

УДК 004.94:624.046:624.012.25

ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ РОБОТИ РЕСУРСОЩАДНИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ РОБОТИ

TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEARITIES OF RESOURCE-SAVING STEEL-CONCRETE STRUCTURES DURING FINITE ELEMENT MODELING OF THEIR OPERATION

Гасенко А.В., д.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-1045-8077; Крижанівський Я.С., аспірант, ORCID 0009-0001-4252-5919 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Hasenko A.V., Doctor of Technical Sciences, Associate professor, ORCID 0000-0003-1045-8077; Kryzhanivskiy Ya.S., Postgraduates Student, ORCID 0009-0001-4252-5919 (National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»)

На основі аналізу можливостей врахування нелінійностей роботи композитних конструкцій встановлено, що програмні комплекси LIRA-SAPR та SCAD Office мають найбільш розвинуті інструменти для моделювання генетичної нелінійності; а ANSYS, ABAQUS та FEMAP – можливості щодо моделювання фізичної нелінійності та пошкоджень.

A distinctive feature of steel-reinforced concrete elements is the combined operation of materials with different physical and mechanical properties and different deformation laws. In particular, it is known that steel behaves linearly in the elastic stage of its operation, while concrete deforms non-linearly practically from the initial stages of loading. The multi-stage creation of steel-reinforced concrete structures, when the steel part can independently absorb the load from the freshly laid monolithic concrete part during creation, causes a complex redistribution of internal forces over time, or so-called genetic nonlinearity. Numerical calculation methods, in particular the finite element method, create new opportunities for modeling complex stress-strain states of steel-reinforced concrete structures, taking into account the specified nonlinearities. The choice of software package for a specific study should be made taking into account the specifics of the task, the required level of modeling detail, the availability of software, and experience with the relevant software product. A comparative analysis of the capabilities of finite element modeling software packages showed that the LIRA-SAPR software package has the most advanced and convenient tools for modeling the stages of construction of

building structures, setting initial stresses in structural components before combining them into a single calculation scheme, i.e., taking into account genetic nonlinearity thanks to specialized step processors. The universal software packages ANSYS, ABAQUS, and Femap with NX Nastran have broader capabilities for modeling physical nonlinearity and material damage, but modeling the stages of structural manufacturing in these software packages is less convenient and requires more detailed configuration of the sequence of calculation steps.

Ключові слова: будівництво, сталезалізобетон, нелінійність, моделювання, дискретність, аналіз, софт.
construction, steel-reinforced concrete, nonlinearity, modeling, discreteness, analysis, software.

Вступ. Особливістю сталезалізобетонних елементів є сумісна робота матеріалів з різними фізико-механічними властивостями та з різними законами деформування. Зокрема як відомо, сталь в пружній стадії своєї роботи працює лінійно, а бетон практично з початкових етапів навантаження деформується по нелінійній залежності [1]. Декількоетапність створення сталезалізобетонних конструкцій, коли ще під час створення сталевих частини може самостійно сприймати навантаження від свіжевкладеної монолітної бетонної частини, зумовлює складний перерозподіл внутрішніх зусиль у часі, або так звану генетичну нелінійність. Крім цього, для підвищення міцності та жорсткості вказаних композитних конструкцій, можливе створення попередніх напружень як у сталевих елементах (затяжках, шпренгелях, попередньо вигнутих балках), так і в бетоні [2]. При цьому їх вплив проявляється в зміні початкового напружено-деформованого стану перерізу ще до прикладання експлуатаційних навантажень. Чисельні методи розрахунку, зокрема метод скінченних елементів, створюють нові можливості для моделювання складних напружено-деформованих станів сталезалізобетонних конструкцій з урахуванням генетичної нелінійності [3].

Аналіз останніх досліджень. У чисельних моделях попередні напруження, як правило, враховуються шляхом задавання початкових напружень або деформацій у відповідних компонентах конструкції. Такий підхід дозволяє відобразити вплив натягу арматури, затяжок або обтиснення бетонного ядра на розподіл нормальних і дотичних напружень, а також на розвиток тріщин і прогинів [4]. Разом із тим ускладнення розрахункових моделей пов'язане з необхідністю урахування повзучості та усадки бетону, а також фізичної нелінійності матеріалів.

Узагальнення існуючих теоретичних розробок дозволяє класифікувати підходи до врахування попередніх напружень у згинаних сталезалізобетонних конструкціях за кількома ознаками [5]. За способом урахування початкового напруженого стану розрізняють підходи, в яких попередні напруження задаються у вигляді початкових напружень або деформацій у сталевих і

бетонних компонентах, а також методи, що базуються на введенні еквівалентних зусиль у розрахункову схему. За рівнем деталізації виділяють аналітичні методик з спрощеними гіпотезами та чисельно-аналітичні моделі, що дозволяють урахувати фізичну нелінійність матеріалів. Окрему групу становлять підходи, засновані на поетапному аналізі, які враховують стадійність виготовлення, повзучість і усадку бетону та еволюцію напружено-деформованого стану в часі. При цьому вибір конкретного підходу до теоретичного врахування попередніх напружень визначається типом конструкції, способом формування початкового напруженого стану та поставленими задачами аналізу.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що існуючі аналітичні методик часто базуються на спрощених гіпотезах щодо характеру розподілу попередніх напружень і не завжди дозволяють повною мірою врахувати генетичну нелінійність роботи сталезалізобетонних конструкцій [6]. Це зумовлює розбіжності між теоретичними прогнозами та експериментальними результатами, особливо для конструкцій із регульованими або самоформованими початковими напруженнями.

Таким чином, удосконалення підходів до теоретичного врахування нелінійної роботи компонентів згинаних сталезалізобетонних конструкцій є актуальним науково-практичним завданням. Воно потребує розвитку розрахункових моделей, здатних адекватно відображати початковий напружено-деформований стан і його еволюцію на різних стадіях роботи конструкції, що безпосередньо пов'язано з подальшим використанням чисельних методів аналізу [7].

Виділення невіршеної частини поставленої проблеми. Практична реалізація наведених теоретичних підходів суттєво ускладнюється для сталезалізобетонних конструкцій зі складною геометрією, регульованими або такими, що формуються в процесі виготовлення та експлуатації, початковими напруженнями, а також при наявності фізичної та геометричної нелінійності матеріалів. У таких випадках застосування спрощених аналітичних моделей є обмеженим і не завжди забезпечує достатню точність прогнозування напружено-деформованого стану.

Постановка мети і завдань досліджень. Метою роботи є аналіз можливостей врахування фізичної та генетичної нелінійностей роботи ресурсоощадних сталезалізобетонних конструкцій під час скінченно-елементного моделювання їх роботи у програмних комплексах.

Для досягнення поставленої мети сформульовані завдання досліджень:

– провести порівняльний аналіз функціональних можливостей програмних комплексів скінченно-елементного моделювання для розрахунку попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій, таких як LIRA-SAPR, SCAD Office, ANSYS, ABAQUS та Femap with NX Nastran;

– дослідити можливості програмних комплексів щодо моделювання стадійності виготовлення будівельних конструкцій з урахуванням генетичної нелінійності (початкових напружень у компонентах конструкції);

– дослідити можливості універсальних програмних комплексів щодо моделювання фізичної нелінійності та пошкодження матеріалів у сталезалізобетонних конструкціях.

Методика досліджень. Серед найбільш поширених програмних комплексів для розрахунку будівельних конструкцій методом скінченних елементів слід відзначити ANSYS, LIRA-SAPR, SCAD Office, Femap with NX Nastran, ABAQUS та інші [8; 9; 10]. Кожен із цих програмних продуктів має специфічні особливості реалізації нелінійного аналізу та різні можливості щодо врахування початкових напружено-деформованих станів конструкцій. Призначення, особливості та сфера застосування зазначених програмних комплексів подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Призначення, особливості та сфера застосування програмних комплексів скінченно-елементного моделювання будівельних конструкцій

Програма	Призначення	Особливості	Сфери застосування
LIRA-SAPR	Програма для аналізу та розрахунку будівельних конструкцій	- Моделювання складних попередньо напружених конструкцій. - Врахування нелінійної поведінки матеріалів.	Розрахунок залізобетонних конструкцій, популярна в Україні
SCAD Office	Система для розрахунку конструкцій будь-якої складності	- Аналіз генетичної нелінійності. - Розрахунок сталевих і залізобетонних елементів.	Проектування будівельних конструкцій та інфраструктурних об'єктів
FEMAP with NX Nastran	Інструмент для моделювання та аналізу скінченно-елементних моделей	- Детальне врахування нелінійності матеріалів. - Потужний розрахунковий модуль NX Nastran.	Інженерні завдання в промисловості та будівництві з високими вимогами до точності
ANSYS	Універсальний програмний комплекс для мультифізичного моделювання	- Моделі Concrete Damage Plasticity. - Контактна взаємодія з тертям та зчепленням. - Задавання початкових напружень	Складні інженерні задачі в будівництві, машинобудуванні та науково-дослідних роботах
ABAQUS	Програмний комплекс для розширеного нелінійного аналізу	- Моделі Concrete Damage Plasticity. - Накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні. - Висока точність моделювання контактних задач	Науково-дослідні роботи, складні нелінійні задачі, аналіз руйнування конструкцій

Результати досліджень. Всі програмні комплекси скінченно-елементного моделювання роботи будівельних конструкцій дозволяють задавати *нелінійні діаграми деформування матеріалів*. Для бетону зазвичай використовуються нелінійні діаграми « σ - ϵ » або аналітичні залежності, що враховують нелінійний характер роботи при стиску та розтягу, а також зниження міцності після досягнення граничних деформацій. Для арматури та сталевих елементів реалізована можливість задання діаграм з площадкою текучості або зміцненням. Програмні комплекси ANSYS та ABAQUS додатково дозволяють враховувати пошкодження матеріалів та їх накопичення в процесі навантаження через моделі Concrete Damage Plasticity та інші конститутивні моделі.

Геометрична нелінійність, пов'язана зі зміною геометрії конструкції в процесі деформування, може враховуватися в усіх розглянутих програмних комплексах шляхом активації відповідних налаштувань розрахунку. При цьому рівняння рівноваги формуються для деформованої схеми, що дозволяє враховувати вплив прогинів на внутрішні зусилля (ефекти другого порядку). Це особливо важливо для гнучких та великопрольотних конструкцій, де геометрична нелінійність може суттєво впливати на напружено-деформований стан.

Конструктивна нелінійність, пов'язана з тріщиноутворенням у бетоні, проковзуванням арматури, зміною умов обпирання тощо, може моделюватися шляхом застосування спеціальних скінченних елементів або модифікації жорсткісних характеристик. У програмних комплексах LIRA-SAPR та SCAD Office для врахування тріщиноутворення реалізовані спеціальні розрахункові процедури, що дозволяють враховувати зміну жорсткості залізобетонних елементів у процесі навантаження. Контактна взаємодія між сталевими та бетонними компонентами може моделюватися за допомогою контактних елементів у ANSYS, ABAQUS та Femap with NX Nastran.

Генетична нелінійність, що проявляється у зміні напружено-деформованого стану конструкції внаслідок історії її формування, є найбільш складною для моделювання. Для врахування генетичної нелінійності необхідна можливість задання різних початкових напружено-деформованих станів окремих компонентів конструкції до їх об'єднання в єдину систему. У програмному комплексі LIRA-SAPR для цього передбачено крокові процесори СТЕП і МОНТАЖ, що дозволяють моделювати поетапне навантаження та зміну розрахункової схеми. Аналогічні можливості реалізовані в SCAD Office через механізм стадійного розрахунку.

Стадійність виготовлення та експлуатації конструкцій може враховуватися через послідовність розрахункових кроків з різними граничними умовами, навантаженнями та властивостями матеріалів. У LIRA-SAPR та SCAD Office ця можливість реалізована найбільш зручно через спеціалізовані інструменти стадійного розрахунку. В універсальних програмних комплексах ANSYS, ABAQUS та Femap with NX Nastran

стадійність моделюється через послідовність розрахункових кроків (Load Steps, Analysis Steps), що вимагає більш детального налаштування, але забезпечує гнучкість моделювання складних технологічних процесів.

Узагальнені можливості розглянутих програмних комплексів щодо врахування різних типів нелінійності та початкових напружено-деформованих станів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Можливості програмних комплексів скінченно-елементного моделювання сталезалізобетонних конструкцій

Програмний комплекс	Фізична нелінійність	Геометрична нелінійність	Генетична нелінійність	Стадійний розрахунок	Реологічні властивості бетону
LIRA-SAPR	Повна підтримка нелінійних діаграм деформування для бетону та сталі	Урахування деформованої схеми, ефекти другого порядку	Крокові процесори СТЕП та МОНТАЖ для моделювання історії формування НДС	Нативна підтримка через спеціалізовані процесори	Моделі спадкової повзучості та усадки бетону
SCAD Office	Багатолінійні діаграми "σ-ε" для всіх матеріалів	Розрахунок на деформованій схемі	Механізм стадійного розрахунку з можливістю зміни розрахункової схеми	Нативна підтримка стадійності виготовлення	Теорія спадкової повзучості, температурна усадка
ANSYS	Моделі Concrete Damage Plasticity з урахуванням пошкодження матеріалів	Large Deflection аналіз, Updated Lagrangian формулювання	Задання початкових напружень через Initial Stress	Послідовність Load Steps з різними граничними умовами	Задання через User Subroutines (USERMAT, CREEP)
ABAQUS	Розширені моделі пошкодження CDP, Damaged Plasticity	Нелінійний геометричний аналіз NLGEOM	Predefined Fields для задання початкових станів	Послідовність Analysis Steps з можливістю зміни моделі	Користувачі підпрограми UMAT, CREEP
FEMAP with NX Nastran	Нелінійні матеріальні моделі MATS1, MATER	Geometric Nonlinearity (SOL 106, SOL 400)	Імпорт результатів попередніх кроків як Initial Conditions	Послідовність розрахункових кроків (Subcases)	Обмежена підтримка, моделювання через температурні деформації

Для врахування *реологічних властивостей бетону* в програмних комплексах LIRA-SAPR та SCAD Office реалізовані спеціальні моделі, що базуються на теорії спадкової повзучості. Програмні комплекси ANSYS та ABAQUS дозволяють задавати закони повзучості через користувацькі підпрограми (User Subroutines). Усадка бетону може моделюватися через задання температурних деформацій з відповідним коефіцієнтом температурного розширення або через спеціальні параметри матеріалу.

Крім цього, програмні комплекси ANSYS та ABAQUS дозволяють задавати *початкові напруження та деформації* через спеціальні команди (Initial Stress, Predefined Field тощо), що забезпечує можливість моделювання попередньо напружених конструкцій. У Femap with NX Nastran початкові напруження можуть задаватися через попередній розрахунковий крок з подальшим імпортом результатів як початкових умов для наступного етапу аналізу. Це дозволяє моделювати технологічну послідовність виготовлення конструкцій, зокрема встановлення тимчасових опор, поетапне бетонування, зміну граничних умов тощо.

Висновки та рекомендації. На основі порівняльного аналізу можливостей програмних комплексів скінченно-елементного моделювання роботи конструкцій встановлено, що програмні комплекси LIRA-SAPR та SCAD Office завдяки спеціалізованим кроковим процесорам мають найбільш розвинуті та зручні інструменти для моделювання стадійності виготовлення будівельних конструкцій та врахування генетичної нелінійності (початкових напружень у компонентах конструкції до їх об'єднання в єдину розрахункову схему). Універсальні програмні комплекси ANSYS, ABAQUS та Femap with NX Nastran мають більш широкі можливості щодо моделювання фізичної нелінійності та пошкодження матеріалів, однак моделювання стадійності виготовлення конструкцій у цих програмних комплексах є менш зручним і потребує детального налаштування послідовності розрахункових кроків.

Робота виконана в рамках науково-технічної роботи «Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», яка фінансується за рахунок коштів державного бюджету України (держ. реєст. № 0125U000895).

1. Крусъ Ю. О. Зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону за різних силових режимів короткочасного осового стиску. Технічні науки та технології, 2022, № 1 (27). С. 184-198.

Krus Yu. O. Zv'язok mizh napruzhennyamy i deformatsiyamy betonu za riznykh sylovykh rehymiv korotkochasnoho osovoho stysku. Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi, 2022, No. 1 (27). P. 184-198.

2. Іванік Ю. І., Демчина Б. Г. Дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій в умовах поетапної роботи. Містобудування і територіальне планування, 2016, №61. С. 50-61.

Ivanyk Yu. I., Demchyna B. H. Doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stanu stalezalizobetonnykh poperedno napruzhenykh shprenhel'nykh konstruksiy v umovakh postadiynoy roboty. Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya, 2016, No. 61. P. 50–61.

3. Kolchunov V. I., Iakovenko I. A., Dmytrenko E. A. Finite element simulation of the flat problem nonlinearity of concrete and reinforcement adhesion by PC LIRA-SAPR. Civil Building and Engineering Structures, 2016, No. 3. P. 6–15.

4. Hasenko A. V., Novytskyi O. P. Numerical experiment for the determination of the stress-strain condition of the system “Basis – Vibroreinforced soil-cement pile”. International Journal of Engineering & Technology, 2018, 7 (4.8). P. 41–47. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27211>

5. Гасенко А. В. Огляд методів створення попередніх самонапружень у згинаних просторових сталезалізобетонних конструкціях. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2022, № 41. С. 110-118. [Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди](https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.12), <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.12>

Hasenko A. V. Ohlyad metodiv stvorenniya poperednikh samonapruzhen u zghynanykh prostorovykh stalezalizobetonnykh konstruksiyakh. Resursoekonomni materialy, konstruksiyi, budivli ta sporudy, 2022, No. 41. P. 110–118. [Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди](https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.12), <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.12>

6. Азізов Т. Н., Кочкаръов Д. В. Про нелінійність деформування залізобетонних згинальних елементів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 2022, № 42. С. 62-75.

Azizov T. N., Kochkarov D. V. Pro neliniynist deformuvannya zalizobetonnykh zghynalnykh elementiv. Resursoekonomni materialy, konstruksiyi, budivli ta sporudy, 2022, No. 42. P. 62–75.

7. Kitov Yu. P., Verevicheva M. A., Vatulia G. L., Deryzemlia S. V. Design solutions of optimal systems under action of dead and live mobile load. Strength of Materials and Theory of Structures, 2018, No. 100. P. 124–139.

8. Барабаш М., Городецький Д., Ромашкіна М. Розрахунок конструкцій в нелінійній постановці ЛІРА-САПР, 2018. Взято з <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/nonlinearity-in-lira-sapr.html>.

Barabash M., Horodetskyi D., Romashkina M. Rozrakhunok konstruksiy v neliniyniy postanovtsi LIRA-SAPR, 2018. Vzyato z <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/nonlinearity-in-lira-sapr.html>.

9. Буцька О. Л., Савицький М. В. Розрахунок плоского залізобетонного збірно-монолітного перекриття з круглопустотними плитами і монолітними ригелями за допомогою ПК SCAD. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування, 2013, № 1-3.

Butska O. L., Savytskyi M. V. Rozrakhunok ploskoho zalizobetonnoho zbirno-monolitnoho perekryttya z kruhlopustotnymy plytamy i monolitnymy ryhelyamy za dopomohoyu PK SCAD. Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya, 2013, No. 1–3.

10. Моргун А. С., Сорока М. М. Розв'язання задач параметричної оптимізації будівельних конструкцій в програмному комплексі ANSYS. Вісник ВПІ. Серія: Будівництво, 2017, № 5. С. 18-23.

Morhun A. S., Soroka M. M. Rozv'iazannya zadach parametrychnoyi optymizatsiyi budivelynykh konstruksiy v prohrannomu kompleksi ANSYS. Visnyk VPI. Seriiia: Budivnytstvo, 2017, No. 5. P. 18–23.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	12.03.2026	Received	12.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	17.03.2026	Received in revised form	17.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.