УДК 004.9:624.04(045)

А. С. Потєха
В. М. Андрухов

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ДОДАТКОВОЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ЗВАЖЕНОГО УСЕРЕДНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АРМУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. *Лінійно-пружний розрахунок плит методом скінченних елементів (МСЕ) дає над колонами та біля кутів отворів локальні піки необхідного армування. Під час автоматизованого конструювання такий пік перетворюється на окрему смугу підсилення зі стрижнями великого діаметра. У роботі описано метод зваженого усереднення, розроблений у межах методу проєктування додаткового армування на основі генетичного алгоритму (ГА). Метод знаходить точки піків, будує лінію інтегрування поперек робочих стрижнів і перерозподіляє армування зі збереженням його інтеграла. На п'яти плитах, розрахованих у SOFiSTiK, ЛІРА-САПР, RFEM та Autodesk Robot, пікове армування над колонами знизилось у середньому на 20,3 %, а маса додаткової арматури – на 2,4 %. Нелінійний розрахунок у ЛІРА-САПР підтвердив, що арматура не тече.*

Ключові слова: *BIM, сингулярність, додаткове армування, МСЕ, залізобетонна плита, автоматизація проєктування, автоматизація армування, залізобетонні конструкції*

Abstract. *A linear elastic finite element (FE) analysis of slabs produces local peaks of required reinforcement above columns and near opening corners. In automated detailing such a peak turns into a separate strengthening strip with large-diameter bars. The paper describes a weighted averaging method developed within a genetic algorithm (GA) based method for the design of additional reinforcement. The method detects peak points, builds an integration line across the main bars and redistributes reinforcement while preserving its integral. On five slabs analysed in SOFiSTiK, LIRA-SAPR, RFEM and Autodesk Robot, peak reinforcement above columns decreased on average by 20.3 %, and the mass of additional reinforcement by 2.4 %. A nonlinear LIRA-SAPR analysis confirmed that the reinforcement stays below yield.*

Keywords: *BIM, singularity, additional reinforcement, FEM, reinforced concrete slab, design automation, reinforcement automation, reinforced concrete.*

Вступ

Метод зваженого усереднення розроблено в межах ГА-методу проєктування додаткового армування залізобетонних плит. Цей метод працює з уніфікованими результатами МСЕ. Програма виділяє зони, де необхідне армування перевищує фонову сітку Ø10/200, і для кожної зони генетичний алгоритм підбирає розкладку смуг. Двадцять три гени задають параметри розкладки: ширину смуги, допуски злиття, ваги уніфікації діаметрів. Усереднення виконується до запуску ГА, тож алгоритм отримує згладжене поле.

Лінійно-пружна модель не обмежує напруження в точковій опорі. Над колоною момент зростає зі згущенням сітки, а разом із ним росте пік необхідного армування. Пік не має межі. Над колоною плити slab01 один елемент вимагає 20,4 см²/м додаткової арматури, тоді як його сусіди – лише 5,0–6,3 см²/м. ГА призначає над таким піком стрижні Ø25 та окрему смугу.

Метод смуг Хіллерборга інтегрує моменти в ортогональних смугах і точно задовольняє умови рівноваги [1]. На нерегулярній сітці МСЕ така смуга завелика, і пік розтікається на всю її ширину. Pacoste та Blaauwendraad обмежують усереднення ділянкою ширини w поблизу піку [2, 3]:

$$A_{\mathrm{s,av}} = \frac{1}{w}\int_0^w A_{\mathrm{s}}\, dy \qquad (1)$$

Де: $A_{s,av}$ – усереднене армування, см²/м; w – ширина ділянки усереднення, м;

A_s – армування в точці з координатою y, см²/м.

Правила вибору w для автоматичного розрахунку в цих роботах немає. Eleftheriadis та співавтори прив'язали ширину усереднення до геометрії опори під час автоматизованого підбору армування плит [4]. Норми також допускають перерозподіл: EN 1992-1-1 дозволяє зменшити пружний момент над опорою на 15–30 % [5], а ДСТУ Б В.2.6-156:2010 враховує пластичність через нелінійні діаграми деформування [6]. Мета роботи – метод зваженого усереднення, що знижує концентраційні піки армування і зберігає сумарне зусилля в арматурі.

Основна частина

Метод складається з трьох кроків: пошук піків, побудова лінії інтегрування та перерозподіл армування. Окіл Ω_i елемента і охоплює центроїди на відстані до 1,5a, де a – крок сітки. Пік має строго перевищувати кожного сусіда й задовольняти умову (2):

$$\Delta A_{s,i} \geq \rho \cdot \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{j \in \Omega_i} \Delta A_{s,j} \tag{2}$$

Де: $\Delta A_{s,i}$ – додаткове армування елемента і, см²/м; $|\Omega_i|$ – кількість сусідів;

$\rho = 1{,}25$ – мінімальне перевищення піку над середнім значенням сусідів.

На п'яти плитах розв'язувач знайшов 346 піків. Над колонами лежать 147 з них, біля отворів – 57.

Стрижні одного напрямку працюють як паралельні смуги, тож зусилля з перевантаженої смуги переходить лише в сусідні, тобто поперек стрижнів. Тому усереднення виконується на відрізку. Ця лінія інтегрування проходить через пік перпендикулярно до стрижнів (рис. 1). Кожен елемент проєктується на лінію, і перетин проєкції з інтервалом дає довжину L_i. Довгий елемент L1 впливає на результат сильніше, ніж короткий L5.

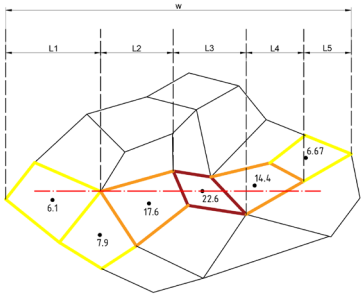


Рисунок 1 – Схема 1D-усереднення: проєкції елементів на лінію інтегрування

Довжину інтегрування визначає фізична природа піку. Над колоною момент розтікається симетрично. Колона працює як жорстка ділянка, а за її гранню зусилля згасає на відстані контрольного периметра 2d за EN 1992-1-1 [5]:

$$w = 2R_c = c_\perp + 4d \tag{3}$$

Де: R_c – півширина інтервалу, м; $c_\perp$ – розмір колони вздовж лінії, м;

$d = h - 0{,}03$ – робоча висота перерізу, м; h – товщина плити, м.

Для колони 0,30 м у плиті товщиною 200 мм $w = 0{,}30 + 4 \cdot 0{,}17 = 0{,}98$ м. Біля отвору інтервал однобічний: він починається від грані й не перевищує 3h.

Зважене середнє (4) є дискретним аналогом інтеграла (1) на нерегулярній сітці:

$$A_{s,av} = \frac{\sum_i \Delta A_{s,i} \cdot w_i \cdot L_i}{\sum_i w_i \cdot L_i} \tag{4}$$

Де: w_i – вага елемента: над колоною ядро має плато, а до країв інтервалу спадає параболою;

L_i – довжина проєкції елемента на лінію інтегрування, м.

Рівень, до якого зрізається пік, обмежує умова (5):

$$A_{s,lim} = \max\left(A_{s,av};\ 0{,}6 \cdot A_{s,max}\right) \tag{5}$$

Де: $A_{s,lim}$ – граничне армування на лінії, см²/м; $A_{s,max}$ – армування в піку, см²/м.

Множник 0,6 не дає зрізати пік нижче 60 % від початкового значення. Зрізаний об’єм розв’язувач переносить у найнижчі елементи тієї ж лінії, доки сума $\Delta A_{s,i} \cdot L_i$ не зрівняється з початковою. Арматура сприймає те саме зусилля. На рис. 2 піки 20,4 і 17,5 см²/м над колоною slab01 знизились до 15,0 см²/м, а крайні елементи зросли з 5,0–6,1 до 10,4 см²/м. Сума $\Delta A_{s,i} \cdot L_i$ в обох станах дорівнює 16,75 см².

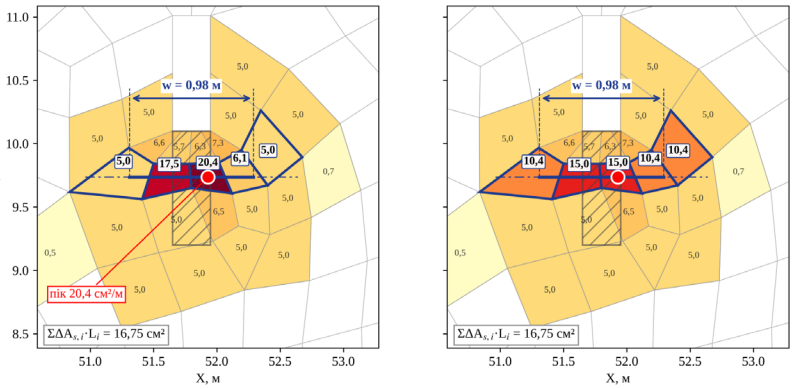


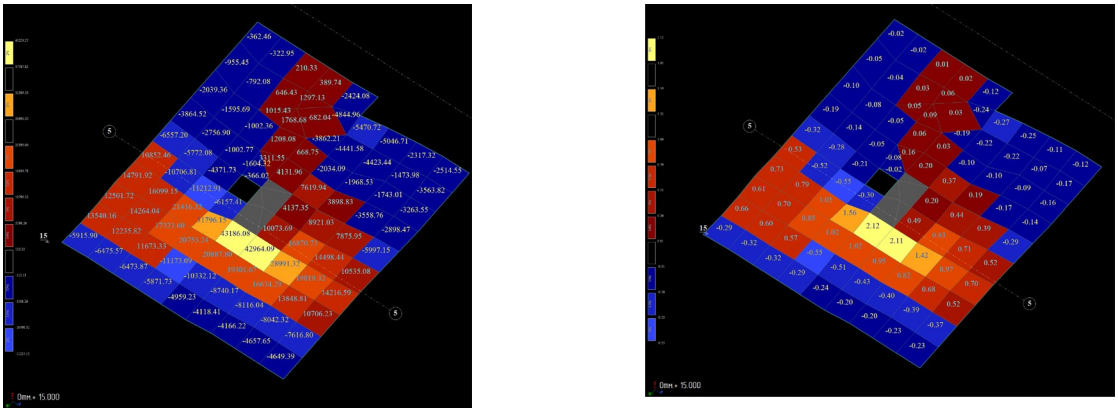
Рисунок 2 – Усереднення армування в зоні колони плити slab01: ліворуч – до, праворуч – після

Метод перевірено на п’яти плитах товщиною 180–200 мм, розрахованих у SOFiSTiK, ЛІРА-САПР, RFEM та Autodesk Robot Structural Analysis. Пікове армування над колонами знизилось у середньому на 20,3 %, біля отворів – на 27,5 %. Маса додаткової арматури п’яти плит зменшилась з 13768,6 до 13439,7 кг, тобто на 328,9 кг (2,4 %).

Після зрізу піку сусідні ділянки мають близькі значення ΔA_s, і ГА частіше об’єднує їх в одну смугу. Кількість смуг скоротилась з 844 до 799. Стрижнів Ø25 стало 326 замість 408.

Зрізаний об’єм піднімає армування сусідніх елементів, і роботу такої зони треба перевірити. Перевірку виконано нелінійним розрахунком у ЛІРА-САПР. Бетон С20/25 і арматуру А500С задано кусочно-лінійним законом деформування 14. За цим законом арматура тече при $\varepsilon_s > 0{,}002175$, що відповідає напруженню $\sigma_s \approx 44\,358$ т/м². Гранична деформація арматури дорівнює 0,025.

Найбільше напруження в арматурі перерозподіленої зони становить 43 229 т/м² (рис. 3, а). Це 97,5 % від межі текучості. Деформація в тому самому елементі сягає $2{,}12 \cdot 10^{-3}$ (рис. 3, б), тоді як текучість починається з $2{,}175 \cdot 10^{-3}$. Арматура лишається в пружній стадії. До граничної деформації 0,025 зберігається майже дванадцятикратний запас.



а) б)

Рисунок 3 – Нелінійний розрахунок зони перерозподілу в ЛІРА-САПР: а) напруження в арматурі, т/м²; б) відносні деформації арматури, $\times 10^{-3}$

Висновки

Метод зваженого усереднення працює в ГА-проєктуванні додаткового армування як крок підготовки даних. Довжина інтегрування залежить від природи піку: над колоною вона охоплює колону і контрольний периметр 2d. Сума $\Delta A_{s,i} \cdot L_i$ на лінії не змінюється. Пікове армування над колонами знижується в середньому на 20,3 %, маса арматури – на 2,4 %. Стрижнів Ø25 стає менше на 20 %, а смуг підсилення – на 5,3 %. Нелінійна перевірка в ЛІРА-САПР за законом 14 підтвердила, що арматура А500С у перерозподіленій зоні не досягає межі текучості: $\varepsilon_s = 0{,}00212 < 0{,}002175$, $\sigma_s = 43\,229 < 44\,358$ т/м².

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hillerborg A. Strip method of design. 2nd ed. Slough : Cement and Concrete Association, 1975. 256 p.

2. Pacoste C., Plos M., Johansson M. Recommendations for finite element analysis for the design of reinforced concrete slabs. Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2012. TRITA-BKN Rapport 144.

3. Blaauwendraad J. Plates and FEM : surprises and pitfalls. Dordrecht : Springer, 2010. 414 p. (Solid Mechanics and Its Applications. Vol. 171). DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3596-7.

4. Eleftheriadis S., Duffour P., Stephenson B., Mumovic D. Automated specification of steel reinforcement to support the optimisation of RC floors. Automation in Construction. 2018. Vol. 96. P. 366–377. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005.

5. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings. Brussels : European Committee for Standardization, 2004.

6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ : Мінрегіон України, 2011.

Потєха Андрій Сергійович *– аспірант, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: apotexa67@gmail.com. ORCID: 0009-0008-8187-1049*

Андрухов Валерій Михайлович *– к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vmandruchov@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4749-8569*

A. S. Potiekha
V. M. Andrukhov

AUTOMATED DESIGN OF ADDITIONAL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE SLABS USING THE METHOD OF WEIGHTED AVERAGING OF REINFORCEMENT RESULTS

Vinnytsia National Technical University

Abstract. *A linear elastic finite element (FE) analysis of slabs produces local peaks of required reinforcement above columns and near opening corners. In automated detailing such a peak turns into a separate strengthening strip with large-diameter bars. The paper describes a weighted averaging method developed within a genetic algorithm (GA) based method for the design of additional reinforcement. The method detects peak points, builds an integration line across the main bars and redistributes reinforcement while preserving its integral. On five slabs analysed in SOFiSTiK, LIRA-SAPR, RFEM and Autodesk Robot, peak reinforcement above columns decreased on average by 20.3 %, and the mass of additional reinforcement by 2.4 %. A nonlinear LIRA-SAPR analysis confirmed that the reinforcement stays below yield.*

Keywords: *weighted averaging, singularity, additional reinforcement, genetic algorithm, FEM, reinforced concrete slab, design automation.*

Andriy Serhiiovych Potiekha *– PhD student, Department of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. ORCID: 0009-0008-8187-1049*

Valeriy Mykhailovych Andrukhov *– PhD, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, e-mail: vmandruchov@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4749-8569*