

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАЛЮЖНА Олена Вячеславівна

УДК 691.32

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ РАННЬОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ШПАЛ КОМПЛЕКСНИМИ ДОБАВКАМИ**

192 Будівництво та цивільна інженерія

19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих
ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело



О.В. Калюжна

Науковий керівник

Плугін Андрій Аркадійович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Калюжна Олена Вячеславівна. Підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал комплексними добавками. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія (19 Архітектура та будівництво). Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація виконана на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд і кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту і складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку із 154 використаних джерел, додатків.

У *вступі* наведено загальну характеристику роботи, зокрема, доведено актуальність обраної теми, показано її зв'язок з науковими програмами та планами, сформульовано мету, об'єкт і предмет, завдання досліджень, викладено положення наукової новизни, обґрунтовано достовірність і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію. Виробництво залізобетонних шпал є дуже ресурсоенергоємним через високу проектну міцність бетону та, особливо, необхідність швидкого отримання передаточної міцності 32 МПа, тому пошук і обґрунтування застосування комплексних добавок, які забезпечують високу ранню міцність бетону за природного або малопрогрівного режимів твердіння, є актуальним завданням. Актуальність підкреслюється виконанням досліджень у складі держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України. *Метою дослідження* є обґрунтування виробництва попередньо напружених залізобетонних шпал з режимами твердіння природним або малопрогрівним за рахунок застосування комплексних добавок, що не спричиняють корозійного впливу на сталеву арматуру. *Предмет дослідження* – бетон залізобетонних шпал з добавками суперпластифікаторів полікарбоксилатів, прискорювачів електролітів та дисперсії гідросилікатів кальцію, об'єкт дослідження – ранні стадії процесу

твердіння та формування ранньої міцності цього бетону. Результати досліджень апробовані на 4-х міжнародних конференціях у 2019-21 рр. та опубліковані у 7 роботах, у т.ч. 2 статтях у фахових виданнях України, 2 статтях у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, 1 статті у закордонному виданні.

Розділ 1 містить результати аналітичного огляду сучасних уявлень з отримання високої ранньої міцності бетону. Розглянуто особливості конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал, способи прискорення твердіння бетону за рахунок застосування оптимальних складів бетону та хімічних добавок, способи визначення складу бетону, добавки суперпластифікатори та комплексні добавки суперпластифікаторів та прискорювачів, обмеження на застосування добавок в бетони, шляхи підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал. За результатами аналітичного огляду висунуто робочу гіпотезу, яка полягала у підвищенні ранньої міцності бетону за рахунок застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбосилата і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів.

Для досягнення мети і доведення гіпотези було висунуто такі завдання досліджень: уточнити електроповерхневі властивості складових цементного каменю та бетону з добавками; вивчити особливості молекулярної структури добавок суперпластифікаторів і уточненити механізм їх впливу на ранню міцність цементного каменю і бетону; виконати термодинамічний аналіз можливості утворення із C_3A і добавок-електролітів кристалогідратів, що мають позитивний поверхневий заряд і сприяють утворенню додаткової кількості електрогетерогенних контактів у ранні терміни твердіння; виконати стехіометричні розрахунки і визначити безпечну кількість добавок-електролітів, яка буде зв'язана у кристалогідратах, та виконати термодинамічний аналіз стійкості кристалогідратів; вивчити механізм впливу комплексної добавки суперпластифікаторів, електролітів та дисперсії

гідросилікатів кальцію на ранню міцність і структуру цементного каменю та бетону, виконати електронно-мікроскопічні дослідження структури; виконати експериментальні дослідження впливу суперпластифікаторів і комплексних добавок на ранню міцність бетону шпал; виконати фізико-хімічні дослідження фазового складу продуктів гідратації цементу з добавками; виконати потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження впливу добавок на корозійний стан сталеві арматури в бетоні; розробити і впровадити рекомендації із застосування комплексних добавок в бетон залізобетонних шпал, визначити економічну ефективність; впровадити результати досліджень у навчальний процес.

У розділі 2 наведено матеріали і методи досліджень. Для виготовлення дослідних зразків застосовували щебінь гранітний, пісок кварцовий, портландцемент ПЦ I-500Н, добавки: суперпластифікатори полікарбоксилати різних виробників, прискорювачі електроліти нітрат і хлорид кальцію, дисперсію гідросилікатів кальцію, а також вискомічний низьковуглецевий дріт діаметром 3 мм для армування попередньо напруженого залізобетону.

Фізичні властивості матеріалів для бетону визначали стандартними методами, фракційний склад цементів - за допомогою аналізатора розміру частинок Malvern ZetaSizer. Легкоукладальність бетонних сумішей та фізико-механічні властивості бетону визначали стандартними методами. Можливість утворення продуктів гідратації цементу з добавками досліджували термодинамічним методом, склад продуктів гідратації за допомогою фізико-хімічних методів - рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії. Граничний корозійно безпечний вміст добавок електролітів визначали шляхом стехіометричних розрахунків. Вплив добавок на корозійний стан сталеві арматури в бетоні досліджували потенціодинамічними методами. Достовірність результатів досліджень забезпечена коректним застосуванням і метрологічним забезпеченням стандартних та оригінальних методів випробувань та досліджень, застосуванням незалежних методів досліджень, повторюваністю результатів

випробувань, їх статистичною обробкою, узгодженістю результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

Розділ 3 містить теоретичне обґрунтування підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал комплексною добавкою. Визначено електроповерхневі потенціали та заряди основних складових цементного каменю та бетону, досліджено механізми впливу добавок суперпластифікаторів, прискорювачів твердіння електролітів та дисперсії гідросилікатів кальцію на ранню міцність бетону

У *розділі 4* наведені результати експериментальних досліджень з підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал комплексною добавкою. Досліджено вплив добавок суперпластифікаторів полікарбоксилатів, комплексних добавок на ранню міцність бетону шпал, виконано фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками, електронно-мікроскопічні дослідження його структури, потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження корозійного стану сталевий арматури в бетоні з добавками.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано нові наукові результати. Зокрема, розвинуто уявлення про електроповерхневі властивості та взаємодії під час твердіння портландцементу з добавками, зокрема, такі положення: інтегральний рівноважний електроповерхневий потенціал граніту дорівнює мінус 0,89, проте ділянки його поверхні можуть мати як негативний (кварц, ортолкраз), так і позитивний (біотит) заряд; пластифікуючий ефект аніонних ПАР обумовлений їх вибірковою адсорбцією на позитивно заряджених ділянках поверхні зерен цементу (C_3A) та заповнювачів: лігносульфонати через незначну кількість груп SO_3^- нейтралізують заряд C_3A та мають середньоластифікуючий ефект, меламінформальдегіди та нафталінформальдегіди через значну кількість груп SO_3^- перезаряджають C_3A і мають сильноластифікуючий ефект, полікарбоксилати через значну кількість функціональних груп CO_2^- або PO_3^{2-} та довгих вуглеводневих радикалів забезпечують перезарядження C_3A , підсилене стеричним ефектом, тому мають найбільший пластифікуючий

(водоредукуючий) ефект; в результаті уведення нітрату та хлориду кальцію утворюються термодинамічно стійкі гідронітро- та гідрохлоралюмінати кальцію, кристалогідрати яких мають позитивний поверхневий заряд і утворюють додаткову кількість електрогетерогенних контактів у ранні терміни твердіння; безпечна кількість нітрату та хлориду кальцію визначається їх зв'язуванням алюмінатними фазами а, отже, вмістом C_{3A} у клінкері; найбільший прискорюючий ефект добавки дисперсії гідросилікатів кальцію з полікарбоксилатом досягається за рахунок того, що площа поверхонь, від яких зростають кристалогідрати, збільшується за рахунок високодисперсних частинок ГСК, забезпечується більш швидке заповнення продуктами гідратації прошарків між частинками цементу та заповнювачів з утворенням електрогетерогенних контактів. Вперше отримано залежності ранньої міцності бетону шпал від різних сполучень і кількості добавок суперпластифікаторів полікарбоксилатів, прискорювачів електролітів і дисперсії гідросилікатів кальцію за різних режимів твердіння, а також потенціодинамічні криві корозійного стану арматури у бетоні з цими добавками.

Розділ 5 містить інформацію щодо впровадження результатів досліджень у виробництві збірних залізобетонних конструкцій і будівельних композиційних матеріалів. Розроблено рекомендації із застосування добавок суперпластифікаторів полікарбоксилатів та прискорювачів твердіння в бетон залізобетонних шпал. Розроблені засоби з підвищення ранньої міцності бетону застосовані для підвищення водостійкості композитів на основі мінеральних в'язучих комплексними добавками. Виконано оцінку економічної ефективності зменшення енергоємності виготовлення залізобетонних шпал за рахунок застосування хімічних добавок. Результати досліджень використано у навчальному процесі. Показано практичне значення отриманих результатів, яке полягає у забезпеченні зниження ресурсоенерговитрат під час виробництва залізобетонних шпал та інших збірних залізобетонних конструкцій і виробів без зниження показників їх якості та підтверджується впровадженням на підприємствах, а також у начальний процес.

У загальних висновках підсумовано виконання завдань досліджень і констатовано досягнення мети, а у додатках наведені додаткові матеріали.

Ключові слова: *бетон, добавки, твердіння, рання міцність, залізобетонна шпала.*

SUMMARY

Kaliuzhna Olena. Increasing the early strength of concrete reinforced concrete sleepers with complex additives. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation of Doctor of Philosophy degree in Specialty 192 Construction and Civil Engineering (19 Architecture and Construction). Ukrainian State University of Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation was completed at the Department of Building Materials and Structures and the Department of Railway Tracks and Transport Structures of the Ukrainian State University of Railway Transport and consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of 154 used sources, and annexes.

A general description of the work was presented at the introduction, in particular, the relevance of the chosen topic was proved, the connection with scientific programs and plans was shown, the purpose, object and subject, research objectives was formulated, sets out the provisions of scientific novelty, substantiates the reliability and practical significance of the results, data on their approbation was given.

The production of reinforced concrete sleepers is very resource-intensive due to the high design strength of concrete and, especially, the need to quickly obtain a transfer strength of 32 MPa, so finding and justifying the use of complex additives that provide high early strength of concrete under natural or low-heat curing is an actual task. The relevance of the research is determined by the implementation of the research in the composition of the state budgetary research works of the Ministry of Education and Science of Ukraine. The purpose of the research is to develop the production of pre-stressed reinforced concrete sleepers with natural or low-temperature hardening conditions due to the use of complex additives that do not cause corrosion effects on the steel reinforcement. The subject of the research - concrete of concrete sleepers with additives of superplasticizers polycarboxylates, electrolytes accelerators, and dispersion of calcium hydroxylate; the research object -

early stages of the hardening process and formation of early strength of this concrete. The results of the research were approved at four international conferences in 2019-21 and published in seven papers, including two articles in the Ukrainian publications, two articles in the publications indexed by Scopus, one article in the foreign edition.

Section 1 contains the results of an analytical review of the modern concepts of obtaining a high early strength of concrete. The features of the design and technology of production of reinforced sleepers, ways to accelerate the hardening of concrete at the expense of using the optimum composition of the concrete and chemical additives, methods of determining the composition of the concrete, superplasticizer and complex superplasticizer and accelerator additives, limitations on the use of additives in concrete, ways to increase the early strength of the concrete of railway sleepers was investigated. As a result of the analytical review, a working hypothesis was developed which consisted in increasing early concrete durability by using the concrete of optimal composition with complex superplasticizer polycarboxylate additive and accelerator, which does not cause a corrosive effect on the reinforcement - dispersion of calcium hydroxylates as a crystalline seed for the rapid formation of crystalline hydrates.

In order to achieve the aim and to complete the hypothesis, the following research tasks were carried out: to clarify electro surface properties of cement stone components with additives; to investigate features of molecular structure of superplasticizer additives and to clarify the mechanism of their influence on the early strength of cement stone and concrete; to carry out thermodynamic analysis of the possibility of creating crystalline hydrates with C_3A and electrolyte additives having a positive surface charge and contributing to the formation of an additional number of electro heterogenic contacts in the early terms of hardening; to perform stoichiometric calculations and to determine the amount of electrolytic additives that will be connected in crystalline hydrates, and to perform thermodynamic analysis of the crystalline hydrates stability; to study the complex influence of superplasticizers, electrolytes and dispersion of calcium hydroxylates on the early strength and

structure of the cement stone and concrete; to carry out an electron-microscopic examination of the structure; to make experimental studies of the impact of superplasticizers and complex additives on the early strength of the concrete sleepers; to perform physical and chemical examination of the phase composition of hydration products of cement with additives; to perform potentiodynamic and microscopic examination of the influence of additives on the corrosion resistance of steel reinforcement in concrete; to develop and to implement recommendations on the use of complex additives in the concrete of concrete sleepers, to estimate economic efficiency; to implement the results of research in the educational process.

Section 2 contains the materials and methods of research. Gravel, quartz sand, Portland cement PC I-500N, additives were used for the manufacture of the studied samples: superplasticizers polycarboxylates of different manufacturers, accelerating electrolytes calcium nitrate and calcium chloride, dispersion of calcium hydroxylates as well as high-quality low-carbon dry material with the diameter of 3 mm for reinforcement of front-loaded silica concrete.

The physical properties of materials for concrete were determined by standard methods, the fractional composition of cement - using a particle size analyzer Malvern ZetaSizer. The efficiency of concrete mixes and physical and mechanical properties of concrete were determined by standard methods. The possibility of formation of hydration products of cement with additives was investigated by thermodynamic method, composition of hydration products using physical and chemical methods - X-ray phase analysis, infrared spectroscopy, scanning electron microscopy. Boundary corrosion-free amount of electrolyte additives was determined using stoichiometric calculations. The influence of additives on corrosion resistance of steel reinforcement in concrete was investigated by potentiostatic methods. Reliability of the results of the investigations was ensured by correct application and metrological support of standard and original methods of tests and investigations, use of independent research methods, repeatability of test results, their statistical processing, and compliance of experimental and theoretical results with each other.

Section 3 contains a theoretical explanation of how to increase the early strength of the concrete of concrete sleepers with a complex additive. The electrostatic and surface potentials and charges of the main cement stone and concrete components have been determined; the mechanisms of influence of superplasticizers, accelerators of electrolyte hardening, and dispersions of calcium hydroxylate on early concrete strength have been studied.

Section 4 contains the results of experimental studies on increasing the early strength of the concrete with the use of a complex additive. The influence of polycarboxylate superplasticizers and complex additives on the early strength of concrete sleepers has been investigated, physical and chemical examination of cement stone with additives, electron-microscopic examinations of its structure, potentiodynamic and microscopic examinations of corrosion state of steel reinforcement in concrete with additives has been carried out.

As a result of the carried-out theoretical and experimental investigations new scientific results were obtained. In particular, the concept of electro surface properties and interactions during the hardening of Portland cement with additives has been developed, including the following statements: Integral equilibrium electro surface potential of granite is minus 0.89, but plots of its surface can be both negative (quartz, orthoclase) and positive (biotite) charge; plasticizing effect of anionic Super active reagents is caused by their vibronic adsorption on positively charged grain surface areas of cement (C_3A) and the fillers: lignosulfonates through an insignificant number of groups SO_3^- neutralize the charge of C_3A and have a medium-plasticity effect, melaminein formaldehyde and naphthalenein formaldehyde through a significant number of groups SO_3^- recharge the C_3A and have a strongly plasticizing effect, polycarboxylates due to large number of functional groups CO_2^- or PO_3^{2-} and long carbohydrate radicals to ensure recharging C_3A , is supported by steric effect, that is why it has the greatest plasticizing (water-reducing) effect; As a result of nitrate and calcium chloride elimination thermodynamically stable calcium hydrochloride and calcium hydrochloraluminates are created, their crystalline hydrates have a positive surface charge and provide an additional number of electro

heterogenic contacts in the early terms of hardening; The safe quantity of calcium nitrate and chloride is determined by their connection with the aluminate phases and also, in the amount of C_3A at the clinker; the most accelerating effect of calcium hydroxylates dispersion additive with polycarboxylate is achieved due to the fact that HSC particles increase the surface area, on which crystallization of hydration products occurs and provides quick filling of spaces between cement particles and fillers with establishment of electro heterogenic contacts. For the first time, the dependence of early strength of concrete sleepers on various compounds and the number of additives of superplasticizers polycarboxylates has been obtained, accelerating electrolytes and dispersion of calcium hydroxylate at different hardening conditions, as well as potentiostatic curves of corrosion state of reinforcement bars in concrete with these additives.

Section 5 contains information on the implementation of the results of research in the production of precast concrete structures and building composites. Developed recommendations for the use of superplasticizer polycarboxylate additives and accelerators of hardening in the concrete of concrete sleepers. The developed means of increasing the early strength of concrete is used to increase the water-resistance of composites based on mineral nutrients with complex additives. We have assessed the economic efficiency of using chemical additives to reduce the energy intensity of the production of concrete sleepers. The results of the research have been used in the educational process. The practical value of the obtained results is shown, this means ensuring the reduction of resource-energy consumption during the production of high-voltage concrete sleepers and other precast constructions and products without reducing the indicators of their quality and is confirmed by implementation at enterprises, as well as in the management process.

The general conclusions that summarized the performance of the research tasks and state the achievement of the goal and additional materials are given in the annexes.

Keywords: *concrete, additives, hardening, early strength, concrete sleeper.*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях та у виданнях, що включені до наукометричних баз:

1. Плуґін А.А., Калюжна О.В., Борзяк О.С., Савченко О., Плуґін О.А. Надшвидке отримання передаточної міцності бетону залізобетонних шпал за допомогою комплексних добавок. *Зб. наук. пр. Українського державного університету залізничного транспорту*, 197 (2021) 44-63.

Особистий внесок здобувача: виконання експериментальних досліджень, обробка та аналіз їх результатів.

2. Плуґін А.А., Калюжна О.В., Бабій А.І., Плуґін О.А., Овчинніков О.О. Підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал за допомогою добавок суперпластифікаторів. *Науковий вісник будівництва*, 3/105 (2021) 155-167.

Особистий внесок здобувача: виконання експериментальних досліджень, обробка та аналіз їх результатів.

3. A.A. Plugin, O. Pluhin, O. Borziak, O. Kaliuzhna. The Influence of Storage Conditions on the Electric Conductivity of Concrete. *Materials Science Forum*, 968 (2019) 50-60. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.50

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях, побудова експериментальних залежностей та участь в аналізі їх результатів.

4. Plugin A.A., Pluhin O.A., Borziak O.S., Kaliuzhna O.V. The Mechanism of a Penetrative Action for Portland Cement-Based Waterproofing Compositions. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 47 (2020). DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_5

Особистий внесок здобувача: експериментальна перевірка гіпотези про механізм перенесення продуктів гідратації цементу з добавками у поровий простір бетону.

5. Plugin A., Iefimenko A., Borziak O., Gevorkyan E. and Kaliuzhna O. Effect of mineral additives to a gypsum wet deformation. *E3S Web of Conf.*, 280 (2021) 07003. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007003.

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях та аналізі їх результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Плугін А.А., Бабій А.І., Плугін О.А., Борзяк О.С., Калюжна О.В. Вплив умов зберігання на електропровідність бетону. *VI Міжнар. конфер. «Актуальні проблеми інженерної механіки»*, Одеса (2019) 320–324.

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях, побудова експериментальних залежностей та участь в аналізі їх результатів.

7. Борзяк О.С., Калюжна О.В., Плугін А.А. Вплив добавок-прискорювачів твердіння на захисні властивості бетону щодо сталевих арматур. *VIII Міжнар. наук.-практ. конфер. «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві»*, Харків (2020).

Особистий внесок здобувача: проведення потенціодинамічних досліджень корозійного стану арматури в бетоні та аналіз їх результатів.

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

8. Калюжна О.В., Шевченко В.М., Белікова Н.В. Аналіз та контроль безвідмовної роботи контактної мережі. *Зб. наук. пр. Української державної академії залізничного транспорту*, 147 (2014) 139-142.

Особистий внесок здобувача: підбір та оброблення статистичних даних про відмови залізобетонних конструкцій на електрифікованих залізницях.

9. Заява на видачу патенту на винахід № а202008431 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Плугін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Плугін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях з розробки складу в'язучого.

10. Заява на видачу патенту на корисну модель № u202008433 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Пługін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Пługін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях з розробки складу в'язучого.

11. Заява на видачу патенту на корисну модель № u202008436 Гіпсове в'язуче підвищеної водостійкості / Пługін А.А., Єфіменко А.С., Геворкян Е.С., Борзяк О.С., Панченко С.В., Ватуля Г.Л., Пługін О.А., Суханова Ю.А., Калюжна О.В., Крикун О.П. – Заявлено 29.12.2020.

Особистий внесок здобувача: участь в експериментальних дослідженнях з розробки складу в'язучого.

Зміст

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ УЯВЛЕНЬ З ОТРИМАННЯ ВИСОКОЇ РАННЬОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ	25
1.1 Особливості конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал....	25
1.2 Прискорення твердіння бетону за рахунок застосування оптимальних складів бетону та хімічних добавок	33
1.2.1 Способи визначення складу бетону	35
1.2.2 Застосування добавок суперпластифікаторів і комплексних добавок суперпластифікатор+прискорювачі	37
1.2.3 Обмеження на застосування добавок в бетони.....	44
1.3 Підвищення ранньої міцності бетону залізобетонних шпал.....	45
1.4 Гіпотеза і завдання досліджень	49
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	53
2.1. Матеріали.....	53
2.1.1 Цемент, заповнювачі, арматура.....	53
2.1.2 Добавки.....	54
2.1.3 Експериментальні склади бетону	55
2.3 Методи досліджень	57
2.3.1 Дослідження реологічних характеристик сумішей	57
2.3.2 Дослідження залежності фізико-механічних властивостей бетону від виду та вмісту добавок	58
2.3.3 Фізико-хімічні дослідження.....	59
2.3.4 Потенціодинамічні дослідження	60
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ РАННЬОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ КОМПЛЕКСНОЮ ДОБАВКОЮ	65
3.1 Електроповерхневі потенціали та заряди основних складових цементного каменю та бетону	65
3.2 Добавки суперпластифікатори	67
3.3 Добавки прискорювачі твердіння.....	74

3.4	Добавка дисперсії гідросилікатів кальцію	85	
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ РАНЬОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ КОМПЛЕКСНОЮ ДОБАВКОЮ			91
4.1	Дослідження впливу добавок суперпластифікаторів полікарбонатів на ранню міцність бетону шпал	91	
4.2	Дослідження впливу комплексних добавок на ранню міцність бетону шпал	94	
4.3	Фізико-хімічні дослідження цементного каменю з добавками	100	
4.5	Електронно-мікроскопічні дослідження структури цементного каменю з добавками	104	
4.6	Потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження корозійного стану сталеві арматури в бетоні з добавками	107	
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ І БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ			113
5.1	Рекомендації із застосування добавок суперпластифікаторів полікарбонатів та прискорювачів твердіння в бетон залізобетонних шпал	113	
5.2	Підвищення водостійкості композитів на основі мінеральних в'язучих комплексними добавками	118	
5.3	Оцінка економічної ефективності використання хімічних добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал	119	
5.4	Використання результатів досліджень у навчальному процесі	123	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ			126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			129
ДОДАТОК А - Результати досліджень впливу добавок на прискорення твердіння бетону			146
ДОДАТОК Б - Результати випробувань, аналізу хімічного та фракційного складу цементу			154
ДОДАТОК В - Основні типи пластифікуючих добавок в бетони та інші силікатні композити (4 класу 1 групи за В.Б. Ратіновим)			160
ДОДАТОК Г - Результати визначення складів бетону за допомогою ПЗ ПСБ-УКРДАЗТ			161
ДОДАТОК Д - Результати досліджень впливу добавок суперпластифікаторів			

полікарбосилатів на ранню міцність бетону шпал у виробничих умовах.....	165
ДОДАТОК Е - Результати досліджень впливу комплексних добавок на ранню міцність бетону шпал	171
ДОДАТОК Є – Заявки на видачу патенту на винахід	173
ДОДАТОК Ж – Акти впровадження.....	177

ВСТУП

Довжина колій на залізницях України у 2021 р. складала понад 27 тис. км. З них на близько 23,9 тис. км підрейковою основою є залізобетонні шпали, кількість яких перевищує 44,3 млн. шт. В теперішній час залізобетонні шпали виготовляються переважно для заміни зношених також залізобетонних шпал під час капітальних ремонтів колії через те, що планова заміна ними дерев'яних шпал в основному зікинчена ще у 90-ті рр. ХХ ст. З цієї причини об'єми виробництва залізобетонних шпал в теперішній час менші, ніж проектна потужність заводів-виробників – Гніванського заводу спец залізобетону (ПрАТ «Гніванський ЗСЗБ»), Коростенського та Старокостянтинівського заводів залізобетонних шпал (відповідно, ПрАТ «Коростенський ЗЗБШ» і філія АТ «Укрзалізниця» «Старокостянтинівський ЗЗБШ»).

Залізобетонні шпали виготовляються із бетону класу за міцністю на стиск С32/40 і армуються високоміцним дротом 44Ø3 мм з попереднім напруженням. На виготовлення 1 м³ бетону ще у 2010-х роках витрачалось понад 400 кг цементу. Шпали виготовляються у 10-місних силових формах, на які гадрівлічним домкратом натягуються дротяні пакети. У форми вставляються деталі для негайного розпалублення – перегородки - діафрагми між торцями шпал, пустотоутворювачі отворів під закладні болти шпал для клемно-болтових проміжних рейкових скріплень. Тому для шпал застосовуються жорсткі бетонні суміші, які ущільнюються вібрацією. З цієї причини добавки-суперпластифікатори для бетону шпал раніше не застосовувались, а у державних нормативних документах на них – ГОСТах, ДСТУ Б В.2.6-57:2008 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм. Технічні умови застосування хімічних добавок не дозволялось.

Для забезпечення ритмічної роботи підприємства передаточна міцність бетону, яка для шпал складає 32 МПа, повинна досягитись за 8–10 год. Для цього відформовані шпали пропарюються у пропарювальних камерах, тобто здійснюється їх ТВО – тепловологісна обробка. У 2000-ні рр. і раніше пропарювання здійснювалось за температур, що перевищували 80–90°С. З

2000-х років через зростання вартості енергоносіїв суттєво підвищилась собівартість виробництва шпал, тому підприємства-виробники вимушені були припинити двохзмінну роботу і зменшити температуру ТВО до 50–40°C. Тоді ж почалось застосування більш активних цементів, удосконалено конструкцію пустото утворювачів, впроваджено шпали із закладними анкерами для пружних анкерних рейкових скріплень. Однак вартість енергоносіїв продовжує збільшуватись, тому зменшення тривалості й температури тепловологісної обробки шпал залишається актуальним практичним завданням.

При постановці досліджень, спрямованих на зменшення енерговитрат у виробництві залізобетонних шпал, виникають супутні задачі, які необхідно вирішувати для бетонів, у складі яких пропонується використання модифікуючих добавок. При цьому залишається вимога до основних властивостей бетону, серед яких міцність, морозостійкість, тріщиностійкість, електричний опір, що регламентовані національним стандартом на шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць ДСТУ Б В.2.6-209. Використання модифікуючих добавок в бетоні для таких конструкцій підпорядковано можливості зниження В/Ц, покращенню реологічних характеристик бетонної суміші та прискоренню процесу гідратації цементу і набору міцності бетону, що в цілому забезпечує зменшення енергоємності виробництва конструкцій. Введенням добавок водночас передбачає зниження ризику тріщиноутворення при використанні реакційноздатного заповнювача та електрокорозії від струмів витоку.

З 2010-х років для виробництва збірного залізобетону все ширше застосовуються хімічні добавки, у першу чергу суперпластифікатори, найбільш ефективними з яких є полікарбоксилати. УкрДУЗТ було розроблено новий національний стандарт України ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови, в якому допускається застосування хімічних, у т.ч. пластифікуючих добавок для покращення якостей бетонної суміші та бетону. Заводи-виробники почали застосовувати добавки-суперпластифікатори, цементи більш високої активності

після пропарювання і досягли скорочення витрат цементу на 1 м³ бетону, які стали меншими ніж 400 кг. Але відмовитись від пропарювання повністю до цього часу не вдалось. Крім того, фахівці-технолги й досі обережно ставляться до уведення в бетон добавок – прискорювачів через їх можливий корозійний вплив на сталевий дріт у випадку передозування добавки. З цієї ж причини у ДСТУ Б В.2.6-209:2016 застосовування для шпал добавок – прискорювачів твердіння обмежується. Тому пошук добавок, які б прискорили твердіння бетону шпал без корозійного впливу на арматурний дріт є актуальним практичним і науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі будівельних матеріалів, конструкцій та споруд і кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України у складі держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт, зокрема «Теоретичні основи отримання нових корозійностійких композиційних силікатних матеріалів з високими гідрофізичними характеристиками. Фізико-хімічні та колоїдно-хімічні основи водостійкості та корозійної стійкості композиційних силікатних матеріалів» (2015–17, ДР№ 0115U000279); «Теоретичні та експериментальні основи визначення, прогнозування та забезпечення несучої здатності та довговічності транспортних споруд в умовах агресивних впливів» (2019–21, ДР№ 0119U100295); «Розвиток теоретичних основ і експериментальна перевірка нових ефективних способів підвищення несучої здатності та водонепроникності ґрунтів земляного полотна залізниць» (2020-22, ДР№ 0120U102065).

Мета дослідження – обґрунтування виробництва попередньо напружених залізобетонних шпал з природним твердінням бетону за рахунок застосування добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння - неелектролітів.

Наукова гіпотеза: максимальне підвищення ранньої міцності бетону можливе у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбоксилата і прискорювача, що не

спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів.

Об'єкт досліджень – ранні стадії процесу твердіння та формування ранньої міцності бетону залізобетонних шпал з добавками суперпластифікаторів полікарбоксилатів, прискорювачів електролітів та дисперсії гідросилікатів кальцію.

Предмет досліджень – бетон залізобетонних шпал з добавками суперпластифікаторів полікарбоксилатів, прискорювачів електролітів та дисперсії гідросилікатів кальцію.

Методи досліджень. Методи досліджень. Фізичні властивості матеріалів для бетону визначали стандартними методами, фракційний склад цементів - за допомогою аналізатора розміру частинок Malvern ZetaSizer. Легкоукладальність бетонних сумішей та фізико-механічні властивості бетону визначали стандартними методами. Можливість утворення продуктів гідратації цементу з добавками досліджували термодинамічним методом, склад продуктів гідратації за допомогою фізико-хімічних методів - рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії, скануючої електронної мікроскопії. Граничний корозійно безпечний вміст добавок електролітів визначали шляхом стехіометричних розрахунків. Вплив добавок на корозійний стан сталеві арматури в бетоні досліджували потенціодинамічними методами.

Наукова новизна:

Розвинуто уявлення про електроповерхневі властивості та взаємодії під час твердіння портландцементу з добавками, зокрема, такі положення:

- інтегральний рівноважний електроповерхневий потенціал граніту дорівнює $-0,89$, проте ділянки його поверхні можуть мати як негативний (кварц, ортоклаз), так і позитивний (біотит) заряд;

- пластифікуючий ефект аніонних ПАВ бумовлений їх вибірковою адсорбцією на позитивно заряджених ділянках поверхні зерен цементу (C_3A) та заповнювачів: лігносульфонати через незначну кількість груп SO_3^- нейтралізують заряд C_3A та мають середньоластифікуючий

ефект, меламінформальдегіди та нгафталінформальдегіди через значну кількість груп SO_3^- перезаряджають C_3A і мають сильнопластифікуючий ефект, полікарбоксилати через значну кількість функціональних груп CO_2^- або PO_3^{2-} та довгих вуглеводневих радикалів забезпечують перезарядження C_3A , підсилене стеричним ефектом, тому мають найбільший пластифікуючий (водоредукуючий) ефект.

- в результаті уведення нітрату та хлориду кальцію утворюються термодинамічно стійкі гідронітро- та гідрохлоралюмінати кальцію, кристалогідрати яких мають позитивний поверхневий заряд і утворюють додаткову кількість електрогетерогенних контактів у ранні терміни твердіння; безпечна кількість нітрату та хлориду кальцію визначається їх зв'язуванням алюмінатними фазами а, отже, вмістом C_3A у клінкері;

- найбільший прискорюючий ефект добавки дисперсії гідросилікатів кальцію з полікарбоксилатом досягається за рахунок того, що частинки ГСК збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація продуктів гідратації та забезпечують швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу та заповнювачів з утворенням електрогетерогенних контактів.

Вперше отримано залежності ранньої міцності бетону шпал від різних сполучень і кількості добавок суперпластифікаторів полікарбоксилатів, прискорювачів електролітів і дисерсії гідросилікатів кальцію за різних режимів твердіння, а також потенціодинамічні криві корозійного стану арматури у бетоні з цими добавками.

Достовірність результатів досліджень. Достовірність результатів досліджень забезпечена коректним застосуванням і метрологічним забезпеченням стандартних та оригінальних методів випробувань та досліджень, застосуванням незалежних методів досліджень, повторюваністю результатів випробувань, їх статистичною обробкою, узгодженістю результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у забезпеченні зниження ресурсоенерговитрат під час виробництва залізобетонних шпал та

інших збірних залізобетонних конструкцій і виробів без зниження показників їх якості та підтверджується впровадженням на підприємствах, а також у початковий процес з підготовки бакалаврів, магістрів, докторів філософії за спеціальностями 192 Будівництво та цивільна інженерія і 273 Залізничний транспорт у складі лекційних курсів, лабораторних і практичних робіт з дисциплін «Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів і конструкцій», «Будівельне матеріалознавство», «Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними, мінеральними добавками та полімерами».

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались на: VI Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 2019; XVII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» (Львів – Кошице – Жешув), 2019; VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві», Харків, 2020; Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021), Кривий Ріг, 2021.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 7 робіт, у т.ч. 2 у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, 2 – у фахових виданнях України, 1 – у закордонному виданні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даниленко Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: У 2-х тт. [Текст] / Е.І.Даніленко. – К.: Інпрес, 2010. – Т.1. – 528 с. – Т.2. – 456 с.
2. Костюк М.Д. Будівництво та реконструкція залізничної мережі України для збільшення пропускної спроможності та запровадження швидкісного руху поїздів [Текст] / М.Д.Костюк, В.В.Козак, В.О.Яковлев та ін. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2010. – 216 с.
3. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А.Ф.Золотарский, Б.А.Евдокимов, Н.М.Исаев и др.; под ред.А.Ф.Золотарского.- М.: Транспорт, 1980.- 270 с.
4. Иванов Г.С. Эксплуатационная надежность и совершенствование технологии изготовления железобетонных шпал. – М.: Транспорт, 1974. – 160 с.
5. Даниленко Е.І. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України ЦП 0138 [Текст] / Е.І.Даніленко, В.О.Яковлев, А.М.Орловський та ін. – К.: Транспорт України, 2006. – 336 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови
7. Пат.78667 UA Шпала Ш-1-1-PRS. МПК E01B3/00 / УкрДАЗТ; А.М.Плугін, А.А.Плугін, О.І.Белорусов та ін. – Заявл.16.10.2006. – Опубл.10.04.2007. – Бюл.№4.
8. ТУ У 26.6-01116472-107-2006 Шпали залізобетонні попередньо напружені типу Ш з пружним рейковим скріпленням типу PRS для залізниць колії 1520 мм. Технічні умови на дослідну партію / УкрДАЗТ. – Харків, 2006. – 32 с.
9. Пат.36449 UA Пружне рейкове скріплення. МПК 7E01B9/30, 9/66 / УкрДАЗТ; А.М.Плугін, О.І.Белорусов, О.М.Жученко та ін. – Заявл.20.12 1999. – Опубл.17.03.2003. – Бюл.№3.

10. Пат.78666 UA Пружне рейкове скріплення PRS-4. МПК E01B9/30, E01B/68 / УкрДАЗТ; А.М.Плугін, О.І.Белорусов, С.В.Мірошніченко та ін. – Заявл.12.10.2006. – Опубл.10.04.2007. – Бюл.№4.
11. Vossloh Fastening Systems [Електронний ресурс] // Режим доступа: <http://www.vossloh-fastening-systems.com/de/home/home.html>
12. Pandrol [Електронний ресурс] // Режим доступа: <http://www.pandrol.com/html/products/fc.htm>
13. ДБН А.3.1-7-96 Виробництво бетонних та залізобетонних виробів / НДІБВ.- К.: Укранхбудінформ, 1997.- 40 с.
14. Посібник до ДБН А.3.1-7-96 Виробництво бетонних та залізобетонних виробів / НДІБВ.- К.: Укранхбудінформ, 1998.- 94 с.
15. Миронов С.А. Ускорение твердения бетона / С.А.Миронов, Л.А.Малинина. – М.: Стройиздат, 1964. – 347 с.
16. Баженов Ю.М. Технология бетона.- М.: Высш.шк., 1987.- 415 с.
17. Волянський О.А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій. Т.1. Технологія бетону. – К.: Вища школа, 1994. – 271 с.
18. Баженов Ю.М. Пути развития технологии бетона // Сборник научных трудов института строительства и архитектуры. – М.: МГСУ, 2009. – С.13–17.
19. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.
20. Руководство по приготовлению и применению высоко- и сверхвысокопрочных и высокоплотных бетонов с МК / В.Г.Батраков, Е.С.Силина, К.Г.Соболев, Н.Ф.Жигулев. – М.: НИИЖБ, 1992. – 8 с.
21. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика: 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
22. Harsh S. Investigations on Nanosilica Blended Cements / S.Harsh , A.K.Arora, M.M.Ali, M.Vasudeva // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 059. – 7 p.

23. Tobón J.I. Evaluation of Compressive Strength and Durability on Portland Cement blended with Nanosilica / J.I.Tobón, O.J.Restrepo // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 081. – 7 p.
24. Дворкін Л.Й. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах / Л.Й.Дворкін, Н.В.Лушникова, Р.Ф.Рунова, В.В.Троян.- К.: КНУБА, 2007.- 216 с.
25. Fita I.C. Monitoring the Hydration of Mortar containing Metakaolin using Electrical Impedance Spectroscopy / I.C.Fita, J.M.Cruz, J.Payá et al // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 185. – 7 p.
26. Nocuń-Wczelik W. Effect of finely dispersed limestone additives of different origin on cement hydration kinetics and cement hardening / W.Nocuń-Wczelik, G.Łój // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 128. – 7 p.
27. Плугин А.Н. Особенности структурных характеристик бетона α и μ / А.Н.Плугин, О.А.Калинин, Ю.П.Либенко // Интенсификация производства сборного железобетона: Межвуз.сб.науч.тр. – Харьков: ХИИТ, 1990. – Вып.13. – С.62–71.
28. Плугин А.А. Совершенствование состава и структуры бетона с учетом электроповерхностных свойств его составляющих для повышения прочности и стойкости изделий кольцевого сечения / Дисс... канд. техн. наук.- 05.23.05.- Харьков: ХИСИ, 1994.- 245 с.- Библ.201н.
29. Калинин О.А. Совершенствование состава и структуры бетона для повышения трещиностойкости железобетонных изделий: Дисс... канд. техн. наук: 05.23.05.- Защищена 24.01.1996.- Харьков: ХГТУСА, 1995.- 184 с.- Библиограф.: 147 назв.
30. Химические и минеральные добавки в бетон / Под ред. А.В.Ушерова-Маршака.- Харьков: Колорит, 2005.- 280 с.

31. Шумик Д.В. Суперпластифицированная цементно-водная композиция для ремонта горных тоннелей: Дисс... к.т.н. – Харьков: ХарГАЖТ, 2001. – 231 с.
32. Романенко А.В. Особобыстротвердеющий безпропарочный бетон для изготовления шпал без тепловлажностной обработки: Дисс... к.т.н. – Харьков: ХарГАЖТ, 2012
33. Малюга И.Г. Состав и способ приготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости. – 1895.
34. Беляев Н.М. Метод подбора состава бетона: Изд.4-е. – Л.: НИИбетон, 1930. – 55 с.
35. Сорокер В.И. Производственные расчеты состава бетона. – М.: Стройиздат, 1933. – 235 с.
36. Болоней М. Грануляция и предвидение вероятной прочности бетонов / Travaux. – 1935. – №30. – С.26.
37. Макмиллан Ф.Р. Основные принципы приготовления бетона: Пер. с англ. – М.; Л., 1935. – 120 с.
38. Киреенко И.А. Расчет состава высокопрочных и обычных бетонов и растворов на стандартных и мелких песках.- К.: Госстройиздат УССР, 1961.- 80 с.
39. Скрамтаев Б.Г., Шубенкин П.Ф., Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов.- М.: Стройиздат, 1966.- 160 с.
40. Сизов В.П. Проектирование состава бетонов (подбор состава бетонной смеси).- М.: Стройиздат, 1968.- 110 с.
41. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси / Пер. со словацк.- Л.: Стройиздат, 1971.- 239 с.
42. Методика и опыт оптимизации свойств бетона и бетонной смеси / ЦНИИОМТП / Э.Г.Соркин.- М.: Стройиздат, 1973
43. Получение бетона заданных свойств / Ю.М.Баженов, Г.И.Горчаков, Л.А.Алимов, В.В.Воронин.- М.: Стройиздат, 1978.- 53 с.

44. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона.- 3-е изд., перераб.и доп.- М.: Стройиздат, 1979.- 144 с.
45. Шмигальский В.Н. Оптимизация состава цементобетонов. – Кишинев: Штница, 1981. – 123 с.
46. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетона. – Львів: Вища школа, 1981. – 159 с.
47. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А.Вознесенский, В.Н.Выровой, В.Я.Керш и др.; Под ред. В.А.Вознесенского. – К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
48. Определение состава бетона: Методические рекомендации / ЛИСИ; П.И.Боженков, О.В.Усенко.- Челябинск, 1989.- 30 с.
49. Теорія і практика призначення складів бетону / В.М.Пунагін, О.О.Шишкін, О.В.Дзюбан, О.Д.Кирнєв.- К.: УМК ВО, 1990.- 68 с.
50. Дворкин Л.И. Проектирование составов бетона с заданными свойствами / Л.И.Дворкин, О.Л.Дворкин. – Ровно: РДТУ, 1999. – 202 с.
51. Дворкин О.Л. Проектирование составов бетона (основы теории и методологии).- Ровно: УДУВГП, 2003.- 266 с.
52. Рекомендации по назначению состава бетона с учетом маркировки цементов по ГОСТ 10178-62 / НИИЖБ.- М.: Стройиздат, 1968.- 25 с.
53. СН 290-74 Инструкция по приготовлению и применению строительных растворов / Госстрой СССР.- Введ.01.07.75.- М.: Стройиздат, 1975.- 73 с.
54. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ.- М: Стройиздат, 1979.- 102 с.
55. ГОСТ 27006-86 Бетоны. Правила подбора состава / НИИЖБ.- М: ЦИТП, 1989
56. Исследования основных производственных факторов, определяющих расходы цемента при изготовлении железобетонных конструкций: Отчет о НИР / А.Н.Плугин, О.А.Калинин, А.А.Плугин и др. – Харьков, 1998. – 40 с.

57. Рекомендації з виготовлення залізобетонних шпал у відповідності до ТУ У 01116472.021-97 (для Київського експериментального заводу залізобетонних шпал) / А.М.Плугін, О.А.Калінін, А.А.Плугін та ін. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – 58 с.
58. Рекомендації з удосконалення технології виробництва залізобетонних шпал у відповідності з ТУ У 01116472.021 (для Коростенського заводу залізобетонних шпал) / А.М.Плугін, О.А.Калінін, А.А.Плугін та ін. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – 123 с.
59. Заключення щодо відповідності вимогам ТУ У 01116472.021 шпал залізобетонних попередньо напружених із зменшеною кількістю арматури для залізниць колії 1520 мм, що виробляються ЗАТ Кременчуцький ЗЗБШ-2 / А.М.Плугін, О.А.Калінін, А.А.Плугін та ін. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – 45 с.
60. Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: Дисс... докт. хим. наук: 02.00.11.- Харьков: ХИИТ, 1989.- 282 с.
61. Плугин А.Н., Плугин А.А., Трикоз Л.В., Калинин О.А. и др. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х тт. Наукова думка, Київ, 1 (2011) 331, 2 (2012) 224, 3 (2012) 288.
62. А.с.1787972 SU Способ определения состава бетонной смеси: / А.Н.Плугин, О.А. Калинин, А.И.Бирюков, Ю.П.Либенко, А.И.Моисеев, Ю.М.Скородумов.- Заявл. 26.06.1990.- Оpubл. 15.01.1993.- Бюл.№2.
63. Пат.62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону. МПК 7С04В28/12 / А.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, С.М.Кудренко, В.А.Лютій, А.В.Никитинський, І.В.Подтележнікова, Г.О.Линник, М.Д.Костюк, В.О.Яковлєв.- Заявл.15.04.2003.- №2003043396.- Оpubл. 15.06.2005.- Бюл.№6.
64. Пат.71122 UA Спосіб визначення складу важкого бетону з мінеральним наповнювачем. МПК G01N33/38, С04В28/00 / А.М.Плугін, О.А.Калінін,

С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, Арт.М.Плугін, С.М.Кудренко, І.В.Под-
тележникова, О.С.Герасименко, В.А.Лютий, А.В.Никитинський.- Заявл.
21.08.2003.- №2003087901.- Опубл.15.06.2006.- Бюл.№6.

65. Пат.71208 UA Суперпластифікована цементно-водяна суспензія СПЦВС
для цементації гірських порід і будівельних конструкцій. МПК 7С04В28/12 /
А.М.Плугін, Арт.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін,
Д.В.Шумик, Д.А.Плугін, А.В.Никитинський, В.А.Лютий, М.Д.Костюк.-
Заявл.02.12.2003.- №20031210920.- Опубл.25.02.2008.- Бюл.№4.

66. Plugin A.A. Increase of gypsum water resistance by mineral additives /
A.A.Plugin, O.A.Plugin, H.-B.Fisher, G.N.Shabanova // 1 Weimarer Gipstagung,
30–31 März 2011, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar:
F.A.Finger–Institut für Baustoffkunde, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – N P21. –
P.435–443.

67. Плугин А.А. Повышение водостойкости строительного гипса
минеральными добавками / А.А.Плугин, Ал.А.Плугин, Х.-Б.Фишер,
Г.Н.Шабанова // Зб.наук.праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип.122.
– С.227–236.

68. Бабицкий В.В., Марцинкевич В.Л. Длительность тепловлажностной
обработки бетона с добавками-суперпластификаторами и ускорителей
твердения // Мелиорация водное хозяйство. – 1983. – №12. – С 6-8.

69. Jamato J., Kobayashi S. Effekt of temperature on the properties of superplasticcined
concrete // J. Of the American concrete institute. – 1986. – Vol. 83, №1. – P. 60-87.

70. Химические добавки для бетонов и строительных растворов: строительный
каталог СК-4. – М., 2006.

71. Кинд В.А. Условия образования сульфоалюмината кальция / В.А.Кинд,
И.А.Александровский // Строительные материалы. – 1929. – №1; №2.

72. Москвин В.М. Влияние хлористых солей на образование сульфоалюмината
кальция / В.М.Москвин, Т.В.Рубецкая // Цемент. – 1958. – №6.

73. Юнг В.Н. Поверхностно-активные гидрофильные вещества и электролиты в бетонах / В.Н.Юнг, Б.Д.Тринкер. – М.: Госстройиздат, 1960. – 165 с.
74. Овчаров В.И. Применение бетона с добавками хлористых солей и ингибиторов при устройстве покрытий дорог, полов и других сооружений в зимне время. – М.: Госстройиздат, 1962. – 64 с.
75. Балаж Д. Исследование механизма действия ХК при пропаривании бетона и при его твердении в естественных условиях / Д.Балаж, Ф.Тамаш. – М., 1964.
76. Применение химических добавок для ускорения твердения кассетных бетонов: Научно-технический отчет / ХИИТ; В.П.Жильцов, В.Г.Савина, А.Г.Ольгинский, Ф.Г.Бершадский, В.П.Сивцов, А.Г.Малинка, О.П.Торяник, М.Р.Де-Нетто. – Харьков, 1965. – 166 с.
77. Сиверцев Г.Н. Экспериментальные данные для объяснения ускоряющего действия добавок на твердение цемента / Г.Н.Сиверцев, А.И.Лапшина, Л.В.Никитина, Т.А.Ухова // Международная конференция RILEM. – М., 1964.
78. Исследование работы железобетонных шпал: Научно-технический отчет / ХИИТ. – Харьков, 1975. – 136 с.
79. Определение возможности получения комплексной добавки на основе хлорида кальция и суперпластификаторов и исследование эффективности их применения в бетонах: Отчет о НИР №ГР 79070343 / МАДИ. – М., 1980. – 57 с.
80. Исследование рациональных видов цементов, обеспечивающих прочность и долговечность железобетонных шпал: Научно-технический отчет / ХИИТ. – Харьков, 1983. – 136 с.
81. Исследование эффективности добавок для бетонов при производстве железобетонных шпал и опор контактной сети железных дорог. Подбор составов бетона по заданным характеристикам подвижности смеси, прочности бетона, водонепроницаемости и морозостойкости. Разработка рекомендаций по применению добавок при производстве железобетонных шпал и опор контактной сети: Отчет о НИР №5794. – СПб: ПГУПС, 2011.

82. Rickert J. Interactions between Granulated Blastfurnace Slag or Limestone as Cement Main Constituent and Super-Plasticisers Based on Polycarboxylate Ether / J.Rickert , J.Herrmann // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 077. – 7 p.
83. Alonso M.M. Compatibility between PCE admixtures and calcium aluminate cement / M.M.Alonso, T.Vázquez, F.Puertas, M.Palacios // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 087. – 7 p.
84. Habbaba A. Surface chemistry of ground granulated blast furnace slag in cement pore solution: Understanding the behavior of slag in blended cements containing polycarboxylate superplasticizers / A.Habbaba, J.Plank // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 160. – 7 p.
85. Ng S. Formation of Organo-Mineral Phases Incorporating PCE Superplasticizers During Early Hydration of Calcium Aluminate Cement / S.Ng, J.Plank // Cementing a sustainable future: XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 3–8 July 2011. – 188. – 7 p.
86. Ціак М.Я. Термокінетична оцінка і прогноз впливу добавок на твердіння та властивості цементу і бетону: Автореф.дис... д.т.н.. – 05.23.05. – Зах. 22.09.2010. – Київ: КНУБА, 2010. – 39 с.
87. Ложкин В.П., Марцинкевич В.Л., Белецкий И.В. Производство сборного железобетона без тепловой обработки // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 6. – С 103-106.
88. Петрова Т.М. Ресурсосберегающие технологии при изготовлении шпал / Т.М.Петрова, А.Ф.Серенко, В.Н.Егоров // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 9.

89. Petrova T.M. The energy-saving technology in production of prestressed reinforced concrete / T.M. Petrova, E.V. Vikhno, N.A. Dzhashi et al // International Conference on Building materials (16 Ibausil). – Weimar: Tagungsbericht, 2006. – Band 1. – 1-1431. – P.2.15.
90. Петрова Т.М. Принципы выбора комплексных добавок для беспропарочной технологии производства бетона и железобетона / Т.М.Петрова, А.Ф.Серенко, М.И.Милачев, Д.М.Милачев // Строительные материалы. – 2007. – №10.
91. Серенко, А.Ф. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций / Серенко А.Ф., Петрова Т.М. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 136 с.
92. Ларионова З.М., Никитина Л.В., Гарашин В.Р. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона / З.М.Ларионова, Л.В.Никитина, В.Р.Гарашин. – М.: Стройиздат, 1977. – 264 с.
93. Ларионова З.М., Виноградов Б.Н. Петрография цементов и бетонов. М.: Стройиздат, 1974. - 347 с.
94. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ.- М.: Высш.школа, 1981.- 335 с.
95. Железобетонные шпалы (Вопросы изготовления и эксплуатации). Под ред. О.П.Мчедлова-Петросяна.Труды ХИИТа, 86 (1966) 64 с.
96. Железобетонные шпалы (Проблемы надежности и долговечности). Под ред. О.П.Мчедлова-Петросяна.Труды ХИИТа, 109 (1969) 64 с.
97. Технологическое обеспечение долговечности железобетонных шпал. Под ред. О.П.Мчедлова-Петросяна.Труды ХИИТа, 122 (1971) 64 с.
98. Мчедлов-Петросян О.П., Ушеров-Маршак А.В., Колесниченко Л.К. Основы и методы ускорения твердения бетона. Железобетонные шпалы. Труды ХИИТа, 86 (1966) 18- 30.
99. Гасан Ю.Г., Кутах А.П. Комплексные добавки – интенсификаторы твердения бетона. Интенсификация производства сборного железобетона.

Межвуз. сб. научн. тр., ХИИТ (1986) 28-30.

100. Москвин В.М. Добавки - ускорители твердения бетона. Москва (1937).

101. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. Стройиздат, Москва (1989) 188 с.

102. Ramachandran V.S., Feldman R.F. Concrete admixture handbook. Properties, Science, and Technology. Noyes Publication. USA. 1984

103. Рыльцева Т.Н. Повышение трещиностойкости защитного слоя струнобетона в зоне передачи напряжений. Автореф. дисс... к.т.н. 05.23.05. ХАДИ, Харьков (1986) 20 с.

104. Плугин А.А. Повышение качества опор контактной сети на основе применения статистических методов. Интенсификация производства сборного железобетона. Межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ, 13 (1990) 51-57.

105. Мирошніченко С.В., Плугин А.Н., Плугин А.А., Корниенко І.Г. К вопросу исследования трещиностойкости железобетонных плит безбалластного мостового полотна. Будівельні конструкції, 72 (2009) 457-464.

106. Плуґін А.А., Забіяка О.А., Мірошніченко С.В., Линник Г.О., Бабенко А.І. Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбалластного полотна залізничних мостів. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 109 (2009) 120-131.

107. Плуґін А.А., Мірошніченко С.В., Лобяк О.В., Забіяка О.А., Линник Г.О., Шуба Т. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбалластного мостового полотна і прокладного шару під ними. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 148 (2) (2014) 104–110.

108. Забіяка О.А. Механізм тріщиноутворення у плитах безбалластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості. Автореф. дисс... к.т.н. 05.23.05. УкрДУЗТ, Харків (2015) 23 с.

109. Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих. Автореф. дис. д.т.н. 02.00.11. ИКХХВ НАНУ, Київ (1989) 33 с.

110. Калинин О.А. Совершенствование состава и структуры бетона для повышения трещиностойкости железобетонных изделий. Автореф. дисс... к.т.н. 05.23.05. ХДТУБА, Харків (1996) 20 с.
111. Пат.62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону. А.М.Плугін, О.А.Калінін, С.В.Мірошніченко, А.А.Плугін, В.А.Лютий, А.В.Никитинський, І.В.Подтележнікова, Г.О.Линник, М.Д.Костюк, В.О.Яковлев. УкрДАЗТ. Заявл.15.04.2003, №2003043396. Опубл. 15.06.2005, Бюл.№6.
112. Плугін А.А., Плугін А.М., Романенко О.В., Яковлев В.О., Борзяк О.С., Плугін О.А., Дудін О.А. Дослідження можливості виробництва залізобетонних шпал за безпропарювальною технологією. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 91 (2008) 211-224.
113. Плугін А.А., Романенко О.В., Яковлев В.О. Обґрунтування скорочення енерговитрат при тепловологісній обробці залізобетонних шпал. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 109 (2009) 38-56.
114. Романенко О.В., Плугін А.А., Яковлев В.О. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 115 (2010) 97-103.
115. Романенко А.В., Плугин А.А., Плугин А.Н., Калинин О.А., Плугин Ал.А. Развитие теоретических представлений о ранней прочности цементного камня и бетона и механизме формирования их первичной структуры. ЕЕJET 5/10(59) (2012) 28–32.
116. Плугін А.А., Романенко О.В., Калінін О.А., Плугін О.А., Афанасьєв О.В. Вплив добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на кінетику набору міцності цементним каменем. Вісник НТУ «ХПІ», 1130 (21) (2015) 14–22.
117. Plugin A.A., Plugin A.N., Plugin O.A., Romanenko O.V., Kalinin O.A., Miroshnichenko S.V., Babii A.I., Partala N.M. Reducing of energy intensity of

concrete sleepers production using superplasticizer sand hardening accelerators. 19 Ibausil, Weimar, 2 (2015) 1125–1133.

118. Романенко О.В. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон для виготовлення залізобетонних шпал без тепловологісної обробки. Автореф. дис... к.т.н. 05.23.05. УкрДУЗТ, Харків (2012) 21 с.

119. Пат. 99426 UA Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / Пługін А.А., Пługін А.М., Романенко О.В., Пługін О.А., Калінін О.А., Пługін Д.А., Мірошніченко С.В.; УкрДАЗТ. – Заявл.14.12.2011. – Заявка № а 2011 14838. – Опубл.10.08.2012. – Бюл.№15.

120. Пługін, А.А. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами твердіння для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання / А.А.Пługін, О.В.Романенко, А.І.Бабій, О.А.Калінін, О.А.Пługін // 36. наук. праць УкрДУЗТ. – Харків, 2015. – Вип.155. – С.62–72.

121. Пługін А.А., Романенко О.В., Калінін О.А., Пługін О.А., Борзяк О.С. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами твердіння для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання та їх фізико-хімічні дослідження. Міжнар. наук.-практ. конфер. «Ефективні технологічні рішення в будівництві з використанням бетонів нового покоління, ХНУСА, Харків (2015) 39–50.

122. Plugin A.A., Runova R.F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates. International Journal of Engineering Research in Africa, 36 (2018) 69-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.

123. Серенко А.Ф., Петрова Т.М. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций. Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, Москва (2012) 136 с.

124. Гев'юк І.М. Мультиmodalні композиційні портландцементи з високою

- ранньою міцністю та модифіковані бетони на їх основі. Автореф. дис... к.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2018) 21 с.
125. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Kruts T., Horpynko O., Geviuk I. Design of rapid hardening quaternary zeolite-containing Portland-composite cements. *Key Engineering Materials*. 761 (2018) 193-196. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.193.
126. 326. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 84 (6/6) (2016) 50–57.
127. Дворкін Л.Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах. КНУБА, Київ (2007) 216 с.
128. Еленова А.А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня. Дисс... к.т.н. 05.17.11. РХТУ им. Д.Менделеева, Москва (2017) 164 с.
129. Кривобородов Ю.Р., Еленова А.А. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента. *Строительные материалы*. 9 (2016) 65-67.
130. Марущак У.Д. Наномодифіковані надшвидкотверднучі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі. Автореф. дис... д.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2019) 37 с.
131. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Nanomodified Portland cement compositions with alkaline activation. *Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym: Praca zbiorowa*. 2(18) (2016) 119– 128.
132. Кропивницька Т.П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі. Автореф. дис... д.т.н. 05.23.05. НУ «Львівська політехніка» (2020) 36 с.
133. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 100 (4/6)

(2019) 38–48.

134. Плугін А.М., Плугін А.А., Тулей Ю.Л., Мірошніченко С.В. та ін. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними рейковими скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ. Зб. наук. праць УкрДАЗТ 148 (2) (2014) 92-103.

135. Плугін А.А., Плугін А.М., Мірошніченко С.В. та ін. Досвід експлуатації пружних рейкових скріплень типу PRS і залізобетонних шпал із ними. Українські залізниці, 3–4 (2015) 60–64.

136. Плугін А.А., Мірошніченко С.В., Калінін О.А., Ляху Л.В., Ганжела С.Ю. Експериментальні дослідження тріщиностійкості залізобетонних шпал з безпідкладковим пружним рейковим скріпленням. Зб. наук. праць УкрДУЗТ, 192 (2020) 11–23.

137. Plugin A. A., Miroshnichenko S. V., Lobiak O. V., Kalinin O. A., Plugin D. A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1002 (1) (2020) 012010. DOI: 10.1088/1757- 899X/1002/1/012010.

138. Плугін А.А., Крикун О.П., Зінченко В.В., Борзяк О.С., Дудін О.А. Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційно здатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії. Зб. наук. праць УкрДУЗТ, 196 (2021) 43-57.

139. Романенко О.В., Калінін О.А., Плугін О.А., Плугін А.А., Бабій А.І. Аналіз складів бетону для виготовлення залізобетонних шпал на заводах ЗБШ України. Науковий вісник будівництва 80 (2) (2015) 144–147.

140. Методика визначення оптимального складу високоміцного, тріщиностійкого та водонепроникного бетону для конструкцій і споруд залізничного транспорту. У ЦП-0224 Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна. УкрДАЗТ, ЦП УЗ, Київ (2010) 16–23.

141. Плугин А.Н., Плугин А.А., Борзяк О.С., Калинин О.А. Уточнение

- количественной теории прочности бетона и закона водоцементного отношения. Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 109 (2009) 8–37.
142. СТ СЭВ 4421-83 Защита от коррозии в строительстве. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний
143. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови
144. Taylor, H.F.W., Cement Chemistry. Academic Press, London, 1990, pp.173.
145. 8. Matschei, T., Lothenbach, B., Glasser, F.P., The AFm phase in Portland cement. Cement and Concrete Research, 2007. 37(2): p.118–130.
146. Andersen, M.D., Jakobsen, H.J., Skibsted, J., Characterization of the α - β Phase Transition in Friedel's Salt ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) by Variable-Temperature ^{27}Al MAS NMR Spectroscopy. The Journal of Physical Chemistry, 2002. 106(28): p.6676–6682.
147. Suryavanshi, A.K., Swamy, R.N., Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. Cem. Concr. Res. 26 (5) (1996) 729–741.
148. Rapin, J.P., Elkaim, E., Francois, M., Renaudin, G., Structural transition of Friedel's salt $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ studied by synchrotron powder diffraction. Cement and Concrete Research 2002. 32: p. 513-519.
149. J. Stark, I. Chartchenko, P. Krivenko, R. Runova, M. Kochevykh, I. Rudenko. Particular features of by-pass dust utilization in slag containing dsnders. XI Int. CCC, Durban, 2003, p.1193-1201.
150. Balonis, M. The Influence of Inorganic Chemical Accelerators and Corrosion Inhibitors on the Mineralogy of Hydrated Portland Cement Systems: A Thesis presented for the degree of PhD. – Aberdeen: University of Aberdeen, 2010. – 294 p.

151. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А.А.Равделя и А.М. Пономаревой. – Санкт-Петербург: Специальная литература, 1998. – 232 с.
152. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И.Бабушкин, Г.М.Матвеев, О.П.Мчедлов-Петросян; под ред. О.П.Мчедлова-Петросяна. – Москва: Стройиздат, 1988. – 408 с.
153. Plank J. Concrete Admixtures – Where Are We Now and what we can expect in future? [Текст] / 19`Ibausil.- Weimar, 2015. – PV03. -18 pp.

