та шельфових споруд
к.т.н., доцент



Ігор МИРОНЕНКО

ДОДАТОК 2

Міністерство освіти і науки України
 Одеський національний морський університет
 Науково-дослідний інститут фундаментальних та прикладних досліджень
 65029, м.Одеса, вул.Мечникова, 34; тел.(048) 732-16-86; факс (0482) 732-16-23

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи ОНМУ

Олексій НЕМЧУК

22.05.2024р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Зінченко Г.В.

на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук

Даним актом підтверджуються, що результати дисертаційної роботи Зінченко Ганни Валеріївни на тему «Напружено-деформований стан і руйнування технологічно пошкоджених залізобетонних конструкцій» використовувались при виконанні фундаментального наукового дослідження 0117U000617 на тему «Теоретичні основи оцінки природних і техногенних ризиків під час будівництва та експлуатації портових і шельфових споруд» в 2017-2019 роках в науково-дослідному інституті фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету. При розробці фундаментального дослідження Зінченко Ганна Валеріївна виконувала обов'язки, як одного з авторів та відповідального виконавця на протязі трьох років.

Декан факультету
 водотранспортних та
 шельфових споруд
 к.т.н., доцент



Ігор МИРОНЕНКО

Директор НДІФ та ПД ОНМУ
 д.т.н., професор



Костянтин СТУПІЧ