

**ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕБЕТОННОЇ БАЛКИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЦИКЛІЧНОЇ ДІЇ ЗНАКОЗМІННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ**

**DEFINITION OF STRESS-STRAIN STATE OF A REINFORCED CONCRETE BEAM TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF CYCLIC EFFECTS OF ALTERNATING TEMPERATURE.**

**Грицевич А., магістр, [orcid.org/0009-0009-6207-2126](https://orcid.org/0009-0009-6207-2126) (ТзОВ Техексперт-Захід, Україна, м. Львів)**

**Фамуляк Ю., к.т.н., доцент, [orcid.org/0000-0003-3044-5513](https://orcid.org/0000-0003-3044-5513), (Львівський національний університет природокористування, Україна, м. Дубляни)**

**Hrytsevych A., master's degree, [orcid.org/0009-0009-6207-2126](https://orcid.org/0009-0009-6207-2126) (LLC Techexpert-Zahid, town of Lviv)**

**Famulyak Yu., candidate of technical sciences, associate professor, [orcid.org/0000-0003-3044-5513](https://orcid.org/0000-0003-3044-5513), (Lviv National Environmental University, town of Dubliany)**

**В статті представлено метод вибору розрахункової моделі та результати експериментального дослідження роботи сталобетонних балок під статичним навантаженням та циклічної дії знакозмінної температури, а також аналіз негативного впливу знакозмінних температурних навантажень на сталобетонні балки.**

**The article presents a method for selecting a design model and the results of experimental investigation of the behavior of steel-reinforced concrete beams under static loading and cyclic exposure to fluctuating temperature, as well as an analysis of the negative impact of fluctuating temperature loads on the steel-reinforced concrete beams.**

**The methodology for frost resistance calculation in Ukraine is limited to testing concrete cubes, which does not consider the presence of reinforcement in the structure, as well as its quantity and location in the cross-section. With Ukraine transitioning to European design standards, this issue has become even more relevant. According to the Eurocode requirements, the amount of transverse reinforcement in the support zone increases compared to national design standards.**

**To develop a mathematical model for reinforced concrete, steel-reinforced concrete, and other heterogeneous structures, it is necessary to select the appropriate methodology and calculation algorithm that considers various**

**physico-mechanical properties of materials in conjunction with other influences. For this purpose, numerical modeling software employs various techniques for constructing finite element meshes and calculation algorithms, enabling the widespread application of numerical models across different fields.**

**The process of thermal testing and operation of reinforced concrete elements in building structures and engineering systems is accompanied by external influences of various physical nature. However, the most significant ones from a practical point of view are non-uniform thermal actions.**

**The non-uniformity of the temperature field in a heterogeneous system leads to the occurrence of thermal stresses, which can cause structural failure, often accompanied by a loss of its functionality.**

**Modern methods for assessing the condition of concrete and reinforced concrete structures are based on a model that treats them as a monolithic homogeneous continuum with certain averaged properties [1-3]. However, such an approach to evaluating the performance of reinforced concrete structures is highly approximate and involves a number of significant simplifying assumptions.**

**Ключові слова:** теплопровідність, сталобетонна балка, температура зовнішнього середовища, знакозмінна температура, поперечна сила.  
thermal conductivity, reinforced concrete beam, ambient temperature, alternating temperature, transverse force.

**Вступ.** З розвитком електронно-обчислювальної техніки та програм математичного моделювання стало можливим більш точно проводити аналіз напружено-деформованого стану конструкцій, виготовлених з різних матеріалів. Використання програм числового моделювання дозволяє одночасно задавати декілька видів навантажень в поєднанні з іншими впливами, такими як температура, швидкість корозії та вологість, і враховувати їх циклічну дію.

Для побудови математичної моделі залізобетонних, сталобетонних та інших неоднорідних конструкцій необхідно вибрати правильну методику та алгоритм розрахунку, який враховує різні фізико-механічні властивості матеріалів в поєднанні з іншими впливами. Для цього в програмах числового моделювання використовуються різні методики побудови сітки скінченних елементів та алгоритми розрахунку, що дозволяє широко застосовувати числову модель в різних галузях.

Процес теплових випробувань і експлуатації сталобетонних елементів будівельних конструкцій та інженерних систем супроводжується зовнішнім впливом різноманітної фізичної природи, однак найбільш важливим з практичної точки зору є неоднорідні теплові дії.

Нерівномірність температурного поля в неоднорідній системі спричиняє виникнення температурних напружень, які спроможні викликати руйнування конструкції, як правило, сумісно з втратою її експлуатаційної надійності.

Сучасні методи оцінки стану бетонних і залізобетонних конструкцій базуються на основі моделі, яка трактує їх як монолітний моногенний континуум з деякими усередненими властивостями [1-3]. Однак така методика оцінки надійності сталобетонних конструкцій є вельми наближеною і містить низку суттєвих спрощувальних припущень.

Використання програм математичного моделювання дозволяє більш точно та ефективно виконувати аналіз напружено-деформованого стану конструкцій, враховуючи різні впливи та умови експлуатації, що робить їх дуже корисними в різних галузях, таких як будівництво, машинобудування тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Напружено-деформований стан конструкцій можна визначити за допомогою математичного моделювання. Але щоб переконатися у їх правильності, необхідно порівняти отримані результати з експериментальними даними. Числова модель залізобетонної балки, що була створена за допомогою програмного забезпечення ANSYS 13.0, показала збіжні результати порівняно з експериментальними даними та математичним розрахунком [1, 2].

За результатами експериментальних досліджень на морозостійкість бетонних кубиків було виявлено, що несуча здатність дослідних зразків на стиск має відхилення від нормативних значень не більше 8 %, отже дані зразки відповідають зазначеній марці на морозостійкість. Під час дослідження морозостійкості сталобетонних балок було виявлено, що несуча здатність зразків знизилась на 12,57 ... 43,54 % в залежності від класу бетону, після 30 циклів поперемінного замороження та відтаювання, що не відповідає зазначеним характеристикам морозостійкості [3].

Вивчення температурних полів і зумовлених ними напружень в сталобетонних елементах конструкцій є важливою проблемою технологічної термомеханіки і необхідне для вирішення низки технологічних задач різноманітних галузей сучасної техніки, а особливо будівельної індустрії. Попри те, що цемент Portland є складником якісних та універсальних будівельних матеріалів, все ж виникає необхідність поліпшення їх конструктивних властивостей: міцності, щільності, пластичності, витривалості.

Поведінка гетерогенних середовищ вивчається з позицій механіки суцільних середовищ, в рамках якої, однак дуже важко врахувати всі ефекти, притаманні композитам, які містять велику кількість дискретних фаз. Тому використовують ідеалізовані геометричні моделі гетерогенних систем, які дають змогу отримувати аналітичні оцінки макроскопічних властивостей неоднорідних континуумів через геометричні і фізичні характеристики складових їх фаз. Зокрема, в роботах [4-6] запропоновано підхід до побудови

розв'язків крайових задач дифузії домішкової речовини та виконано оцінку концентрації в багатофазних стохастично-неоднорідних тілах.

Слід відзначити, що навіть вивчення тільки температурних полів є важливою самостійною технічною задачею, до числа яких можна віднести питання теплової стійкості стін і промерзання основ споруд і будівель.

**Постановка мети і задач досліджень.** Метою проведення експериментальних випробувань є дослідження впливу циклічної дії знакозмінної температури на напружено-деформований стан сталобетонних конструкцій, які працюють на згин та вивчення поведінки сталобетонних балок в умовах нестационарного вимушено-конвективного теплообміну в умовах періодичної зміни в часі зовнішньої температури.

Для досягнення цієї мети була розроблена програма експериментальних випробувань, а також проведено проектування дослідних зразків балок.

Випробування балок включало:

- дослідження несучої здатності стиснутої зони;
- дослідження зсуву зовнішнього штабового армування;
- визначення прогину;
- аналіз швидкості промерзання;
- вплив корозійних процесів на несучу здатність та тріщиностійкість.

Програма досліджень передбачала вирішення наступних задач:

- визначити вплив досліджуваних факторів на несучу здатність, характер руйнування балок, утворення тріщин та величину руйнуючої сили;
- проаналізувати результати випробувань;
- розробити єдину розрахункову модель та пропозиції з вдосконалення методів розрахунку сталобетонних балок, що працюють в середовищі знакозмінної температури.

Дослідження балок включало п'ять різних умов:

1. Навантаження балок при температурі  $+18^{\circ} \dots +25^{\circ}\text{C}$ ;
2. Навантаження балок після десяти циклів замороження і відтаювання не пізніше ніж на 5 добу;
3. Навантаження балок після двадцяти циклів замороження і відтаювання не пізніше ніж на 5 добу;
4. Навантаження балок після тридцяти циклів замороження і відтаювання не пізніше ніж на 5 добу;
5. Випробування балок після 20 циклів занурення у 5 % соляний розчин (NaCl) при температурі  $+18 \pm 4^{\circ}\text{C}$  на 36 год.

**Методика досліджень.** Для визначення негативного впливу знакозмінної температури на несучу здатність сталобетонних конструкцій авторами були проведені експериментальні дослідження сталобетонних балок, бетонних кубиків та призм. Дослідні зразки сталобетонних балок з зовнішнім штабовим армуванням виготовлялися на заводі ВАТ Домобудівельний комбінат № 2, с. Муроване, Пустомитівського району, Львівської області. Конструкція дослідних зразків представлена на рис. 1.



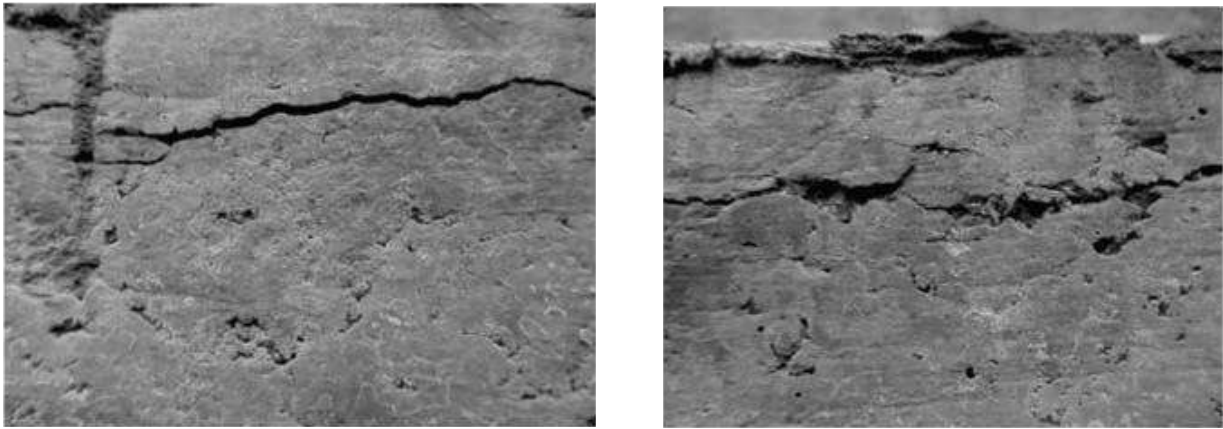


Рис. 3. Температурно-корозійні тріщини внаслідок впливу знакозмінної температури у дослідних балках серії Б1 (бетон С12/15)

Розроблення підходу до вивчення процесів розповсюдження тепла в гетерогенному середовищі, що має вигляд  $n$  –компонентної системи частинок, які в значній кількості є складовими цієї системи і рівномірно розподілені в ній. Розміри цих частинок, малі порівняно з об'ємом досліджуваної системи, однак, припускаються вельми великими порівняно з молекулярними розмірами, так що до частинок кожної з компонент можна стосувати закон розповсюдження тепла Фур'є. Отже, маємо тіло, що складено з двох різних за густиною фаз – матриці і кульових включень (рис. 4), причому теплофізичні параметри цих фаз суттєво різняться.

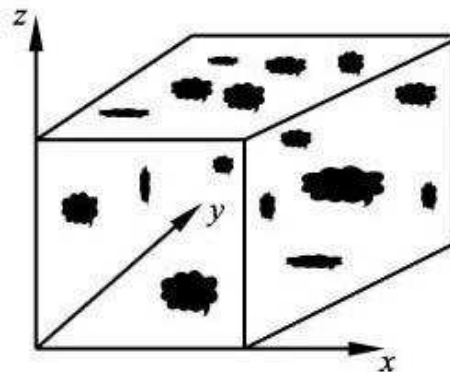


Рис. 4. Реалізація гетерогенної структури тіла

Також вважатимемо, що точна геометрична конфігурація фаз в області тіла наперед невідома. Типовим прикладом такого гетерогенного середовища може слугувати ґрунт, а також сюди можна віднести будівельні розчини і бетони.

Внаслідок періодичності коливань температури зовнішнього середовища її зміну можна подати у вигляді залежності:

$$T(M, t) = T_0 + \Delta T_0 e^{i\omega t},$$

де  $M$  – гранична точка поверхні з фіксованими координатами;

$\omega$  – частота коливань;

$T_0$  – середня за період коливань температура;

$\Delta T_0$  – амплітуда коливань на вході конструктивного елемента.

Наступним етапом має стати формулювання рівнянь розповсюдження тепла в описаному гетерогенному середовищі, яке адекватне реальному експлуатаційному континууму та побудова сітки скінченних елементів.

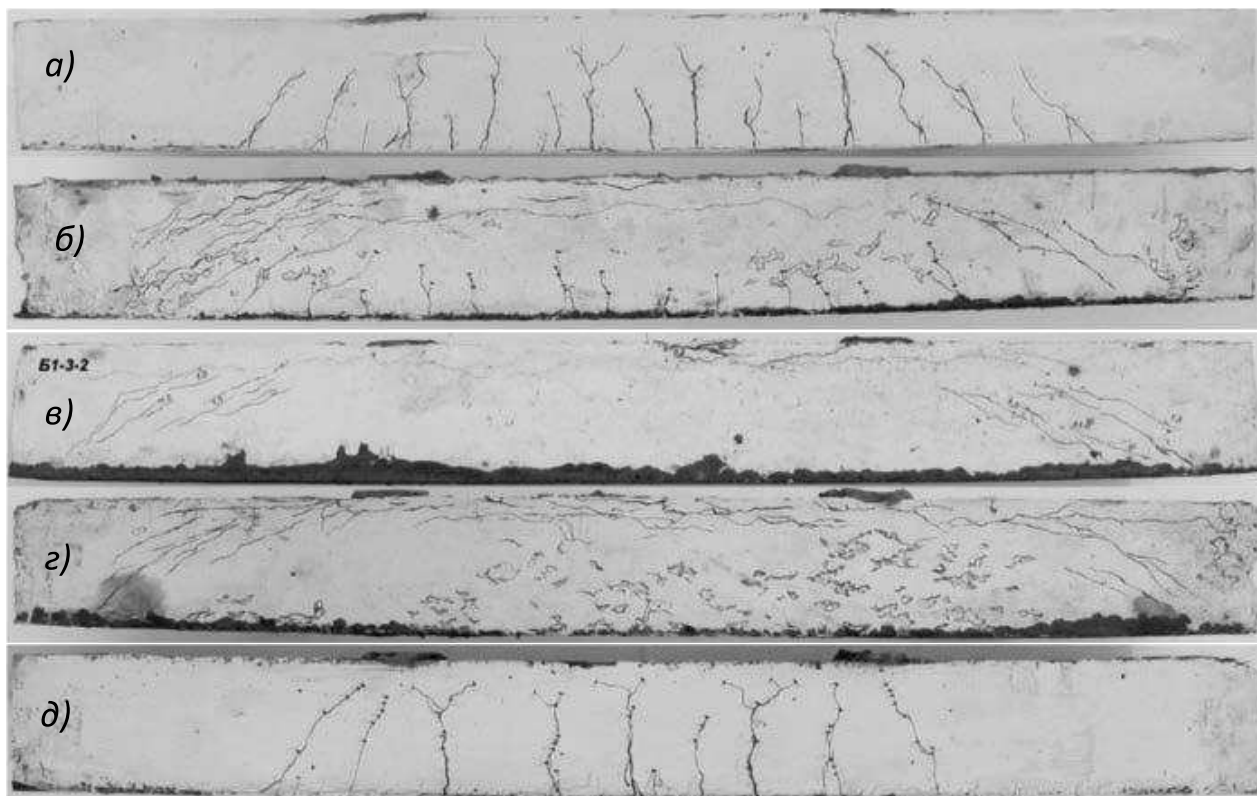


Рис. 5 Вид балок серії Б1 після випробувань:

- a) не піддавалися температурним впливам;*
- б) 10 циклів заморозження-відтаювання;*
- в) 20 циклів заморозження-відтаювання;*
- г) 30 циклів заморозження-відтаювання;*
- д) поміщалися в 5% соляний розчин на період промерзання 20 циклів*

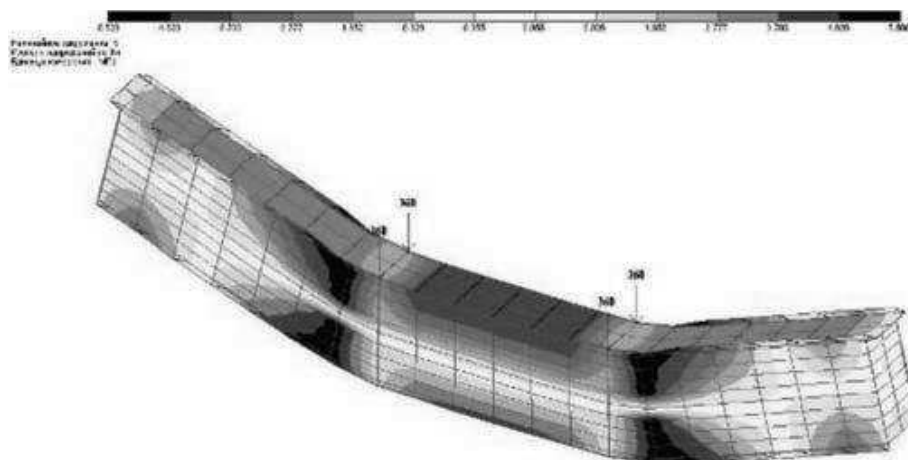


Рис. 6. Модель напружено-деформованого стану сталобетонної балки

На основі проведених експериментальних досліджень зроблено узагальнення несучої здатності сталобетонних балок та виявлено вплив знакозмінної температури на роботу таких конструкцій.

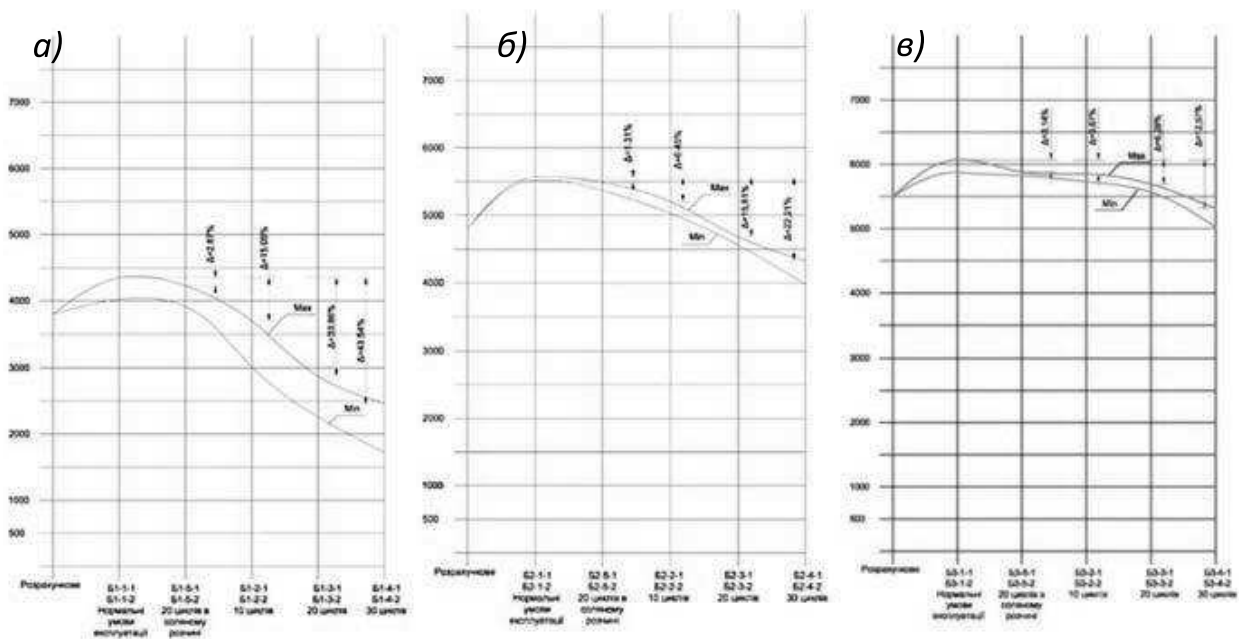


Рис. 7. Графіки залежності втрати несучої здатності сталобетонних балок:  
 а) сталобетонні балки виготовлені з бетону класу С12/15;  
 б) сталобетонні балки виготовлені з бетону класу С20/25;  
 в) сталобетонні балки виготовлені з бетону класу С30/35

Несуча здатність балки з бетону класу С12/15 зменшилась на 43,54 %, кубика з цього ж класу бетону – на 17,89 %; несуча здатність балки з бетону класу С20/25 зменшилась на 22,21 %, кубика з цього ж бетону – на 9,7 %; несуча здатність балки з бетону класу С30/35 зменшилась на 12,57 %, а кубика відповідно на 6,83 %.

**Висновки.** Експериментальні дослідження дозволили отримати якісну картину температурних полів промерзання поперечного перерізу сталобетонних балок. Несуча здатність сталобетонної балки з бетону класу С12/15 зменшилась на 43,54 %, кубика з цього ж класу бетону – на 17,89 %; несуча здатність балки з бетону класу С20/25 зменшилась на 22,21 %, кубика з цього ж бетону – на 9,7 %; несуча здатність балки з бетону класу С30/35 зменшилась на 12,57 %, а кубика відповідно на 6,83 %. Результати числового моделювання підтверджують дані отримані підчас експериментальних досліджень сталобетонних балок.

В процесі заморожування металеві елементи поперечного перерізу (поздовжнє та поперечне армування) виступають своєрідними «концентраторами» зміни температур, що впливають на нерівномірність промерзання перерізу.



В процесі заморожування-відтаювання виникають мікротріщини на межі з'єднання металевих елементів з бетоном та безпосередньо в піщано-цементному камені ще до статичного навантаження конструкції. Їх кількість та розміри залежать від класу бетону, кількості температурних циклів та наявності армування.

Процеси заморожування-відтаювання сталобетонних балок змінюють характер їх руйнування не залежно від класу бетону.

За результатами експериментальних досліджень впливає недоцільність використання бетонів низьких класів в сталобетонних конструкціях, на які циклічно впливають знакозмінні температури.

1. Badiger, Neha S. and Kiran M. Malipatil. "Parametric Study on Reinforced Concrete Beam using ANSYS." *Civil and environmental research* 6 (2014): 88-94.

2. Tjitradi, Darmansyah & Eliatun, Eliatun & Taufik, Syahril. (2017). 3D ANSYS Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beam Behavior under Different Collapsed Mechanisms. 7. 14-23. 10.5923/j.mechanics.20170701.02.

3. Famulyak, Yuriy & Hrytsevych, Andriy & Sobczak-Piastka, Justyna. (2019). Influence of Freeze-Thaw Temperature on Load-Bearing Capacity of Steel-Concrete Beams Carrying Transverse Loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 362. 012115. 10.1088/1755-1315/362/1/012115.

4. Чернуха О.Ю. Про вертикальну дифузію домішки к багатофазному стохастично-неоднорідному шарі / О.Ю. Чернуха // *Мат. методи і фіз.-мех. поля.* – 2000. – Вип. 43, № 3. – С. 140–145.

5. Chernucha O. On diffusion processes in two-phase random nonhomogeneous stratified semispace / O. Chernucha // *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* – 2001. – Vol. 44. – P. 2535–2539.

6. Lydzba D. Homogenisation theories applied to porous media mechanics / D. Lydzba // *J. Theor. and Appl. Mechanics.* – 1998. – Vol. 36, N 3. – P. 657–679.