

**Русин Б. Г., к.т.н., ст. викладач, Саницький М. А., д.т.н., професор,  
Гоголь М. М., к.т.н., асистент, Кропивницький Т. С., аспірант**  
(Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

## **ВПЛИВ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ВИСОКОФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЕТОНІВ**

У статті наведено результати досліджень впливу добавок пластифікуюче-прискорюючої дії разом із ультрадисперсними мінеральними добавками отриманими шляхом механічної активації на властивості низьковуглецевих високофункціональних бетонів. З метою зниження клінкер-фактору та модифікування мікроструктури цементуючої матриці для низьковуглецевих високофункціональних бетонів використано високодисперсні мінеральні добавки. Показано, що поєднання полікарбоксилатного суперпластифікатора та ультрадисперсних мінеральних добавок дозволяє отримати високофункціональні бетонні суміші, що характеризуються підвищеною рухливістю та однорідністю, а бетони на їх основі високою ранньою та кінцевою міцністю, покращеними деформативними властивостями, щільністю, підвищеною морозостійкістю, а в кінцевому результаті довговічністю, що дозволяє широко використовувати їх в будівництві та знизити негативний вплив на навколишнє середовище.

**Ключові слова:** високофункціональні бетони; полікарбоксилатний суперпластифікатор; міцність, структуроутворення; низьковуглецеві бетони.

**Аналіз останніх досліджень.** Аналіз тенденцій світового виробництва бетону показує, що виробництво та споживання цього універсального композиційного матеріалу зростає з кожним роком, що зумовлено соціальними, економічними та демографічними факторами. Середня витрата портландцементу в кількості 300 кг/рік на душу населення (1 м<sup>3</sup> бетону) визначає мінімальний показник цивілізаційного комфорту (в Європейських країнах цей показник дорівнює 500 кг/рік на душу населення). Збільшення світового

виробництва цементу і бетону (відповідно 4,5 млрд т цементу і 15 млрд м<sup>3</sup> бетону) супроводжується споживанням природної сировини та свідчить про нагальну необхідність більш раціонального використання матеріально-енергетичних ресурсів. Це відповідає концепції збалансованого соціально-економічного розвитку, який покликаний сприяти прогресу будівельної галузі [1; 2]. Однією з основних фундаментальних проблем у розробці та впровадженні конструкційних матеріалів нового покоління є досягнення високої технологічності, що передбачає максимальне уникнення трудомістких операцій та забезпечення властивостей, які визначають їх довговічність.

Високофункціональні бетони (High Performance Concrete) вирізняються рядом переваг. Серед них важливо відзначити їх універсальність для застосування в різних умовах експлуатації та відповідність актуальним тенденціям у галузі будівництва [3; 4]. Конструкції, виготовлені із таких бетонів, відрізняються архітектурною та будівельною виразністю, простотою технології та доступністю, можливістю утилізації техногенних відходів, а також мають пониженою енергоємність та високу експлуатаційну надійність [5; 6]. В той же час, такі бетони за рахунок підвищеного вмісту портландцементу характеризуються і певними недоліками, зокрема підвищеною вартістю самого матеріалу, отриманням менш однорідної та стабільної у часі суміші, підвищеною усадкою, теплотою гідратації, потенційним тріщиноутворенням та руйнуванням, а також характеризуються високою емісією CO<sub>2</sub> при їх виробництві. Разом з тим, питомі викиди CO<sub>2</sub> в бетонах можуть бути знижені за рахунок заміщення портландцементу додатковими цементуючими матеріалами з підвищеною дисперсністю [7; 8].

Низьковуглецеві бетони – це бетони, які характеризуються нижчим порівняно зі стандартними бетонами потенціалом викидів CO<sub>2</sub> і при відповідному проектуванні та будівництві використання такого бетону може скоротити викиди в еквіваленті CO<sub>2</sub> до 50%. Оцінка технічної та екологічної ефективності в'язучого в бетоні визначається таким параметром як клінкер-інтенсивність [кг клінкеру/(м<sup>3</sup>•МПа)]; крім цього встановлений параметр CO<sub>2</sub>-інтенсивність [кг CO<sub>2</sub>/(м<sup>3</sup>•МПа)], що характеризує емісію CO<sub>2</sub> при виготовленні 1 м<sup>3</sup> бетону заданого класу міцності [9; 10].

Значний потенціал оптимізації структури цементуючої матриці полягає у використанні мінеральних компонентів з переривчастим

гранулометричним складом, зокрема із вмістом високодисперсних мінеральних добавок та мікронаповнювачів, що містять частинки розміром менше 1,0 мкм та доповнюють гранулометричний склад портландцементу [11]. Відповідно до цього доцільно провести дослідження впливу добавок суперпластифікаторів в комплексі із ультрадисперсними мінеральними добавками у складах низьковуглецевих високофункціональних бетонів, що сприятиме покращенню процесу гідратації за рахунок підвищеної пуцоланової активності мінеральних добавок та ущільнення контактної зони між цементуючою матрицею та заповнювачем. Удосконалення сучасної концепції створення низьковуглецевих високофункціональних бетонів досягається за рахунок синергічного поєднання у їх складі високоєфективних суперпластифікаторів і ультрадисперсних активних мінеральних добавок різних типів.

**Мета та завдання роботи:** дослідження впливу суперпластифікатора на основі етерів полікарбоксилатів та ультрадисперсних мінеральних добавок золи-винесення та кварцевого наповнювача на властивості низьковуглецевих високофункціональних бетонів.

**Матеріали і методи досліджень.** Одержання якісних бетонних сумішей забезпечує високомарочний портландцемент СЕМ І 42,5R ПрАТ «Івано-Франківськцемент», який відповідає європейським стандартам та виготовляється на основі портландцементного клінкеру нормованого мінералогічного складу

Для проектування зернового складу високофункціональних бетонів застосовано дрібний пісок Ясинецького родовища (Львівська обл.,  $\rho_{нас}=1370$  кг/м<sup>3</sup>,  $M_k=1,16$ ) та пісок родовища Славута (Хмельницька обл.,  $\rho_{нас}=1502$  кг/м<sup>3</sup>,  $M_k=2,03$ ). Як крупний заповнювач для приготування високофункціональних бетонів в роботі використано гранітний щебінь Віровського родовища фракції 5–20 мм з насипною густиною 1470 кг/м<sup>3</sup>, істинною густиною – 2,64 г/см<sup>3</sup>, без глинистих та пилюватих домішок; вміст зерен пластинчатої (лещадної) та голчатої форми не перевищує 8%, марка за дробимістю 1400, що задовольняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-74-98 для важких бетонів.

Як мікронаповнювач використовували ультрадисперсний кварцовий пісок (УКП) із вмістом SiO<sub>2</sub> 98 мас.%. ( $S_{пит}=1300$  м<sup>2</sup>/кг). Як активну мінеральну добавку використовували ультрадисперсну золу-винесення (УЗВ) Бурштинської ТЕС ( $S_{пит}=1200$  м<sup>2</sup>/кг).

Ультрадисперсні добавки приготовані шляхом механічної активації у вібротліні. Дослідження фракційного складу цементу та мінеральних добавок проводили вимірюванням розподілення частинок за розмірами – за допомогою лазерного аналізатора Master Sizer 2000.

Високоєфективний суперпластифікатор Master Glenium ACE 430 на основі етерів полікарбоксилатів з нанорозмірними молекулярними ланцюгами використовувався як модифікатор з метою підвищення міцності за рахунок значного водоредукуючого ефекту. Особлива молекулярна конфігурація полікарбоксилатних етерів даного суперпластифікатора сприяє прискоренню процесів гідратації портландцементу.

**Результати досліджень.** Активні мінеральні добавки подрібнювали в вібраційному млині для отримання зразків з підвищеною питомою поверхнею. Гранулометричні склади портландцементу СЕМ І 42.5R, ультрадисперсного кварцевого піску, звичайної та ультрадисперсної золи-винесення наведені в таблиці. Звідси видно, що вміст 10, 50, та 90 об.% частинок СЕМ І 42.5R відповідає 5,75; 19,42 та 56,29 мкм відповідно. Показники  $D_{10}$ ;  $D_{50}$  та  $D_{90}$  за об'ємом для ультрадисперсної золи-винесення становлять 0,39; 1,62 та 7,78 мкм відповідно.

Таблиця

Характеристика гранулометричного складу цементу та активних мінеральних добавок

Матеріал	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
СЕМ І 42.5R	5,75	19,42	56,29
ЗВ	0,78	24,0	138,92
УКП	0,39	1,62	7,78
УЗВ	0,53	1,96	11,69

Реакційна здатність цементних матеріалів залежить від фазового складу та поверхні зерен цементу, яка в більшій мірі визначається площею поверхні порівняно з об'ємом частинок. Оцінку впливу ультрадисперсних мінеральних добавок проведено за новітньою методологією [12], що полягає у визначенні диференційного коефіцієнта поверхневої активності ( $K_d$ ), який розраховують добутком коефіцієнта поверхневої активності на вміст кожної фракції матеріалу. Так, для ультрадисперсних золи-

винесення та кварцового піску коефіцієнт  $K_d$  становить  $15,82 \text{ мкм}^{-1} \cdot \text{об.}\%$  та  $15,21 \text{ мкм}^{-1} \cdot \text{об.}\%$  відповідно, тоді як для ПЦ І-500 –  $3,81 \text{ мкм}^{-1} \cdot \text{об.}\%$ , при цьому основний внесок в питому поверхню створюють частинки розміром до  $1,0 \text{ мкм}$ , що свідчить про їх підвищену поверхневу енергію. Під час ультратонкого подрібнення зростає поверхня розділу фаз, яка характеризується значним запасом вільної поверхневої енергії, що прискорює хімічні реакції, тобто виявляє каталітичну дію.

Для визначення впливу параметрів бетонних сумішей підвищеної рухливості на властивості високофункціональних бетонів на їх основі проведено експериментальні дослідження відповідно до плану двофакторного трирівневого експерименту, в якості змінних факторів якого задано кількість ультрадисперсної золи-винесення – УЗВ ( $X_1=0; 5; 10 \text{ мас.}\%$ ) та ультрадисперсного кварцового піску – УКП ( $X_2=0; 5; 10 \text{ мас.}\%$ ). Дрібний заповнювач на основі суміші  $60 \text{ мас.}\%$  щебеню фракції  $2-5$  та  $40 \text{ мас.}\%$  піску родовища Славута забезпечує максимальне заповнення об'єму міжзернових порождин макроструктури бетону. Високі реологічні властивості бетонних сумішей досягаються при введенні суперпластифікатора прискорюючої дії Master Glenium ACE 430 ( $1,2 \text{ мас.}\%$ ). За результатами досліджень одержані рівняння регресії осадки конуса бетонної суміші ( $Y_{OK}$ ) і міцності на стиск високофункціонального бетону через  $2$  ( $Y_{Rct\ 2}$ ) та  $28$  ( $Y_{Rct\ 28}$ ) діб тверднення:

$$Y_{OK} = 227,59 - 28,33X_1 + 20,83X_2 + 11,25X_1X_2 - 10,56X_1^2 - 13,06X_2^2;$$

$$Y_{Rct\ 2} = 50,25 + 0,35X_1 + 1,66X_2 + 0,40X_1X_2 - 1,81X_1^2 - 3,21X_2^2;$$

$$Y_{Rct\ 28} = 109,89 - 0,02X_1 - 0,38X_2 + 2,73X_1X_2 - 2,48X_1^2 - 4,88X_2^2.$$

На основі графічної інтерпретації отриманих математичних моделей запроєктовано ефективні склади низьковуглецевих високофункціональних бетонів (Ц:П:Щ =  $1:1,6:2,2$ ; Ц= $460 \text{ кг/м}^3$ ) за критеріями осадки конуса, ранньої та марочної міцностей (рисунок). Суміші високофункціональних бетонів при витраті ультрадисперсних добавок золи-винесення та кварцового піску, що відповідає основному рівню варіювання, характеризуються наступними показниками: марка за легкоукладальністю P5 ( $OK=23 \text{ см}$ ), середня густина  $\rho_{сер}=2430 \text{ кг/м}^3$  та об'єм втягнутого повітря –  $1,5\%$ , тривалою збереженістю осадки конуса в часі ( $1,5 \text{ год}$ ) та низьким розчино- та водовідділенням. При цьому розширюються можливості використання розроблених сумішей високофункціональних бетонів у практиці будівництва, особливо при виготовленні щільноармованих

конструкцій складної форми та транспортуванні сумішей бетононасосами.

Для традиційних бетонів з витратою портландцементу типу СЕМ I на рівні  $350 \text{ кг/м}^3$ , як правило, міцність на стиск у віці 28 діб складає 40 МПа, а значення клінкер-інтенсивності відповідає  $8,75 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{МПа}$ . При цьому емісія  $\text{CO}_2$  в бетоні досягає  $302 \text{ кгCO}_2/\text{м}^3$ , а  $\text{CO}_2$ -інтенсивність –  $7,57 \text{ кг CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$ . В той же час, для розроблених високофункціональних бетонів з міцністю 109 МПа клінкер-інтенсивність зменшується до  $4,2 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{МПа}$ , а  $\text{CO}_2$ -інтенсивність складає  $3,65 \text{ кг CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$ . Це свідчить, що при використанні високофункціональних бетонів технічна та екологічна ефективність зростає, а значне пониження показника емісії  $\text{CO}_2$  в таких бетонах визначає їх відповідність вимогам низьковуглецевого розвитку.

Проектування складів високофункціональних бетонів на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками, дозволяє отримати високорухливі суміші (P5), що характеризуються зберезуваністю в часі до 1,5 год. Оцінкою відносної міцності згідно ДСТУ Б В.2.7-176:2008 встановлено, що високоміцні (клас В80) високофункціональні бетони на основі портландцементів модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками характеризуються

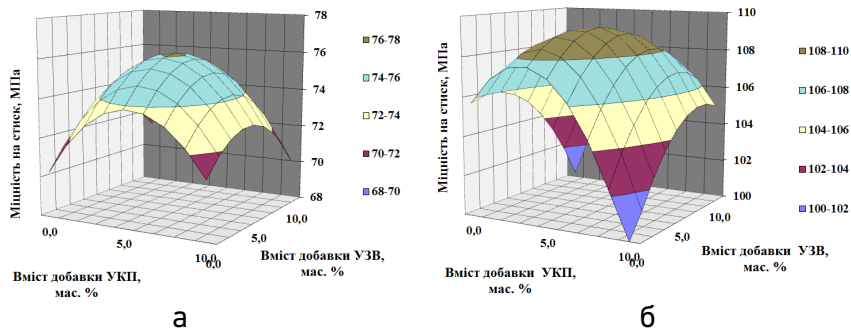


Рисунок. Ізопараметричні поверхні міцності низьковуглецевих високофункціональних бетонів із ультрадисперсними мінеральними добавками через 2 (а) та 28 (б) діб тверднення

швидкою кінетикою наростання міцності ( $f_{\text{cm}2}/f_{\text{cm}28}=0,50$ ), підвищеними водонепроникністю (W20), морозостійкістю (F300), атмосферо- та корозійною стійкістю, пониженими усадочними деформаціями. Модуль пружності розроблених високофункціональних бетонів досягає 56,9 ГПа, а коефіцієнт

Пуассона становить 0,17.

**Висновок.** Суміші низьковуглецевих високофункціональних бетонів на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками золи-винесення та кварцевого піску в поєднанні з суперпластифікаторами на основі полікарбоксилатних етерів з нанорозмірними молекулярними ланцюгами характеризуються підвищеною рухливістю та однорідністю, а бетони на їх основі високою ранньою та кінцевою міцністю, покращеними деформативними властивостями, щільністю, підвищеною морозостійкістю, а в кінцевому результаті довговічністю, що дозволяє широко використовувати їх в будівництві.

1. O'Hegarty R., Kinnane O., Newell J., West R. High performance, low carbon concrete for building cladding applications. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 3. 102566. ISSN 2352-7102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102566>. (дата звернення: 10.02.2024).
2. Rusyn B., Sanytsky M., Szymanska J., Geviuk I. Sustainable concretes containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. 2012. IX (9): nr 1. S. 95–102 (ISSN 2299-8535).
3. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Марчук В. В. Рубцова Ю. В. Бетони нового покоління. Рівне : НУВГП, 2021. 300 с.
4. Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. Betony ultrawysokowartosciowe, wlasciwosci, technologie, zastosowane. Krakow : Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2008. 159 s.
5. Thiyaneswaran M. P., Revin Jenova L., and Navaneethan K. S. Review paper on material properties of high performance concrete. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1055, no. 1. P. 012054. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1055/1/012054>.
6. Dvorkin L., Konkol J., Marchuk V., Huts A. Efficient. Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials*. 2023. № 16. P. 3969. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16113969> (дата звернення: 10.02.2024).
7. Ivashchyshyn H., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Rusyn B. Study of low-emission multi-component cements with a high content of supplementary cementitious materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4(6-100). Pp. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472>. (дата звернення: 10.02.2024).
8. Dvorkin L., Zhitkovsky V. Concretes based on composite cements with the addition of granulated blast furnace slag and cement dust. *Zastita Materijala*. 2023. Vol. 64 (3). P. 262–273. URL: <https://doi.org/10.5937/zasmat2303262D>. (дата звернення: 10.02.2024).
9. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Рихлицька О. В., Яницький О. Б. Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. пр.

Рівне : [б. в.], 2020. Вип. 38. С. 258–266. ISSN 2218-1873. **10.** Scrivener K. L., Gartner E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 2018. Vol. 114. P. 2–26. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/25281>. (дата звернення: 10.02.2024). **11.** Sanytsky M., Rusyn B., Halbiniak J., Szymanska J. Influence of ultrafine ground fly ash on the microstructure and properties of cementitious materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Czestochowa.* 2013. № 2(12). S. 96–102. **12.** Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite, and limestone. *Cement Wapno Beton.* 2020. Vol. 25(5). P. 416–427. doi: <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.5.7>.

## REFERENCES:

**1.** O'Hegarty R., Kinnane O., Newell J., West R. High performance, low carbon concrete for building cladding applications. *Journal of Building Engineering.* 2021. Vol. 3. 102566. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102566>. (data zvernennia: 10.02.2024). **2.** Rusyn B., Sanytsky M., Szymanska J., Geviuk I. Sustainable concretes containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym.* 2012. IX (9): nr 1. S. 95–102 (ISSN 2299-8535). **3.** Dvorkin L. I., Zhytkovskyi V. V., Bordiuzhenko O. M., Marchuk V. V. Rubtsova Yu. V. *Betony novoho pokolinnia.* Rivne : NUVHP, 2021. 300 s. **4.** Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. *Betony ultrawysokowartosciowe, wlasciwosci, technologie, zastosowane.* Krakow : Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2008. 159 s. **5.** Thiyaneswaran M. P., Revin Jenova L., and Navaneethan K. S. Review paper on material properties of high performance concrete. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1055, no. 1. P. 012054. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1055/1/012054>. **6.** Dvorkin L., Konkol J., Marchuk V., Huts A. Efficient. Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials.* 2023. № 16. P. 3969. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16113969> (data zvernennia: 10.02.2024). **7.** Ivashchyshyn H., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Rusyn B. Study of low-emission multi-component cements with a high content of supplementary cementitious materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. Vol. 4(6-100). Pp. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472>. (data zvernennia: 10.02.2024). **8.** Dvorkin L., Zhitkovsky V. Concretes based on composite cements with the addition of granulated blast furnace slag and cement dust. *Zastita Materijala.* 2023. Vol. 64 (3). P. 262–273. URL: <https://doi.org/10.5937/zasmat2303262D>. (data zvernennia: 10.02.2024). **9.** Sanytskyi M. A., Kropyvnytska T. P., Rykhlytska O. V., Yanitskyi O. B. Shvydkotverdnuchi klinker-efektyvni betony. *Resursoekonomni materialy,*



*konstruktsii, budivli ta sporudy* : zb. nauk. pr. Rivne : [b. v.], 2020. Vyp. 38. S. 258–266. ISSN 2218-1873. **10.** Scrivener K. L., Gartner E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 2018. Vol. 114. P. 2–26. URL: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/25281>. (data zvernennia: 10.02.2024). **11.** Sanytsky M., Rusyn B., Halbiniak J., Szymanska J. Influence of ultrafine ground fly ash on the microstructure and properties of cementitious materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Czestochowa.* 2013. № 2(12). S. 96–102. **12.** Sanytsky M., Usherov-Marshak A., Kropyvnytska T., Heviuk I. Performance of multicomponent Portland cements containing granulated blast furnace slag, zeolite, and limestone. *Cement Wapno Beton.* 2020. Vol. 25(5). P. 416–427. doi: <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.5.7>.

---

**Rusyn B. H., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Lecturer,  
Sanytskyi M. A., Doctor of Engineering, Professor, Hohol M. M.,  
Candidate of Engineering (Ph.D.), Assistant, Kropyvnytskyi T. S.,  
Post-graduate Student** (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

## **INFLUENCE OF ULTRAFINE ACTIVE MINERAL ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF LOW-CARBON HIGH-PERFORMANCE CONCRETES**

**The article presents the research results of the influence of plasticizing-accelerating admixtures together with ultrafine active mineral additives obtained by mechanical activation on the properties of low-carbon high-performance concrete. The increase in demand for new-generation concretes, in particular high-performance concretes, which are characterized by improved construction and technical properties and are used to increase the load-bearing capacity, reduce the own weight and material density of structures, as well as for the repair and restoration of damaged reinforced concrete structures, leads to an increase consumption of portland cement, which has a significant impact on the environment due to the large amount of CO<sub>2</sub> released during clinker production. Therefore, in order to reduce the clinker factor and modify the microstructure of the cementitious matrix for low-carbon high-performance concrete, ultrafine mineral additives were used. The work shows, that the combination of complex chemical admixtures with a plasticizing-accelerating effect and ultrafine mineral additives makes it possible to obtain high-performance concrete mixtures with increased workability and**

**homogeneity, and concretes on their base with high early and final strength, improved deformable properties, density, increased frost resistance, and in the end, durability, which allows them to be widely used in construction and reduce the negative impact on the environment. The production and use of low-carbon sustainable concretes make a substantial contribution to climate protection. Developed clinker-efficient high-performance concretes will also become increasingly important in building construction and civil engineering and provide new solutions to the need for a low-carbon development strategy.**

***Keywords:* high-performance concretes; polycarboxylate superplasticizer; strength; structure formation; low-carbon concretes.**