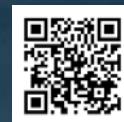


Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)
ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] №9



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU СЕНТЯБРЬ 2020 г. (784)

БЕЗ ПРОБЛЕМ



Печи Мерц для обжига извести чрезвычайно эффективны при любом климате. На протяжении многих десятилетий. Там где Вы находитесь воздух немного разрежен? Без проблем: maerz.com





СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА



ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Trade Fair for Construction Materials

★ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ:

Салон станков, оборудования, технологий и сырья
для индустрии керамической промышленности

КЕРАМБРИКТЕХ CERAMBRICKTECH

Переработка и управление отходами

RWEXPO RECYCLING WASTE EXPO



26.01 | 29.01

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
МОСКВА, 2021

реклама

16+



ОРГАНИЗАТОР /
Organizer:

МОСКВА, РОССИЯ

ЕВРОЭКСПО



VIENNA, AUSTRIA

EUROEXPO

Exhibitions and Congress Development GmbH



www.osmexpo.ru

Бетоны: наука и практика

Г.В. КУЗНЕЦОВА, Н.Н. МОРОЗОВА

Добавка для автоклавного газобетона на быстрогасящейся извести 4

А.С. СИДОРОВА, С.Г. АНЦУПОВА, А.Л. ПОПОВ

**Физико-механические характеристики тяжелого бетона
с использованием местного вторичного сырья** 9

Современные вяжущие материалы

Е.Н. ПОТАПОВА, Т.В. ГУСЕВА, И.О. ТИХОНОВА, А.С. КАНИШЕВ, Р.Г. КЕМП

**Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности
и снижения негативного воздействия на окружающую среду** 15

О.В. ЧЕРНОУСОВА, О.Б. РУДАКОВ, С.О. САДЫКОВ

Контроль содержания пигментов в цветных цементах с помощью мобильных устройств 21

Ю.В. СОКОЛОВА, А.М. АЙЗЕНШТАДТ, Е.В. КОРОЛЕВ, А.А. ЧИБИСОВ

**Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование
полимер-органического связующего** 27

Материалы и технологии

М.К. ИЩУК, Х.А. АЙЗЯТУЛЛИН, О.К. ГОГУА

Исследования связей из полимерных композитных сеток для трехслойной кладки 37

25 лет: от учебного центра предприятия до корпоративной Академии КНАУФ (Информация) 44

С.Ю. АНДРОНОВ, А.Ф. ИВАНОВ, А.В. КОЧЕТКОВ, В.И. АЛФЕРОВ

**Практическое применение направленного структурообразования асфальтовых материалов
с дисперсным битумом на стадии объединения составляющих компонентов** 46

Результаты научных исследований

Е.В. КОРОЛЕВ, А.Н. ГРИШИНА, А.М. АЙЗЕНШТАДТ

Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности 54

А.В. ЗАХАРОВ, У.Ш. ШАЯХМЕТОВ, Е.А. СИНИЦИНА, И.В. НЕДОСЕКО, А.Н. ПУДОВКИН

Применение теории зернистой структуры в строительном материаловедении 62

Founder of the journal:
«STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Registration certificate PI № 77–1989
Included in the list of journals of
the Higher Attestation Commission
(Russia), Project Russian Science
Citation Index (Russia), Russian
Science Citation Index on the platform
Web of Science

Editorial address:
9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 9

Founded in 1955

(784) September 2020

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Concrete: science and practice

G.V. KUZNETSOVA, N.N. MOROZOVA

Additive for Autoclave Aerated Concrete on Quick-Slaking Lime 4

A.S. SIDOROVA, S.G. ANTSUPOVA, A.L. POPOV

Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Local Secondary Raw Materials 9

Modern binding materials

E.N. POTAPOVA, T.V. GUSEVA, I.O. TIKHONOVA, A.S. KANISHEV, R.G. KEMP

**Cement Production: Aspects of the Resource Efficiency Enhancement
and Negative Environmental Impact Reduction 15**

O.V. CHERNOUSOVA, O.B. RUDAKOV, S.O. SADYKOV

Control of the Pigment Content in Colored Cements Using Mobile Devices 21

Yu.V. SOKOLOVA, A.M. AIZENSHTADT, E.V. KOROLEV, A.A. CHIBISOV

**Evaluation of the Influence of Prescription Factors on the Structure Formation
of Polymer–Organic Binder 27**

Materials and technologies

M.K. ISHCHUK, KH.A. AIZYATULLIN, O.K. GOGUA

Research of Ties from Polymer Composite Meshes for Three–Layer Masonry 37

25 years: from the Training Center of the Enterprise to the KNAUF Academy (Information) 44

S.Yu. ANDRONOV, A.F. IVANOV, A.V. KOCHETKOV, V.I. ALFEROV

**Practical Application of Directional Structure Formation of Asphalt Materials
with Dispersed Bitumen at the Stage of Combining Components 46**

Results of scientific research

E.V. KOROLEV, A.N. GRISHINA, A.M. AIZENSHTADT

Analysis of Structure Formation of Composites Using Fractal Dimension 54

A.V. ZAKHAROV, U.Sh. SHAYAKHMETOV, E.A. SINITSINA, I.V. NEDOSEKO, A.N. PUDOVKIN

Application of the Theory of Granular Structure in Building Materials Science 62

Редакционный совет

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

ВАЙСБЕРГ Л.А.,

д-р техн. наук, профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

КОРОЛЕВ Е.В.,

д-р техн. наук, профессор (Москва)

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Иваново)

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ЧЕРНЫШОВ Е.М.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Воронеж)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editorial Board

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

BURYANOV A.,

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

VAYSBERG L.,

Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS (St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

EROFEEV V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saratov)

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Moscow)

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

TRAVUSH V.,

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

FEDOSOV S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Voronezh)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

Candidate of Science (Engineering), OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

Г.В. КУЗНЕЦОВА, инженер (kuznetzowa.gal@yandex.ru),
Н.Н. МОРОЗОВА, канд. техн. наук (ninamor@mail.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

Добавка для автоклавного газобетона на быстрогасящейся извести

Рассматривается вопрос применения порошкообразных добавок, полученных из отходов производства силикатного кирпича и газобетона. Содержание 75,5% кварца в составе силикатного кирпича делает возможным использование его в молотом виде как аналог молотого песка с добавкой гидросиликатов в производстве силикатного кирпича и газобетона. Проведено исследование влияния добавки молотого кирпича на сроки схватывания и прочностные характеристики цементно-песчаного раствора. Рассмотрен вопрос ввода добавки при помоле песка, установлено влияние добавки на песочный шлам и его реологические свойства. Приведена технологическая схема ввода добавки при получении песочного шлама. Приготовлена комплексная добавка на основе молотого кирпича, пластификатора и гипсового камня с решением вопросов подвижности, времени гашения извести и прочности. Определена эффективность добавки для цементно-песчаного раствора при разных видах тепловой обработки. Установлена эффективность применения добавки при автоклавной обработке. Приводятся данные исследования комплексной добавки в составе газобетонной смеси. Установлено, что добавка эффективна для получения газобетона при применении извести быстрого гашения.

Ключевые слова: добавка, газобетон, кирпич, пластификатор, плотность.

Для цитирования: Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Добавка для автоклавного газобетона на быстрогасящейся извести // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-4-8>

G.V. KUZNETSOVA, Engineer, N.N. MOROZOVA, Candidate of Sciences (Engineering)
Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Russian Federation)

Additive for Autoclave Aerated Concrete with Quick-Slaking Lime

The article deals with the use of powdered additives obtained from the production waste of silicate bricks and aerated concrete. The content of 75.5% quartz in the composition of silicate bricks makes it possible to use it in a ground form as an analog of ground sand with the addition of hydrosilicates in the production of silicate bricks and aerated concrete. The influence of the addition of ground bricks on the setting time and strength characteristics of the cement-sand mortar was studied. The issue of introducing an additive when grinding sand is considered, the effect of the additive on sand sludge and its rheological properties is established. The technological scheme of introducing the additive when preparing the sand sludge is given. A complex additive based on ground brick, plasticizer and gypsum stone was prepared with the solution of the issues of mobility, lime slaking time and strength. The efficiency of the additive for cement-sand mortar for different types of heat treatment is determined. The effectiveness of the additive at autoclave processing was established. The data of the study of a complex additive in the composition of a gas-concrete mixture are presented. It was found that the additive is effective for obtaining aerated concrete when using quick-slaking lime.

Keywords: additive, aerated concrete, brick, plasticizer, density.

For citation: Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Additive for autoclave aerated concrete with quick-slaking lime. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 4–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-4-8>

Производство газосиликатного бетона на предприятиях чаще всего располагается на одной территории с производством силикатного кирпича, блоков, тротуарной плитки и сухих смесей. При резательной технологии с одним кантованием появляются отходы в виде подрезного слоя; в производстве гидратной извести — отходы, непогасившиеся после классификатора; в производстве рустированного кирпича — бой кирпича. Все эти отходы требуют утилизации. Один из вариантов — это использование их в виде добавок в производстве. Содержание 75,5% кварца в составе силикатного кирпича делает возможным его использование в молотом виде как аналог молотого песка [1], а гидросиликаты в качестве добавки способствуют повышению прочности за счет лучшей перекристаллизации CSH(1) в тоберморит [2].

В качестве примера можно привести применение боя кирпича в производстве известкового вяжущего. В производстве силикатного кирпича есть мельницы для приготовления вяжущего, и вопрос утилизации решается достаточно просто.

В статье представлено сравнение размолоспособности силикатного кирпича и кварцевого песка. Для исследования был использован силикатный кирпич наибольшего спроса, выпуска марки 150. Помол материалов произведен на дисковом истирателе ИДА-175 с предварительным дроблением до наибольшего размера зерен 2,5 мм в лабораторной дробилке ДЛЩ-10 (рис. 1).

Из полученных результатов видно, что для помола кварцевого песка необходимо больше времени по сравнению с силикатным кирпичом. Это объясняется содержанием 95% кварца в песке и 75%

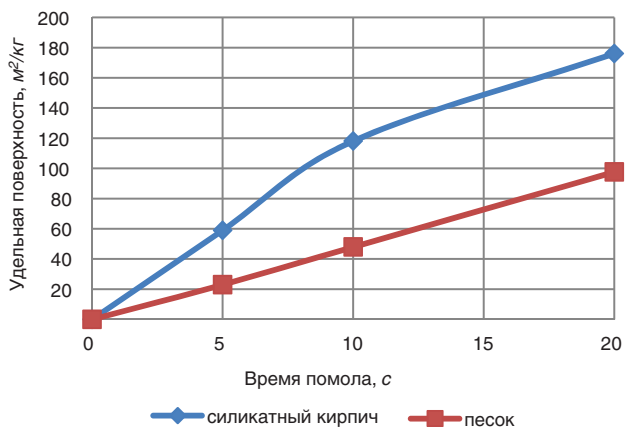


Рис. 1. Размолоспособность материалов
Fig. 1. Grindability of materials

соответственно в кирпиче. Характеристики молотых добавок представлены в таблице.

Проведено исследование использования молотого кирпича в составе известково-кремнеземистого вяжущего в технологии производства силикатного кирпича (рис. 2).

На основании полученных результатов следует отметить, что добавка молотого кирпича повышает автоклавную прочность, следовательно, может быть применена и в производстве газобетона.

В технологии газобетона на смешанном вяжущем цемент необходим в качестве структуроформирующего компонента в доавтоклавный период твердения [3]. Далее определено влияние добавки молотого кирпича на сроки схватывания цемента (рис. 3). В исследовании применен цемент ЦЕМ I 42,5 Н производителя ООО «Holcim» г. Вольск.

Как видно из полученных результатов, добавка молотого кирпича не оказывает влияния на сроки схватывания цемента.

В связи с высокой водопотребностью молотых добавок, которая составила для добавки из кирпича 38,8%, а для газобетона 65,5% ввод их непосредственно в смесь снижает ее подвижность [4], что является негативным фактором для ячеистой бетонной смеси.

В технологии газобетона возможно предварительное насыщение добавок водой, если их вводить во время помола песка, т. е. на линии производства песочного шлама. Также исследовано влияние добавки молотого кирпича на плотность и водопотребность песочного шлама. Для определения влияния на плотность и водопотребность по расплыву

Характеристики молотых добавок

Наименование молотых добавок	Истинная плотность	Удельная поверхность
	г/см ³	м ² /кг
Силикатный кирпич	2,57	690–703
Песок кварцевый	2,65	286–293

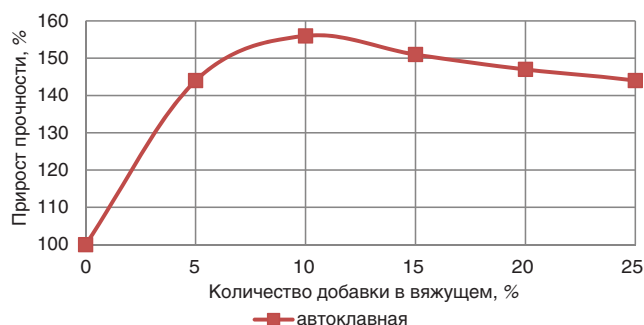


Рис. 2. Влияние добавки молотого кирпича в составе известково-кремнеземистого вяжущего на автоклавную прочность силикатного кирпича
Fig. 2. Influence of the addition of ground bricks in the composition of lime-silica binder on autoclave strength of silicate bricks

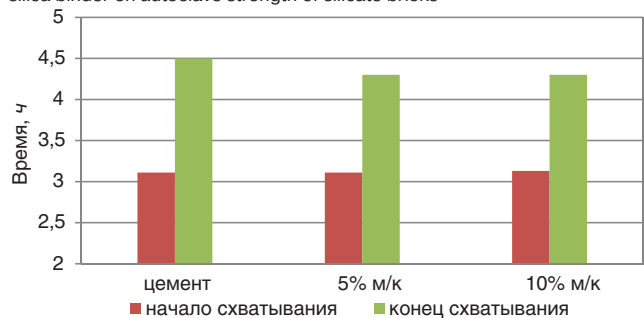


Рис. 3. Влияние добавки молотого кирпича на сроки схватывания цемента
Fig. 3. Influence of the addition of ground bricks on the setting time of cement

цилиндра использовали вискозиметр с диаметром 25 мм и высотой 50 мм. Требуемый расплыв составляет 20–23 мм. Результаты приведены на рис. 4, 5.

Как видно из полученных данных, при введении добавки молотого силикатного кирпича в состав

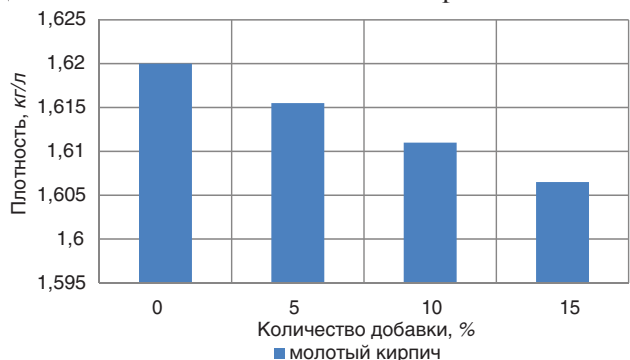


Рис. 4. Влияние добавки молотого кирпича при равной подвижности на плотность шлама
Fig. 4. Effect of the addition of ground bricks at equal mobility on the density of the sludge

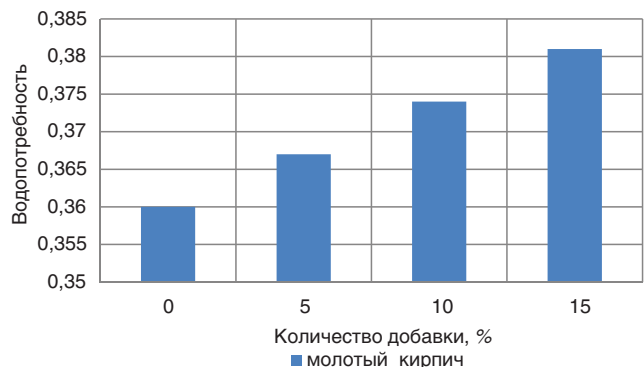


Рис. 5. Влияние добавки молотого кирпича при равной подвижности на водопотребность песочного шлама
Fig. 5. Effect of the addition of ground brick at equal mobility on the water demand of sand sludge

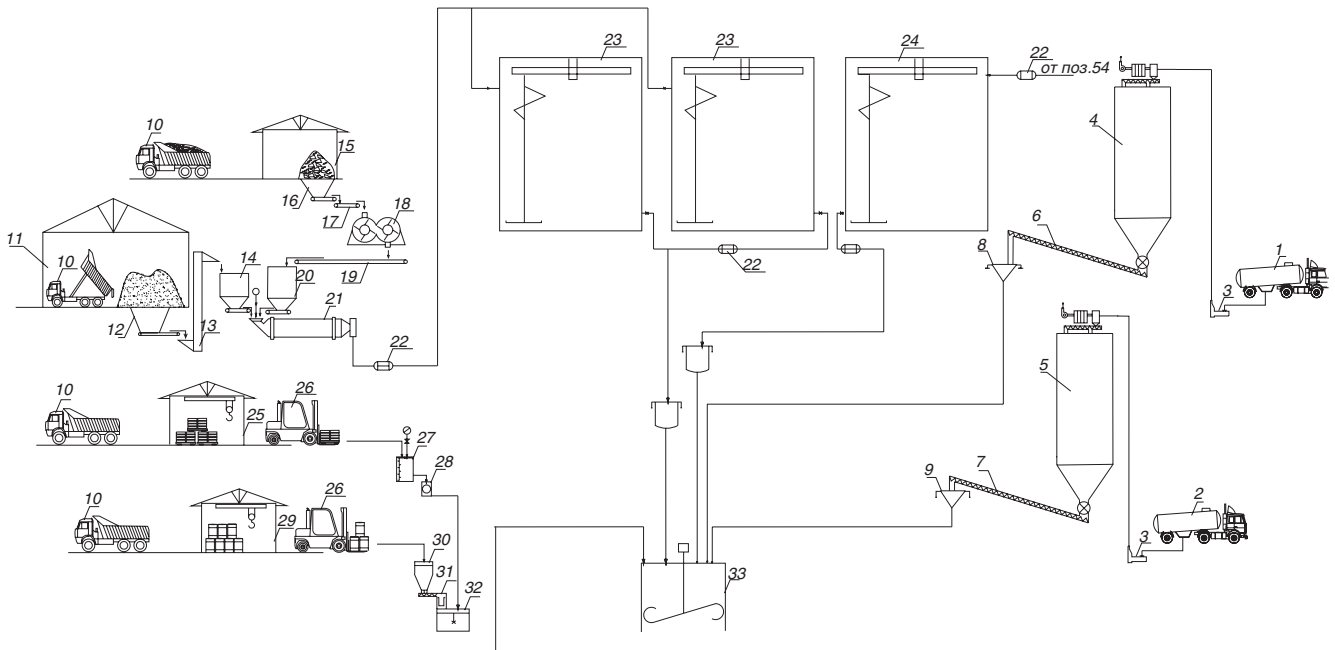


Рис. 6. Технологическая схема ввода добавки при помоле песка и приготовления ячеистой бетонной смеси: 1 – цементовоз; 2 – автомашина для доставки порошкообразной извести; 3 – пневмоподъемник; 4 – силосная банка цемента; 5 – силосная банка извести; 6 – шнековый питатель цемента; 7 – шнековый питатель извести; 8 – дозатор цемента; 9 – дозатор извести; 10 – автотранспорт; 11 – крытый склад песка; 12 – приемный бункер песка; 13 – элеватор; 14 – расходный бункер песка; 15 – бой силикатного кирпича; 16 – приемный бункер боя кирпича; 17 – питатель; 18 – роторная дробилка; 19 – конвейер; 20 – расходный бункер щебня кирпича; 21 – шаровая мельница; 22 – насос; 23 – шламбассейн; 24 – шламбассейн обратного шлама; 25 – склад ПАВ; 26 – автопогрузчик; 27 – смеситель ПАВ; 28 – дозатор ПАВ; 29 – склад алюминиевой пудры; 30 – расходный бункер пудры; 31 – дозатор пудры; 32 – смеситель суспензии; 33 – смеситель ячеисто-бетонной смеси

Fig. 6. Technological scheme of introducing the additive when grinding the sand and preparing the cellular concrete mix: 1 – cement truck; 2 – car for delivery of powdered lime; 3 – pneumatic lift; 4 – cement silo; 5 – lime silo; 6 – screw cement feeder; 7 – screw lime feeder; 8 – cement batcher; 9 – lime batcher; 10 – motor transport; 11 – covered sand storage; 12 – sand receiving hopper; 13 – elevator; 14 – sand feed hopper; 15 – silicate brick breakage; 16 – receiving hopper of brick breakage; 17 – feeder; 18 – rotary crusher; 19 – conveyor; 20 – feed hopper of crushed bricks; 21 – ball mill; 22 – pump; 23 – slurry basin; 24 – slurry basin of reverse sludge; 25 – surfactant warehouse; 26 – loader; 27 – surfactant mixer; 28 – surfactant batcher; 29 – aluminum powder warehouse; 30 – powder feed hopper; 31 – powder batcher; 32 – suspension mixer; 33 – cellular concrete mix mixer

песочного шлама уменьшается его плотность, но увеличивается водопотребность. Данные изменения реологических свойств песочного шлама могут легко корректироваться количеством добавляемой воды. Технологическая схема ввода добавки при помоле песка и приготовления ячеистой бетонной смеси рис. 6.

При использовании добавки молотого кирпича на первый план вышли следующие задачи: сохранить подвижность смеси, увеличить время гашения извести и повысить прочность изделия.

Решить проблему стабилизации вязкопластических свойств газобетонной смеси возможно за счет управления реологическими характеристиками ячеистого бетона путем введения пластифицирующих добавок [5]. Пластификаторы и гипсовый камень, как отмечалось в ряде исследований [6], приводят помимо разжижения к увеличению времени гашения извести. На рис. 7 приведены коэффициенты замедления гидратации извести с пластификатором С-3 и двухводным гипсом ГК.

С использованием полученных результатов суперпластификатор С-3 имеет больший коэффициент замедления, чем добавка гипсового камня на 14%. Известно также, что добавка гипсового камня понижает температуру гашения извести в два раза больше, чем добавка суперпластификатора С-3 [3].

На основе полученных данных была приготовлена комплексная добавка КД-1 на основе кирпича, гипсового камня и С-3.

Для определения влияния данной добавки на прочность цементно-песчаного раствора в зависимости от условий твердения изготовлены три серии образцов из цементно-песчаной смеси (ЦПС) при

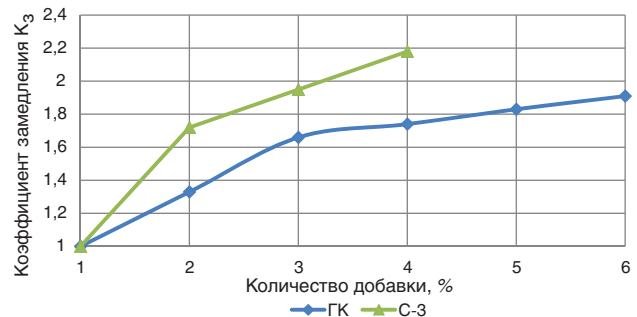


Рис. 7. Коэффициент замедления гидратации извести с пластификатором С-3 и двухводным гипсом

Fig.7. The coefficient of retardation of the lime hydration with plasticizer C-3 and dihydrate gypsum

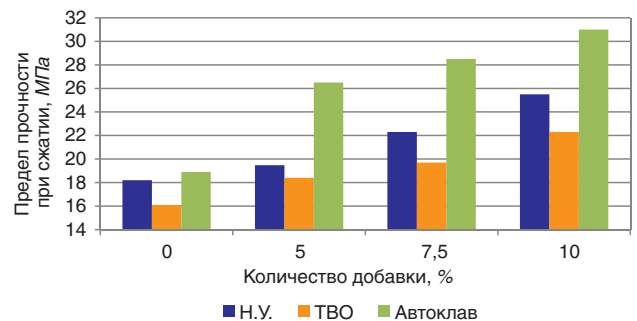


Рис. 8. Влияние добавки КД-1 на предел прочности при сжатии

Fig.8. Effect of the KD-1 additive on the compressive strength limit

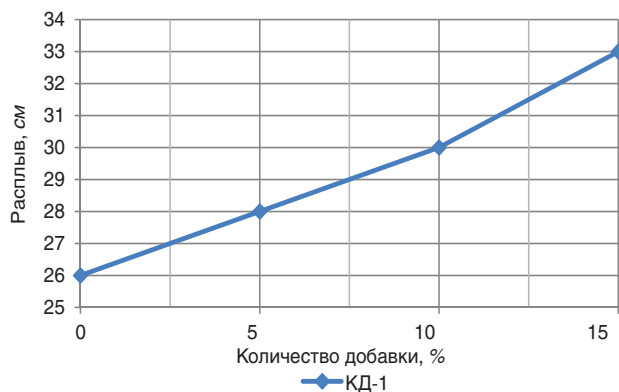


Рис. 9. Влияние добавки на подвижность ячеистой бетонной смеси
Fig. 9. Effect of the additive on the mobility of cellular concrete mix

отношении цемента к песку 1:4 по массе. Все составы имели одинаковую консистенцию. Консистенцию ЦПС определяли на встряхивающем столике. Расплав конуса при В/Ц=0,4 должен быть в пределах 106–115 см. В эксперименте все составы имели расплав 110–112 мм, после чего из полученной смеси формовали образцы-балочки с размерами 40×40×160 мм. Серия образцов подверглась тепло-влажностной обработке при температуре 95°C, часть оставили в камере нормального твердения на 28 сут, третью серию образцов подвергли автоклавной обработке при давлении 1,2 МПа. Далее образцы-балочки испытывали на сжатие (рис. 8).

Как видно из полученных результатов, добавка эффективна при всех условиях твердения как для показателей прочности на изгиб, так и на сжатие. Образцы, прошедшие автоклавную обработку, имеют прочность выше, чем образцы после ТВО и твердевшие в нормальных условиях. Для образцов, прошедших автоклавную обработку, прирост прочности при сжатии относительно бездобавочного образца составил при дозировке 5% добавки – 40%, при 10% дозировке – 64%.

Для образцов, твердеющих при нормальных условиях, прирост прочности при сжатии относительно бездобавочного образца составил при дозировке 5% добавки – 7%, при 10% дозировке – 40%.

Для образцов, твердеющих при ТВО прирост прочности при сжатии относительно бездобавочного образца составил при дозировке 5% добавки – 14%, при 10% дозировке – 38,5%.

Таким образом, полученные результаты показывают, что разработанная комплексная добавка КД-1 эффективна при автоклавировании изделий.

Далее было оценено влияние комплексной добавки на свойства газобетонной смеси. Приготовлена ячеистая бетонная смесь для D600 с добавкой КД-1 в количестве 5, 10, 15% от массы песка. Время перемешивания составило 4 мин.

На первом этапе было определено влияние комплексной добавки на подвижность ячеистой бетонной смеси. Подвижность оценивали по диаметру расплава смеси, который определяли с помощью вискозиметра Сутгарда (рис. 9).

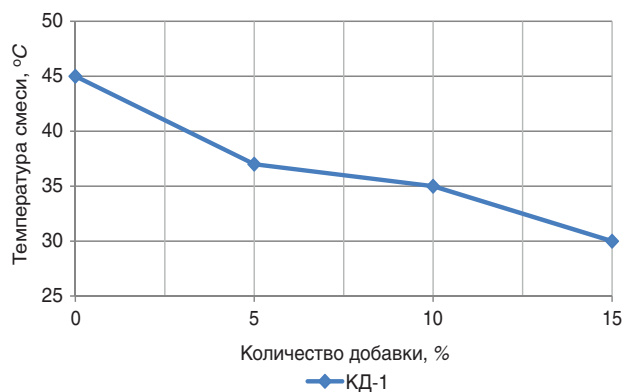


Рис. 10. Влияние добавки на температуру смеси
Fig. 10. Effect of the additive on the mixture temperature

Как видно из рис. 9, добавка КД-1 увеличивает подвижность ячеистой бетонной смеси, что в свою очередь позволяет снижать В/Т смеси. Следующим этапом нашего исследования было определение температуры газобетонной смеси. Температуру определяли спиртовым термометром после заливки

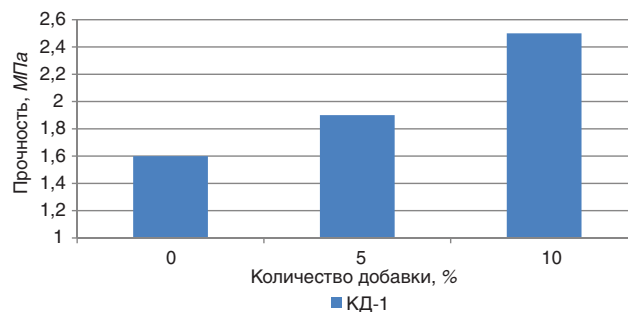


Рис. 11. Влияние комплексной добавки на автоклавную прочность
Fig. 11. Effect of the complex additive KD-1 on the autoclave strength

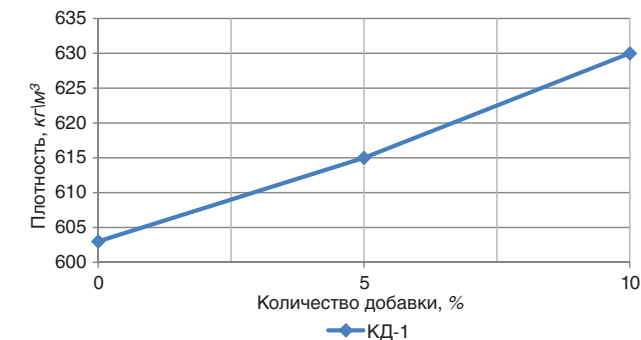


Рис. 12. Влияние добавки на плотность газобетона
Fig. 12. Effect of the additive on the gas concrete density

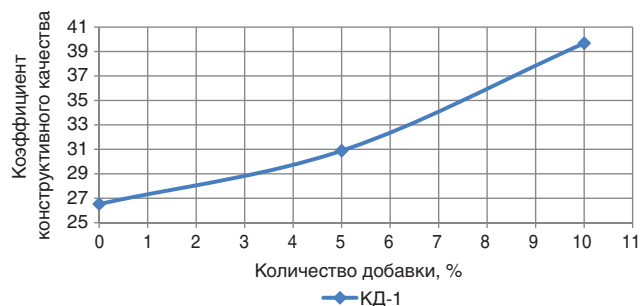


Рис. 13. Влияние добавки на коэффициент конструктивного качества
Fig. 13. Influence of the additive on the coefficient of structural quality

смеси в форму. Температура воды затворения для известково-цементной смеси составляла 45°C.

Анализируя результаты (рис. 10), можно сказать, что добавка понижает температуру ячеистой бетонной смеси. По требованиям СН 277–80 температура растворной смеси для литевой технологии при формовании должна составлять 35°C.

Далее из приготовленной смеси формовали образцы-кубы размером 10×10×10 см. После автоклавной обработки под давлением в 1,2 МПа образцы испытывали на сжатие и определяли плотность. Навеску каждого образца просушивали в сушильном шкафу при температуре 100°C в течение суток для определения поправочного коэффициента по влажности. Далее рассчитывалась прочность образцов. Результаты представлены на (рис. 11).

На основании полученных данных можно сказать, что при введении добавки КД-1 в количестве 5% взамен молотого песка прочность газобетона возрастает.

Плотность газобетона при введении добавки также возрастает (рис. 12), причем, чем выше содержание добавки, тем выше плотность газобетона. Поэтому прочностные характеристики газобетона

оценивали с помощью коэффициента конструктивного качества (рис. 13), представляющего собой отношение предела прочности при сжатии к относительной плотности.

На основании полученных результатов видно, что добавка КД-1 является эффективной. Прирост автоклавной прочности составил при введении КД-1 в количестве 5–13%, а в количестве 10–33%.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- разработана комплексная добавка КД-1, которая позволяет решить одну из важнейших проблем сегодняшнего дня, а именно утилизацию промышленных отходов и улучшить качество автоклавных изделий;
- газобетон с добавкой КД-1 может изготавливаться с применением быстрогасящейся извести;
- добавка КД-1 эффективна в цементных системах;
- добавка КД-1 увеличивает подвижность ячеистой бетонной смеси и снижает ее водопотребность;
- оптимальным является введение добавки КД-1 в количестве 10% от массы сухих компонентов бетона, при этом наблюдается значительный прирост автоклавной прочности.

Список литературы

1. Кузнецова Г.В., Шинкарев А.А., Морозова Н.Н., Газимов А.З. Добавки для прямой технологии производства силикатного кирпича // *Строительные материалы*. 2018. № 9. С.12–16.
2. Лаукайтис А.А. Исследование влияния добавки молотых отходов ячеистого бетона на его свойства // *Строительные материалы*. 2004. № 3. С. 33–34.
3. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н., Потапова Л.И., Клоков В.В. Комплексная добавка для автоклавного газобетона // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 36–39.
4. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н., Юсупов И.Д. Исследование влияния дисперсных добавок на свойства автоклавного газобетона // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 20–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-20-23>
5. Леонтьев С.В., Шаманов В.А., Курзанов К.Д., Голубев В.А. Исследование влияния пластифицирующих добавок на процесс стабилизации ячеистой структуры теплоизоляционного газобетона автоклавного твердения // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 11-3. С. 474–479.
6. Бедарев А.А. Влияние пластифицирующих добавок на температурные и вязкопластичные свойства силикатной смеси для производства газосиликата // *Известия КГАСУ*. 2013. № 2 (24). С. 208–213.

References

1. Kuznetsova G.V., Shinkarev A.A., Morozova N.N., Gazimov A.Z. Additives for direct technology of silicate Brick Production. *Stroitel'nye Materialy*. [Construction Materials]. 2018. No. 9, pp.12–16. (In Russian).
2. Laukajtis A.A. Investigation of effect of ground waste cellular concrete additives on its properties. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 3, pp. 33–34. (In Russian).
3. Kuznetsova G.V., Morozova N.N., Potapova L.I., Klokov V.V. Complex additive for autoclave concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 36–39. (In Russian).
4. Kuznetsova G.V., Morozova N.N., Yusupov I.D. Investigation of effect of dispersal additives on the properties of autoclave concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 5, pp. 20–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-20-23>
5. Leont'ev S.V., Kurzanov K.D., Shamanov V.A., Golubev V.A. Investigation of effect of plastic additives on the process stabilizing the cell structure of the insulation concrete of autoclave solidation. *Fundamental'nye Issledovaniya*. 2015. No. 11–3, pp. 474–479. (In Russian).
6. Bedarev A.A. Influence of plastic supplements on the temperature and viscous-plastic properties of silicate mixture for the production of gas silicate. *Izvestiya KGASU*. 2013. No. 2(24), pp. 208–213. (In Russian).

УДК 666.972.7

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-9-14>

А.С. СИДОРОВА, инженер (аспирант) (siasukueva@gmail.com),
 С.Г. АНЦУПОВА, канд. техн. наук (anzupowasg@mail.ru), А.Л. ПОПОВ, инженер (surrukin@gmail.com)
 Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 50)

Физико-механические характеристики тяжелого бетона с использованием местного вторичного сырья

Рассмотрен вопрос о возможности использования в современном строительстве бетонного лома, образованного от сноса зданий и брака при производстве железобетонных изделий. Экспериментально подтверждена возможность использования дробленых бетонных отходов в качестве крупного заполнителя для улучшения физико-механических характеристик бетона. Показано, что замена природного щебня в составе бетона на вторичный позволяет повысить его прочность на 12%. Важную роль в составе играет адгезионная добавка Силор-Ультра Т, которая в процессе твердения нивелирует негативные последствия повышенного содержания пылевидных частиц в бетоне, поступивших с введением вторичного щебня, интенсифицируя гидратационные процессы на длительный период. Таким образом, проведенные исследования позволили сделать вывод о соответствии свойств вторичного крупного заполнителя, полученного из бетонного лома, требованиям нормативных документов, предъявляемым к заполнителю для тяжелого бетона. Разработаны составы бетона классов В25–В30 на основе вторичного щебня из бетонного лома, образованного при сносе объекта дома г. Якутска, с прочностями 36,34 и 39,42 МПа, что говорит о возможности использования вторичного щебня в строительстве и сокращения потребления дорогостоящих природных каменных материалов.

Ключевые слова: дробленый бетон, отход бетона, бетонный лом, тяжелый бетон, утилизация отходов.

Для цитирования: Сидорова А.С., Анцупова С.Г., Попов А.Л. Физико-механические характеристики тяжелого бетона с использованием местного вторичного сырья // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 9–14.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-9-14>

A.S. SIDOROVA, Engineer (Postgraduate student)(siasukueva@gmail.com); S.G. ANTSUPOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (anzupowasg@mail.ru); A.L. POPOV, Engineer (surrukin@gmail.com)
 North-Eastern Federal University (50, Kulakovskogo Street, Yakutsk, 677000, Russian Federation)

Physical and Mechanical Properties of Concrete Using Local Secondary Raw Materials

The article addresses the possibility of using in modern construction concrete rubble formed from demolition of buildings and marriage in the production of reinforced concrete products. The possibility of using crushed concrete waste as a large aggregate to improve the physical and mechanical properties of concrete has been experimentally confirmed. It has been shown that the replacement of natural gravel in the composition of concrete with secondary allows increasing its strength by 12%. An important role in the composition is played by the adhesive addition Silor Ultra T, which, in the process of solidification, equalizes the negative consequences of the increased content of dust particles in concrete received with the introduction of secondary gravel, intensifying hydration processes for a long period. Thus, studies have concluded that the properties of secondary gravel obtained from concrete rubble comply with the requirements of regulatory documents for aggregate for heavy concrete. Concrete composition of classes B25–B30 based on the secondary gravel from the concrete rubble formed at the demolition of the object of the house of Yakutsk with strength of 36,34 MPa and 39,42 MPa have been developed, which suggests the possibility of using secondary crushed stone in construction, thereby reducing the consumption of expensive natural stone materials.

Keywords: crushed concrete, concrete wastes, concrete rubble, heavy concrete, recycling of wastes.

For citation: Sidorova A.S., Antsupova S.G., Popov A.L. Physical and mechanical properties of concrete using local secondary raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 9–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-9-14>

Современное градостроительство характеризуется неизбежным возникновением отходов в виде бетонного лома, источником которого являются бетонные и железобетонные конструкции после разборки физически устаревших зданий, а также брак и технологические отходы на заводах сборного железобетона. Исходя из этого важной областью для развития ресурсосберегающего зеленого строительства с учетом иерархической структуры критериев качества строительных материалов [1, 2] является эффективное использование вышеназванных отходов. Так, бетонный лом может быть использован для возведения сооружений пониженной этажности, при строительстве временных дорог и в индивидуальных застройках [3–5], что позволит повысить экономическую эффективность строительства данных типов

построек за счет экономии на цементе, природном заполнителе и энергоносителях. Также это решит экологический вопрос утилизации образований промышленных отходов, неизбежно скопившихся в крупных агломерациях страны.

Применению техногенных отходов, в том числе бетонного лома, посвящено множество работ современных исследователей [6–18]. В данной работе проведены исследования возможности использования вторичного щебня из бетонного лома для получения тяжелых бетонов классов В15–В20.

В этой связи следующим этапом работы стало изучение влияния вторичного щебня из лома бетона на свойства широко распространенных бетонов классов В15–В20. Для этого проводили разработку составов бетона на основе следующих компонентов: кварц-

полевошпатовый песок Ленского бассейна со сложным полиминеральным составом, мас. %: кварц – 29,84; альбит – 17,48; микроклин – 4,71; иллит – 2,46; биотит – 1,06; роговая обманка – 2,59; гисмондин – 1,08; рентгеноаморфная фаза – 40,78; цемент ЦЕМ I 32,5Н производства АО «Якутцемент» (г. Якутск); известняковый щебень и отходы бетона класса В15 объекта дома г. Якутска, свойства которых показаны в табл. 1. Бетонный лом подвергался механическому дроблению на щековой дробилке «RetschВВ 51». Фракционный состав получаемого вторичного щебня соответствует требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» (табл. 2).

По результатам исследования необходимо отметить, что вторичный щебень по содержанию пластинчатой и игловатой формы превосходит природный известняковый и относится к первой группе. Марка по дробимости при сжатии в цилиндре составляет 600, что согласно нормативным документам означает, что щебень может быть рекомендован для приготовления бетонов рядовых марок от 100 до 300. Также с учетом того, что содержание пылевидных и глинистых частиц (размером менее 0,05 мм) в щебне в соответствии с ГОСТ 8267–93 не должно превышать 3% от массы заполнителя против 4,9% у вторичного щебня, было принято решение применить в тяжелых бетонах специальную адгезионную добавку Силор-Ультра Т для упрочнения бетонной поверхности в соответствии с ТУ 5772–001–90676544–2013.

Был произведен подбор состава тяжелого бетона класса В25–В30 с применением адгезионной добавки Силор-Ультра Т в соответствии с правилами подбора состава бетона ГОСТ 27006–2019 (табл. 3).

В табл. 4 показаны расчетные свойства проектных составов бетона и кинетика набора прочности экспериментальных образцов в естественных условиях.

Проверка возможности использования дробленого бетонного лома в качестве крупного заполнителя тяжелого бетона показала, что применение данного щебня практически не снижает основных показателей физико-механических свойств бетонов по сравнению с тяжелыми бетонами на щебне из природного материала.

Применение вторичного заполнителя уменьшает прочность полученных образцов в среднем на 15,6% в сравнении с контрольными. При использовании полимерной адгезионной добавки в количестве 2% прочность бетона в проектном возрасте повышается на 22,5% в сравнении с бездобавочным, а в количестве 5% – на 32,8% и составляет 39,1 МПа, что превышает прочность контрольных образцов на 12%. При этом набор прочности с применением полимерной добавки происходит быстрее. Добавка Силор-Ультра Т улучшает адгезию нового бетона к старому, повышая плотность и прочность экспериментальных образцов.

На основе кинетики набора прочности бетонов был проведен расчет их прогнозируемой прочности.

Расчет осуществлялся на основе экспериментальных данных по методике, разработанной Ш.М. Рахимбаевым [19]. Согласно данной методике предлагается расчет коэффициента торможения процессов гидратации на основании данных о кинетике набора прочности материала.

Расчет проводился на основании теории переноса [20], кинетика твердения бетона согласно которой может быть описана уравнениями:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_1 \cdot \sigma; \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_2 \cdot \tau, \quad (2)$$

где σ – предел прочности при сжатии, МПа; τ – время твердения (гидратации), сут; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

В качестве частного случая было выведено уравнение для определения прогнозной прочности бетона:

$$\sigma = \frac{\tau \cdot U_0}{1 + \tau \cdot U_0 \cdot K_{\text{top}}} . \quad (3)$$

На основе исходных данных (табл. 4) был проведен расчет кинетических констант: U_0 – начальная скорость; K_{top} – коэффициент торможения; $K_{\text{кор}}$ – коэффициент корреляции (табл. 5). Для проверки прогнозируемой прочности на 28-е сут твердения были подставлены кинетические константы в уравнение (3). Показана высокая сходимость расчетных прочностей с экспериментальными (табл. 6).

Согласно полученным данным, замена природного щебня на вторичный (состав 2) снижает начальную скорость твердения в 1,1 раза и увеличивает коэффициент торможения в 1,2 раза, что приводит к снижению прочности на 28-е сут на 25% (с 39,4 до 29,4 МПа) по сравнению с контрольным (состав 1). Это связано с повышенным содержанием пылевидных частиц во вторичном щебне. Однако добавление адгезионной добавки Силор-Ультра Т в количестве 2% (состав 3) от массы вяжущего нивелирует негативные последствия пылевидных частиц, увели-

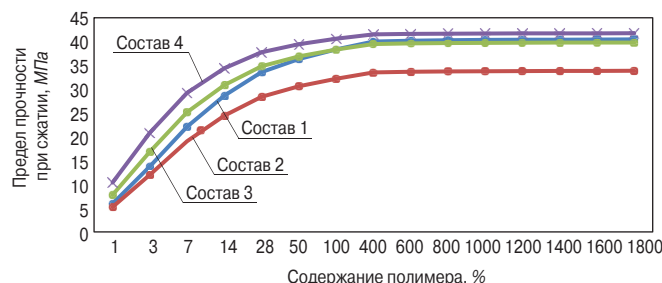


Рис. 1. Расчетная кинетика набора прочности бетона в зависимости от состава
Fig. 1. Calculated strength development of concrete depending on the composition

Таблица 1
Table 1Физико-механические свойства крупного заполнителя
Physico-mechanical properties of coarse aggregate

Свойство заполнителя	Щебень	
	Вторичный	Известняковый
Насыпная плотность, кг/м ³	1160	1400
Истинная плотность, кг/м ³	2530	2550
Водопоглощение, %	6,8	1,2
Влажность, %	2,1	0,5
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	4,9	0,5
Содержание зерен лещадной формы, %	5,1	19,9
Марка по дробимости щебня при сжатии в цилиндре	600	1000
Морозостойкость, циклы	25	150

Таблица 2
Table 2Фракционный состав вторичного щебня
Sieve analysis of secondary gravel

Диаметр отверстий контрольных сит, мм	d	0,5 (d+D)	D	1,25D
Полные остатки на ситах, мас. %	96,85	53,075	9,3	1,2

Таблица 3
Table 3Расчетные составы тяжелого бетона
Designed compositions of heavy concrete

Состав	Расход щебня, г	Расход цемента, г	Расход песка, г	Расход воды, л	Содержание добавки, %
Тяжелый бетон на известняковом щебне (контрольный)					
1	2540	860	960	420	–
Тяжелый бетон на вторичном щебне					
2	2600	820	1080	480	–
3				500	2
4				470	5

Таблица 4
Table 4Свойства рассчитанного бетона в проектном возрасте
The properties of the designed concrete in the design age

Состав	Класс бетона, МПа	Марка по удобоукладываемости	Средняя плотность, кг/м ³	Средняя прочность при сжатии, МПа		
				7 сут	14 сут	28 сут
Тяжелый бетон на известняковом щебне (контрольный)						
1	B25	П1	2430	22,68	30,41	34,9
Тяжелый бетон на вторичном щебне						
2	B25	П1	2320	19,14	26,5	29,44
3	B25	П1	2344	25,23	33,44	36,05
4	B25	П1	2419	29,33	37,15	39,11

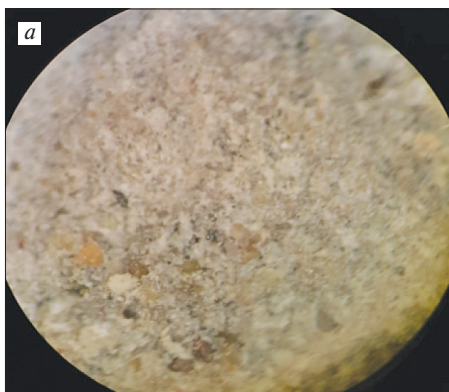
Рис. 2. Структура бетона на вторичном щебне без добавки: 6,5-кратное (а) 50-кратное (б) увеличение
Fig. 2. Concrete structure on secondary gravel without additives: 6.5× (a) 50× (b) magnificationРис. 3. Структура бетона на вторичном щебне с применением добавки Силор-Ультра Т в количестве 5%: 6,5-кратное (а) 50-кратное (б) увеличение
Fig. 3. Concrete structure on the secondary gravel using Silor-Ultra T addition: 6.5× (a) 50× (b) magnification

Таблица 5
Table 5

Результаты расчета по уравнениям теории переноса
The results of the calculation according to the equations of transport theory

Состав	Значения кинетических констант при расчете		
	U_0	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
Тяжелый бетон на известняковом щебне (контрольный)			
1	7,26	0,0236	0,9996
Тяжелый бетон на вторичном щебне			
2	6,48	0,0282	0,9981
3	10,16	0,024	0,9985
4	14,47	0,0229	0,9988

Таблица 6
Table 6

Расчетные прочности бетона в возрасте 28 сут
The designed strength of concrete at the age of 28 days

Состав	$\sigma_{\text{расчетн}}$, МПа	$\sigma_{\text{эксперим}}$, МПа	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
1	35,06	34,9	0,16	0,47
2	29,66	29,44	0,22	0,76
3	36,34	36,05	0,29	0,81
4	39,42	39,11	0,31	0,79

чивая начальную скорость твердения бетона в 1,4 раза, а добавление добавки в количестве 5% (состав 4), кроме того что увеличивает начальную скорость твердения в два раза, также снижает коэффициент торможения в 1,03 раза, что и приводит к увеличению проектной прочности бетона на вторичном щебне до 39,11 МПа. Таким образом, применение вторичного щебня и добавки не только интенсифицирует гидратацию на начальном этапе, но и увеличивает длительность гидратации.

Согласно методике и рассчитанным коэффициентам по уравнению теории переноса, можно спрогнозировать прочностные характеристики на длительный срок (рис. 1). Расчет прочности на длительный срок производился по формуле (3).

Анализ расчетной кинетики набора прочности бетона свидетельствует о схожести характера процессов твердения независимо от состава бетона. Наиболее интенсивный рост прочности приходится на первые 7 сут. Окончательно затухание процессов гидратации происходит с достижением 400 сут. Показано, что разница прочности между контрольным бетоном и бетоном на вторичном щебне с адгезионной добавкой в количестве 5%, которая в момент 28 сут составляла 13%, снижается до 4%.

При помощи стереомикроскопа Lintab-6 (рис. 2, 3) были сделаны микрофотографии структуры разработанного бетона на вторичном щебне в 6,5 (а) и 50-кратном (б) увеличении без добавки и с добавкой Силор-Ультра Т в количестве 5%. На полученных снимках видно, что структура матрицы бето-

на с применением добавки обладает более плотной и однородной поверхностью, когда как без добавки матрица бетона характеризуется пористой структурой и оголенной поверхностью зерен мелкого и крупного заполнителей. Таким образом, микрофотографии подтверждают данные о положительном действии адгезионной добавки на гидратацию цемента в бетоне.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать вывод о соответствии свойств вторичного крупного заполнителя, полученного из бетонного лома, требованиям ГОСТа, предъявляемым к заполнителю для тяжелого бетона. Разработаны составы бетона классов В25–В30 на основе вторичного щебня из отхода бетона класса В15 объекта дома г. Якутска и добавкой Силор-Ультра Т с прочностями 36,34 и 39,42 МПа. Использование отхода позволит сократить потребление дорогостоящих природных каменных материалов. Интеграция достижений химической промышленности и активное использование промышленных отходов обладают хорошим потенциалом в области рационального использования природных ресурсов. В работе установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно количества дробленого бетонного лома и адгезионной добавки, на физико-механические характеристики бетона, а также проведен расчет прочности бетона на длительный период.

Список литературы

1. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм // *Строительные материалы*. 2018. № 1–2. С. 60–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-60-62>
2. Смирнов В.А., Королев Е.В. Иерархическое моделирование строительных материалов как дисперсных систем: специализированная программная реализация // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
3. Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А., Сайдумов М.С., Омаров А.О. Разработка составов наполненных вяжущих на основе вторичного сырья для монолитных высокопрочных бетонов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2019. Т. 46. № 3. С. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138>
4. Муртазаев С.А.-Ю., Омаров А.О., Саламанова М.Ш. Высокопрочные бетоны на основе использования вторичных техногенных ресурсов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. Т. 45. № 1. С. 204–213. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-204-213>
5. Сайдумов М.С., Муртазаев С.А.-Ю., Аласханов А.Х., Дагин И.С., Нахаев М.Р. Техногенные отходы как сырьевая база для получения современных строительных композитов // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 7. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-31-35>
6. Белов В.В., Абрамов Д.Г. Оценка влияния отходов производства минераловатных изделий на механические свойства бетона // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2019. № 5–6 (244–245). С. 33–36.
7. Vdovin A.A., Yakovlev G.I., Zorin A.N., Pervushin G.N. Complex industrial wastes based admixture for improved properties of fine-grained concrete // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 276, pp. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.276.103>
8. Гончарова М.А., Борков П.В., Аль-Суррайви Хамид Галиб Хусайн. Рециклинг крупнотоннажных бетонных и железобетонных отходов при реализации контрактов полного жизненного цикла // *Строительные материалы*. 2019. № 12. С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-51-57>
9. Зырянова В.Н., Бердов Г.И., Верещагин В.И., Лыткина Е.В., Очур-оол А.П. Серпентинитовые магнезиальные вяжущие вещества на основе техногенного сырья // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 9 (729). С. 43–51. DOI: [10.32683/0536-1052-2019-729-9-43-51](https://doi.org/10.32683/0536-1052-2019-729-9-43-51)

References

1. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Evolution of representations about composite materials from the positions of changing the paradigm. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 1–2, pp. 60–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-60-62>
2. Smirnov V.A., Korolev E.V. Building materials as disperse systems: multiscale modeling with dedicated software. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 43–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-43-53>
3. Alaskhanov A.K., Murtazaeva T.S., Saidumov M.S., Omarov A.O. Development of compositions of filled insulators based on secondary raw for monolithic high-strength concrete. *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskije nauki*. 2019. Vol. 46. No. 3, pp. 129–138. (In Russian).
4. Murtazaev S.A.-Y., Omarov A.O., Salamanova M.S. High-strength concrete based on the use of secondary technogenic resources. *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskije Nauki*. 2018. Vol. 45. No. 1, pp. 204–213. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-204-213>
5. Saidumov M.S., Murtazaev S.A.-Y., Alaskhanov A.Kh., Dagin I.S., Nakhaev M.R. Man-made waste as a raw material base for the production of modern construction composites. *Ekologija i Promyshlennost' Rossii*. 2019. Vol. 23. No. 7, pp. 31–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-31-35>
6. Belov V.V., Abramov D.G. Assessment of the influence of mineral wool production waste on the mechanical properties of concrete. *Stroitel'nye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI veka*. 2019. No. 5–6 (244–245), pp. 33–36. (In Russian).
7. Vdovin A.A., Yakovlev G.I., Zorin A.N., Pervushin G.N. Complex industrial wastes based admixture for improved properties of fine-grained concrete. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 276, pp. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.276.103>
8. Goncharova M.A., Borkov P.V., Al-Surraivi Hamid Galib Hussain. Recycling of large-capacity concrete and reinforced concrete waste in the context of realization of full life cycle contracts. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 12, pp. 51–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57>
9. Zyryanova V.N., Berdov G.I., Vereshchagin V.I., Lytkina E.V., Ochur-ool A.P. Serpentine magnesia binding substances on the basis of technogenic raw materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019. No. 9 (729), pp. 43–51. (In Russian). DOI: [10.32683/0536-1052-2019-729-9-43-51](https://doi.org/10.32683/0536-1052-2019-729-9-43-51)



10. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Yu.V., Klyuev A.V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 598–602. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.598
11. Красиникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65>
12. Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A. Utilization of industrial waste water treatment residues in alkali activated cement and concretes // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 761 KEM, pp. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.35
13. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Карпушенкова Л.С., Карпушенков С.А. Пористый керамический материал на основе глины и отходов производства гранитного щебня // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50>
14. Магсумов А.Н., Шарипьянов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки*. № 6. 2018. С. 29–32.
15. Makeev A.I., Chernyshov E.M. Отсевы дробления гранита как компонентный фактор формирования структуры бетона. Часть 1. Постановка проблемы. Идентификация отсевов // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-56-60>
16. Строкова В.В., Жерновский И.В. Развитие концепций выбора сырья для производства строительных композитов // *Научное обозрение*. 2017. № 12. С. 12–15.
17. Fomina E.V., Lesovik V.S., Fomin A.E., Kozhukhova N.I., Lebedev M.S. Quality evaluation of carbonaceous industrial by-products and its effect on properties of autoclave aerated concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. 042033. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042033
18. Фролова М.А., Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Алюмосиликатное вяжущее на основе сапонитсодержащих отходов алмазодобывающей промышленности // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 68–70. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-68-70>
19. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытаний // *Строительные материалы*. 1994. № 4. С. 17.
20. Рахимбаев Ш.М. Кинетика переноса в гетерогенных процессах технологии строительных материалов // *Физико-химия строительных и композиционных материалов: Сб. тр. Белгород*, 1989. 160 с.
10. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Yu.V., Klyuev A.V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931, pp. 598–602. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.598
11. Krasinikova N.M., Kirillova E.V., Khozin V.G. Reuse of concrete waste as input products for cement concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 1–2, pp. 56–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65>
12. Krivenko P., Kovalchuk O., Pasko A. Utilization of industrial waste water treatment residues in alkali activated cement and concretes. *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 761 KEM, pp. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.35
13. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Karpushenkova L.S., Karpushenkov S.A. Porous ceramic material based on clay and waste of production of granite rubble. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-45-50>
14. Magsumov A.N., Sharipyanov N.M. Use of concrete scrap as coarse aggregate for concrete mix production. *Simvol Nauki*. 2018. No. 6, pp. 29–33. (In Russian).
15. Makeev A.I., Chernyshov E.M. Granite crushing screenings as a component factor of concrete structure formation. Part 1. Problem definition. Identification of screenings as a component factor of structure formation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 56–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-56-60>
16. Strokova V.V., Zhernovskii I.V. Development of the concepts of raw materials selection for the production of building composite materials. *Nauchnoe Obozrenie*. 2017. No. 12, pp. 12–15. (In Russian).
17. Fomina E.V., Lesovik V.S., Fomin A.E., Kozhukhova N.I., Lebedev M.S. Quality evaluation of carbonaceous industrial by-products and its effect on properties of autoclave aerated concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. 042033. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042033
18. Frolova M.A., Morozova M.V., Aizenshtadt A.M., Tutygin A.S. An aluminum-silicate binder on the basis of saponite-containing waste of diamond industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 68–70. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-68-70>
19. Rakhimbaev S.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials for a single test period. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1994. No. 4, p. 17. (In Russian).
20. Rakhimbaev S.M. Kinetics of transfer in heterogeneous processes of building materials technology. *Physical chemistry of building and composite materials. Collection of works*. Belgorod, 1989. 160 p. (In Russian).

Е.Н. ПОТАПОВА¹, д-р техн. наук (55pen@mail.ru); Т.В. ГУСЕВА², д-р техн. наук (tatiana.v.guseva@gmail.com); И.О. ТИХОНОВА¹, канд. техн. наук (iriti-may@yandex.ru); А.С. КАНИШЕВ³, главный специалист по охране окружающей среды (a.kanishev@akkermann.ru); Р.Г. КЕМП⁴, исполнительный директор (robert.kemp1@ntlworld.com)

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., 9)

² Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (141006, г. Мытищи, Олимпийский пр., 42)

³ ООО «Южно-уральская Горно-перерабатывающая компания» (462360, г. Новотроицк, ул. Запад (5.4 км ТЕР.), 5)

⁴ Honeygate Consultants (UPM) Limited (UK, RM14 3LD, Upminster, Canterbury Avenue, 6)

Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду

Проведен анализ подходов к экологическому регулированию производства цемента. Подчеркнуто, что в России и ведущих странах мира это производство регулируется законодательством о наилучших доступных технологиях, а также в ряде стран – углеродным законодательством. На примере результатов ситуационного исследования показано, что использование вторичных ресурсов (шлаков) в технологическом процессе способствует как формированию связей между промышленными объектами по принципу экономики замкнутого цикла, так и повышению ресурсной эффективности производства, а также сокращению негативного воздействия на окружающую среду. Эти решения соответствуют требованиям наилучших доступных технологий. Замена части природных сырьевых материалов вторичными ресурсами позволяет снизить энергоёмкость в 1,5 раза, а потребление известняка сократить вдвое. Именно такой цемент следует рассматривать как экологически более целесообразный, «зеленый», а производство – ответственное, способствующее поддержанию устойчивого взаимодействия предприятий в промышленно-экологической системе. Спрос на продукцию, произведенную из вторичных ресурсов, нуждается в стимулировании, которое может быть организовано путем развития политики «зеленых» государственных закупок, например для целей инфраструктурных проектов.

Ключевые слова: производство цемента, наилучшие доступные технологии, экономика замкнутого цикла, повышение ресурсной эффективности, замена сырьевых материалов, сокращение негативного воздействия, окружающая среда, экологичность.

Для цитирования: Потапова Е.Н., Гусева Т.В., Тихонова И.О., Канишев А.С., Кемп Р.Г. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20>

E.N. POTAPOVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (55pen@mail.ru); T.V. GUSEVA², Doctor of Sciences (Engineering) (tatiana.v.guseva@gmail.com); I.O. TIKHONOVA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (iriti-may@yandex.ru); A.S. KANISHEV³, Chief Environmental Protection Officer (a.kanishev@akkermann.ru); R.G. KEMP⁴, Managing Director (robert.kemp1@ntlworld.com)

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russian Federation)

² Research Institute "Environmental Industrial Policy Centre" (42, Olimpiyskiy Avenue, Mytishchi, 141006 Russian Federation)

³ South Ural Mining and Processing Company LLC (5, Zapad street (5 TER.), Novotroitsk, 462360, Russian Federation)

⁴ Honeygate Consultants (UPM) Limited (6, Canterbury Avenue, Upminster, RM14 3LD, UK)

Cement Production: Aspects of the Resource Efficiency Enhancement and Negative Environmental Impact Reduction

Environmental regulation of cement production sector is analyzed. It is emphasized that both in Russia and in the leading world economies, this sector is regulated by laws based on the Best Available Techniques, and in some countries – by the carbon legislation. Based on the results of a case study, it is demonstrated that the use of secondary resources (slag) in the technological process provides for forming circular economy links between the industrial installations, as well as for the resource efficiency enhancement and negative environmental impact reduction. Such solutions comply with the requirements of Best Available Techniques. Partial replacement of raw materials with secondary resources allows for energy consumption reduction by 1.5 while simultaneously halving lime consumption. Such cement should be considered as environmentally friendly, "green", while the production process itself should be regarded as responsible, proving for the sustainable links between industrial enterprises in the industrial environmental system. The demand for the products manufactured from secondary resources need to be stimulated, for example by means of "green" public procurement for the purposes of the infrastructure projects.

Keywords: cement production, best available techniques, circular economy, resource efficiency enhancement, raw materials replacement, negative environmental impact reduction, environmental friendliness.

For citation: Potapova E.N., Guseva T.V., Tikhonova I.O., Kanishev A.S., Kemp R.G. Cement production: aspects of the resource efficiency enhancement and negative environmental impact reduction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 15–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20>

Цементная отрасль наряду с металлургией, электроэнергетикой, производством химических веществ и машиностроением определяет экономический потенциал и уровень промышленного развития страны. Динамично развивающийся строительно-инвестиционный комплекс России, основу которого составляет

цементная промышленность, дает возможности расширения объемов производства, ассортимента выпускаемой продукции [1]. Но производство цемента является чрезвычайно материалоемким и энергоемким процессом, сопровождающимся значительными выбросами в атмосферу загрязняющих веществ и парни-

ковых газов (ПГ). При использовании природных карбонатных и глинистых компонентов для получения 1 т цемента требуется более 1,5 т сырьевых материалов.

В Европейском союзе, Российской Федерации, а также в ряде других стран производство цемента регулируется законодательством о наилучших доступных технологиях (НДТ) [2–4]. Обязательные требования предъявляются прежде всего к ограничению выбросов неорганической пыли, оксидов азота и серы; показатели энергоэффективности производства являются рекомендательными. В целом НДТ представляют собой совокупность технологических, технических и управленческих решений, позволяющих добиться высокого уровня ресурсоэффективности и защиты окружающей среды (ОС). Законодательство об НДТ охватывает десятки отраслей промышленности, и на страницах журнала уже обсуждались особенности перехода к новой системе регулирования предприятий, производящих керамический кирпич и плитку [5].

Производство цемента как одно из самых энергоемких во многих странах регулируется также законодательством о выбросах ПГ, что стимулирует развитие более энергоэффективных технологий и решений, позволяющих ограничить углеродный след (антропогенную эмиссию диоксида углерода) [6, 7]. Снижение углеродного следа становится международно принятой стратегией развития производства цемента и бетона¹. В нашей стране законодательство, регулирующее выбросы ПГ, разрабатывается с 2018 г., принятия его можно ожидать в самое ближайшее время [8]. Проект «Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» обнародован Министерством экономического развития в марте 2020 г.²

Обратимся к процессу производства цемента. Он включает две стадии: первая – получение клинкера, вторая – доведение клинкера до порошкообразного состояния с введением в него гипса или других добавок.

При производстве цементного клинкера в качестве основного сырьевого компонента используются природные известняк, мел, мергель и другие карбонатсодержащие материалы, включающие также отходы ряда отраслей промышленности. Глинистыми компонентами служат природные глины, вскрышные глинистые материалы, глинистые сланцы, шлаки, золошлаковые отходы и т. п. (в общей сложности более 40 наименований). Для корректировки сырьевой смеси применяется ряд техногенных железосодержащих материалов – колчеданные огарки, пыль и шламы газоочистных сооружений черной металлургии, конвертерные шлаки, шламбрикеты и другие железосодержащие материалы. Кроме того, в качестве активных минеральных добавок используют также техногенные отходы черной и цветной метал-

лургии, золошлаковые отходы теплоэлектростанций, сульфатсодержащие горелые пески и формовочные смеси (около 20 наименований) [1, 2].

Обжиг сырьевой смеси – наиболее энергоемкая и ответственная операция, в результате которой образуется клинкер [1, 2]. Обжиг проводят при температуре 1400–1500°C во вращающихся печах. Образование клинкера сопровождается рядом сложных физических и химических процессов, в результате которых появляются новые минералы.

По выходе из вращающейся печи клинкер, состоящий из прочных камневидных окатанных гранул, интенсивно охлаждают воздухом с 1000 до 100–200°C в холодильниках. Помол клинкера с добавкой гипса – заключительная технологическая операция производства цемента (второй этап).

По экономическим соображениям для повышения энергоэффективности на предприятиях следует осуществлять так называемые первичные, технологические решения, интегрированные в процесс производства, к которым относят следующие [1, 2]:

- оптимизация процессов обжига и охлаждения портландцементного клинкера;
- повышение однородности состава сырья;
- повышение точности дозировки топлива;
- регулирование газодинамического режима работы печи и холодильника;
- использование компьютерных систем управления агрегатами.

Дополнительные возможности связаны с принципами экономики замкнутого цикла, с использованием в производстве вторичных ресурсов сырья и энергии, в том числе:

- применение вторичных ресурсов в качестве сырьевых компонентов [2, 9];
- использование альтернативного топлива [7, 9];
- утилизация тепла отходящих газов для выработки электрической энергии [2, 10];
- снижение доли клинкера в цементе [2, 11];
- разработка новых перспективных видов цементов [12–14].

Вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот – одно из направлений экологической промышленной политики Российской Федерации, которое открывает возможности для одновременного решения задач повышения ресурсоэффективности и сокращения негативного воздействия на ОС, стоящих перед промышленными предприятиями и регионами [15]. Задачи эти целесообразно решать, следуя принципам промышленного симбиоза, согласно которым различные объекты должны быть связаны потоками вещества и энергии; чем значительнее и устойчивее связи, тем выше эффективность метаболизма промышленно-экологической системы [16]. В рамках

¹CO₂ reduction strategies for cement and concrete <https://www.globalcement.com/images/stories/documents/futurecem/CEMENT2050-Presentation-web.pdf>.

²Проект Распоряжения Правительства Российской Федерации «Стратегия долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» https://economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf.

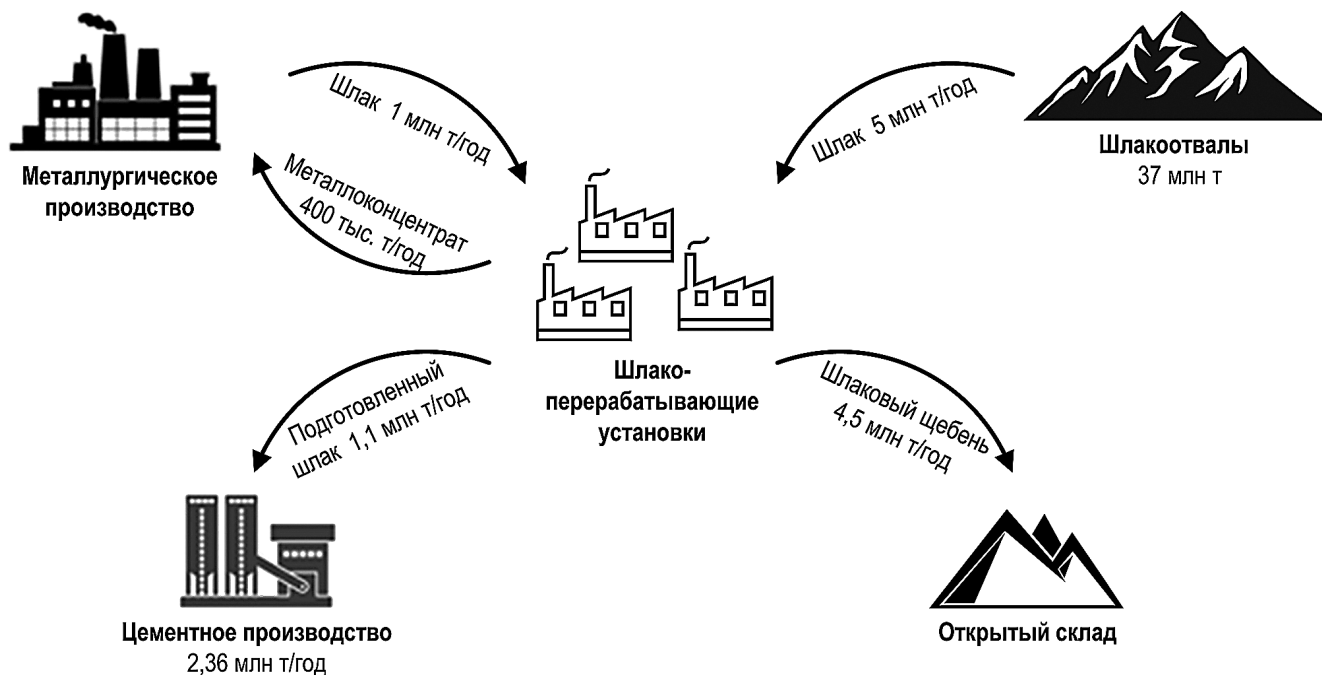


Рис. 1. Взаимодействие цементного и металлургического производств в промышленно-экологической системе г. Новотроицка
Fig. 1. The interaction between cement and ferrous metal production facilities in industrial ecosystem of Novotroitsk

экологической промышленной политики разрабатываются инструменты так называемого «зеленого» финансирования; ожидается, что в число критериев конкурсного отбора проектов будут включены показатели ресурсной эффективности. В 2020 г. выпущен Добровольный национальный обзор достижения Российской Федерацией Целей устойчивого развития (ЦУР) ООН и реализации Повестки в области устойчивого развития на период до 2030 г.; вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот описано как инструмент достижения ЦУР 12 «Ответственное производство и потребление» [17].

Рассмотрим пример организации ответственного производства в промышленно-экологической системе г. Новотроицка, где ключевую роль играет взаимодействие металлургического и цементного предприятий.

Орско-Халиловский металлургический комбинат, один из лидеров черной металлургии России, с 1955 г. производит в г. Новотроицке чугуны, непрерывнолитые заготовки различного сечения (<https://files.stroyinf.ru/Data/698/69843.pdf>) и листовой прокат. В 1992 г. преемником комбината стало АО «Уральская сталь», предприятие полного цикла, включающее аглококсодоменное, сталеплавильное и прокатное производства. На протяжении 50 лет шлаки металлургического производства направлялись на шлакоотвалы, хотя первые проекты по переработке шлака уральские металлурги начали реализовывать в 80-х гг. XX в. [16, 18].

В 2002 г. на базе шлакоотвалов и известняковых карьеров создано ООО «Южно-уральская Горно-перерабатывающая компания» (ЮУГПК). Задачей предприятия стала масштабная переработка шлаков и возвращение металлоконцентрата в металлургическое производство.

В настоящее время в качестве сырья ЮУГПК использует флюсовый известняк Аккермановского ме-

сторождения, отходы горного производства (отходы известняка), глину (рыхлую вскрышу добычи известняка), шлаки металлургического производства, поступающие от АО «Уральская сталь», а также накопленные в отвалах старолегальные шлаки. Содержание шлаков в составе сырьевой муки, идущей на обжиг для получения портландцементного клинкера, составляет примерно 20% (<http://www.yugpk.ru/production>).

Ассортимент выпускаемой ЮУГПК продукции включает как бездобавочные цементы, так и портландцемент со шлаком, композиционный портландцемент и шлакопортландцемент; содержание гранулированного доменного шлака в продукции варьирует от 3 до 45% (<http://www.yugpk.ru/production>).

Использование отходов, с одной стороны, приводит к существенному сокращению потребления топлива на обжиг портландцементного клинкера, поскольку шлаки, составляющие значительную долю в сырьевой муке, уже прошли термическую обработку, а с другой – к заметному снижению нагрузки на ОС, в том числе за счет сокращения негативного воздействия шлакоотвалов и снижения выбросов парниковых газов.

В настоящее время шлакоперерабатывающие установки ЮУГПК перерабатывают суммарно 6 млн т шлаков – все шлаки, поступающие от АО «Уральская сталь», и 5 млн т шлаков, накопленных в прошлые годы. В цементном производстве используется до 1,1 млн т переработанного шлака; 0,4 млн т металлоконцентрата возвращается в металлургическое производство; 4,5 млн т шлакового щебня направляется на открытый склад, откуда отгружается потребителям (рис. 1).

По своим свойствам шлаковый щебень близок к щебням из природных горных пород, он дешевле других крупных заполнителей, а бетон на шлаковом щебне при динамических нагрузках отличается вы-

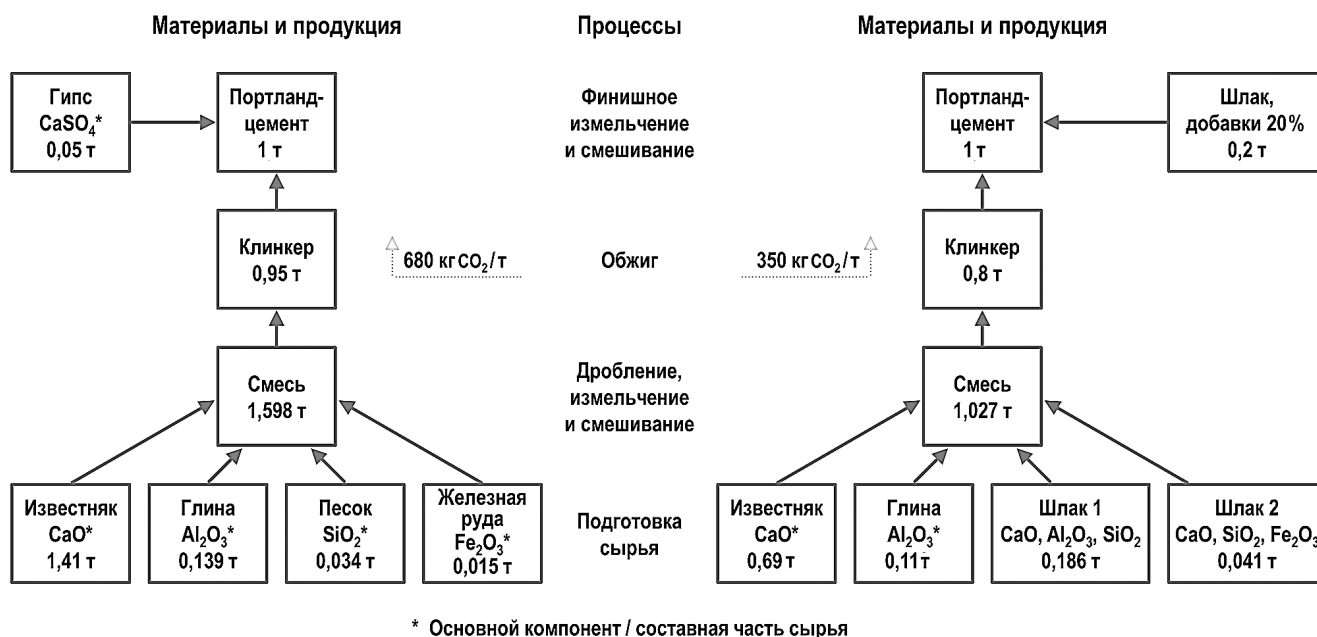


Рис. 2. Сравнительный анализ удельного потребления сырья и энергии при производстве бездобавочного цемента (слева) и производстве добавочного цемента в ЮУГПК (справа)

Fig. 2. Comparative analysis of specific consumption of raw materials and energy during straight cement production (left) and slag cement production at YuUGPK (right)

сокой прочностью. Шлаковый щебень мог бы найти применение в дорожном строительстве (в том числе в зимний период), при проведении ландшафтных работ, но для налаживания этого потока необходима стратегия, подобная европейской «Инициативе в области сырьевых материалов», а также система «зеленых» государственных закупок.

Известно, что выбросы диоксида углерода при получении 1 т бездобавочного портландцемента при использовании традиционных сырьевых материалов могут достигать от 600–800 кг CO_2 -экв./т клинкера. При этом 2/3 выбросов CO_2 образуются при нагреве исходного сырья (декарбонизация известняка), а остальные связаны со сжиганием топлива (энергетические выбросы). Энергетические выбросы CO_2 при использовании в качестве топлива природного газа составляют до 150 кг CO_2 -экв./т клинкера [6].

Сравнительный анализ удельного потребления сырья и энергии при производстве бездобавочного цемента и производстве цемента в ЮУГПК приведен на рис. 2.

Производство цемента ЮУГПК — одно из самых ресурсо- и энергоэффективных в России: предприятие выпускает до 2,36 млн т цемента ежегодно; по сравнению с типовым производством потребление известняка сокращено вдвое, а энергоемкость почти в 1,5 раза ниже, чем на заводах, не использующих вторичные ресурсы в качестве добавок к сырью [1, 19].

Если ресурсную (в том числе энергетическую) эффективность рассматривать на региональном уровне, то можно видеть, что предприятие организовано таким образом, что побочные продукты одного предприятия стали исходным сырьем для другого в соответствии с основным принципом промышленной экологии — принципом оптимизации ресурсной и энергетической

эффективности и определения четкого, экономически обоснованного места каждого (в том числе побочного) продукта, образующегося в производственном процессе, в эколого-экономической системе [16].

Выводы

В результате проведения ситуационного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Производство цемента в Российской Федерации регулируется законодательством о наилучших доступных технологиях, в рамках которого ограничению подлежат выбросы традиционных загрязняющих веществ — неорганической пыли, оксидов азота и серы. Принципы НДТ распространяются также на обеспечение высокой ресурсной (в том числе энергетической) эффективности производства, однако обязательные технологические показатели как в Европейском союзе, так и в России установлены только к эмиссиям загрязняющих веществ [1, 4].

2. В Российской Федерации получают развитие принципы экономики замкнутого цикла; эксперты закончили и опубликовали Добровольный обзор достижения целей устойчивого развития, в том числе в части стимулирования ответственного производства и потребления, вовлечения вторичных ресурсов в экономический оборот. В рамках реализации экологической промышленной политики признана целесообразность учета технологических показателей, характеризующих ресурсную эффективность производства, при принятии решений о поддержке промышленных предприятий с помощью механизмов «зеленого» финансирования.

3. В международной практике «зелеными» считаются предприятия, добивающиеся снижения выбросов парниковых газов. Сокращение углеродного

следа — неотъемлемый элемент стратегии развития цементного производства. Это обстоятельство следует учитывать в контексте конкуренции на международном рынке; ожидается, что в ближайшее время возрастет внимание к обеспечению высокой энергоэффективности и сокращению выбросов ПГ и в России.

4. Замена части природных сырьевых материалов в производстве цемента вторичными ресурсами позволяет снизить энергоемкость в 1,5 раза, а потребление известняка сократить практически вдвое. С точки зрения экономики замкнутого цикла именно такой цемент следует рассматривать как «зеленый», экологически более целесообразный, а производство — ответственное, способствующее поддержанию устой-

чивого взаимодействия предприятий в промышленно-экологической системе.

5. Спрос на продукцию, произведенную из вторичных ресурсов, нуждается в стимулировании. Международный опыт свидетельствует о том, что такое стимулирование можно организовать путем развития политики государственных закупок, например для целей инфраструктурных проектов.

В ситуационном исследовании авторы не касались перспектив применения альтернативного топлива для повышения энергоэффективности производства цемента, в том числе RDF-топлива (Refuse Derived Fuel), образующегося после сортировки отходов. Это сложный вопрос, который требует научного обсуждения и взвешенного решения.

Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 6-2015 «Производство цемента». М.: Стандартинформ, 2015. 293 с. <http://docs.cntd.ru/document/1200128666> (дата обращения 22.06.2020).
2. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Seville: Publications Office of the European Union. 2013. 475 p. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-production-cement-lime-and-magnesium-oxide> DOI: 10.2788/12850 (дата обращения 22.06.2020).
3. Valderrama C., Granados R., Cortina J.L., Gasol C.M., Guillem M., Josa A. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 25. No. 4, pp. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.055>
4. Гусева Т.В., Потапова Е.Н., Тихонова И.О. Переход к нормированию по принципам наилучших доступных технологий: перспективы и вызовы для предприятий по производству цемента // *Цемент и его применение*. 2018. № 6. С. 34–38.
5. Гусева Т.В., Захаров А.И., Молчанова Я.П., Вартанян М.А., Акберов А.А. Наилучшие доступные технологии производства керамических строительных материалов как инструмент экологического нормирования отрасли. К выходу отраслевого информационно-технического справочника «Производство керамических изделий» ИТС 4 // *Строительные материалы*. 2016. № 4. С. 4–9.
6. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production // *Earth System Science Data*. 2018. No. 10, pp. 195–217. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
7. Tikhonova I., Guseva T., Potapova E. Cement production in Russia: best available techniques and opportunities for using alternative fuels. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019*.

References

1. Information technical reference book on the best available techniques ITS 6-2015 “Cement production”. Moscow: Standartinform. 2015. 293 p. <http://docs.cntd.ru/document/1200128666> (Date of access 22.06.2020). (In Russian).
2. Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide. Seville: publications office of the European union. 2013. 475 p. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-production-cement-lime-and-magnesium-oxide> DOI: 10.2788/12850 (Date of access 22.06.2020).
3. Valderrama C., Granados R., Cortina J. L., Gasol C. M., Guillem M., Josa A. Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 25. No. 4, pp. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.055>
4. Guseva T.V., Potapova E.N., Tikhonova I.O. Transfer to BAT-related regulation: perspective and challenges for cement producers. *Tsement i ego primenenie*. 2018. No. 6, pp. 34–38. (In Russian).
5. Guseva T.V., Zakharov A.I., Molchanova Ya.P., Vartanian M.A., Akberov A.A. The best accessible technologies of ceramic building materials production as an instrument of ecological regulation of the industry. To the publication of the industry information-technical reference guide «Manufacture of Ceramic Products» ITS 4. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 4, pp. 4–9. (In Russian).
6. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*. 2018. No. 10, pp. 195–217. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
7. Tikhonova I., Guseva T., Potapova E. Cement production in Russia: best available techniques and opportunities for using alternative fuels. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019*. Vol. 19. Iss. 5.1, pp. 71–80. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.009.



- Vol. 19. Iss. 5.1, pp. 71–80. DOI: 10.5593/sgem2019/5.1/S20.009.
8. Guseva T., Vartanyan M., Tikhonova I., Shchelchikov K. Setting energy efficiency enhancement objectives for Russian energy intensive industries // *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, No. 4, pp. 619–628.
 9. Baidy R., Ghosh S.K., V. Parlikar U. Co-processing of industrial waste in cement kiln – a robust system for material and energy recovery // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31, pp. 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.041>
 10. Irungu S.N., Muchiri P., Byiringiro J.B. The generation of power from a cement kiln waste gas: a case study of a plant in Kenya // *Energy Science and Engineering*. 2017. Vol. 5(2), pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.153>
 11. Scrivenera K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114, pp. 2–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
 12. Provis J. L., Juenger M., Komljenovic M. (Eds). *Innovation in Cements for Sustainability*. 2020. Lausanne: Frontiers Media SA. 119 p. doi: 10.3389/978-2-88963-346-3
 13. Потапова Е.Н., Волосатова М.А. Производство цемента: Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / Под ред. Д.О. Скобелева. М.; СПб.: Реноме, 2019. С. 455–514.
 14. Сивков С.П. Перспективные виды цементов: что придет на смену портландцементу // *Международное аналитическое обозрение Алитинформ: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2017. Т. 48. № 4–5. С. 40–48.
 15. Скобелев Д.О. Экологическая промышленная политика: основные направления и принципы становления в России // *Вестник Московского университета. Серия 6: экономика*. 2019. № 4. С. 78–94.
 16. Скобелев Д.О. Ресурсная эффективность экономики: аспекты стратегического планирования // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2020. № 4. С. 37–42.
 17. Добровольный национальный обзор достижения целей устойчивого развития. Официальный сайт Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации <https://ac.gov.ru/projects/project/dobrovolnyj-nacionalnyj-obzor-dostizhenia-celej-ustojcivogo-razvitiia-10> (дата обращения 22.06.2020).
 18. Дильдин А.Н., Трофимов Е.А., Чуманов И.В. Совершенствование методики глубокой переработки отходов сталеплавильного производства. Часть 1. Термодинамический анализ // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 1. С. 5–12.
 19. Морозов К.М., Ильина И.С., Шиловский В.А., Дергунов С. А. Новые горизонты цементного производства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 11. С. 77–80.
 8. Guseva T., Vartanyan M., Tikhonova I., Shchelchikov K. Setting energy efficiency enhancement objectives for Russian energy intensive industries. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, No. 4, pp. 619–628.
 9. Baidy R., Ghosh S.K., V. Parlikar U. Co-processing of industrial waste in cement kiln – a robust system for material and energy recovery. *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31, pp. 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.041>
 10. Irungu S.N., Muchiri P., Byiringiro J.B. The generation of power from a cement kiln waste gas: a case study of a plant in Kenya. *Energy Science and Engineering*. 2017. Vol. 5(2), pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.153>
 11. Scrivenera K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114, pp. 2–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
 12. Provis J.L., Juenger M., Komljenovic M. (Eds). *Innovation in cements for sustainability*. 2020. Lausanne: Frontiers Media SA. 119 p. doi: 10.3389/978-2-88963-346-3
 13. Potapova E.N., Volosatova M.A. Cement production. Encyclopaedia of technologies. Evolution and comparative analysis of resource efficiency of industrial technologies / Ed. by Skobelev D.O. Moscow-Saint Petersburg: Renome, 2019, pp. 455–514. (In Russian).
 14. Sivkov S.P. Perspective cement types: what will be used instead of Portland cement. *Mezhdunarodnoe Analiticheskoe Obozrenie Alitinform: Tsement. Beton. Sukhie Smesi*. 2017. Vol. 48. No. 4–5, pp. 40–48. (In Russian).
 15. Skobelev D.O. Environmental industrial policy: main trends and establishment principles in Russia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 6: Ekonomika*. 2019. No. 4, pp. 78–94. (In Russian).
 16. Skobelev D.O. Resource efficiency of an economy: aspects for strategic planning. *Menedzhment v Rossii i za Rubezhom*. 2020. No. 4, pp. 37–42. (In Russian).
 17. Voluntary national review for achieving sustainable development goals // Official website of the Analytical Center for the Government of the Russian Federation <https://ac.gov.ru/projects/project/dobrovolnyj-nacionalnyj-obzor-dostizhenia-celej-ustojcivogo-razvitiia-10> (Date of access 22.06.2020). (In Russian).
 18. Dil'din A.N., Trofimov E.A., Tchumanov I.V. Improving deep processing methods for steelmaking waste. Part 1. Thermodynamic analysis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya*. 2017. Vol. 60. No. 1, pp. 5–12. (In Russian).
 19. Morozov K.M., Il'ina I.S., Shilovsky V.A., Dergunov S.A. New horizons of cement production. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2017. No. 11, pp. 77–80. (In Russian).

УДК 666.942.86

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-21-26>

О.В. ЧЕРНОУСОВА, канд. хим. наук (byolval@mail.ru),
 О.Б. РУДАКОВ, д-р хим. наук (robi57@mail.ru),
 С.О. САДЫКОВ, старший преподаватель (ssadikov@vgasu.vrn.ru)

Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Контроль содержания пигментов в цветных цементах с помощью мобильных устройств

В строительстве и архитектуре для обеспечения эстетических дизайнерских решений активно применяют окрашенные в различные цвета строительные материалы. Для оценки содержания и качества пигментов в цветных цементах предложено использовать цветометрические параметры образцов цемента, полученные с применением цветовой системы RGB при помощи мобильных цветорегистрирующих устройств – смартфонов. Определены технические и некоторые метрологические характеристики цифрового цветометрического способа контроля содержания красного и коричневого минеральных, желтого и розового органических пигментов в белом портландцементе. Для нивелирования возможных погрешностей определения параметров цветности анализируемого образца, связанных с освещением и техническими характеристиками цветорегистрирующего устройства, предложено использовать не абсолютные значения величин интенсивности компонент цветности R, G и B, а относительные. В качестве образца сравнения (эталоны белизны) выбрали порошок BaSO₄. Установлено, что зависимости относительных параметров цветности образцов цемента от содержания в них пигментов, как правило, хорошо описываются полулогарифмическими анаморфозами для всех трех компонент R, G и B, величина достоверности аппроксимации $R^2 \geq 0,95$.

Ключевые слова: цифровая цветометрия, цветовая система RGB, цветной цемент, пигменты.

Для цитирования: Черноусова О.В., Рудаков О.Б., Садыков С.О. Контроль содержания пигментов в цветных цементах с помощью мобильных устройств // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-21-26>

O.V. CHERNOUSOVA, Candidate of Sciences (Chemistry) (byolval@mail.ru);

O.B. RUDAKOV, Doctor of Sciences (Chemistry) (robi57@mail.ru),

S.O. SADYKOV, Senior lecturer, (ssadikov@vgasu.vrn.ru)

Voronezh state technical university (84, 20-letiya Ocyabrya Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

Control of the Pigment Content in Colored Cements Using Mobile Devices

In construction and architecture, construction materials painted in various colors are actively used to provide aesthetic design solutions. To assess the content and quality of pigments in colored cements, it is proposed to use the colorimetric parameters of cement samples obtained using the RGB color system with the help of mobile color-recording devices-smartphones. The technical and some metrological characteristics of the digital colorimetric method for monitoring the content of red and brown mineral, yellow and pink organic pigments in white Portland cement are determined. To level out possible errors in determining the chromaticity parameters of the analyzed sample related to lighting and technical characteristics of the color recording device, it is proposed to use relative values of the intensity values of the chromaticity components R, G and B, rather than absolute values. BaSO₄ powder was chosen as a reference sample (standard of whiteness). It was found that the dependences of the relative color parameters of cement samples on the content of pigments in them, as a rule, are well described by semi-logarithmic anamorphoses for all three components R, G and B, the approximation confidence value $R^2 \geq 0.95$.

Keywords: digital colorimetry, RGB color system, colored cement, pigments.

For citation: Chernousova O.V., Rudakov O.B., Sadykov S.O. Control of the pigment content in colored cements using mobile devices. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 21–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-21-26>

Начиная с 1950-х гг. и до настоящего времени, цветные пигменты для бетонов и цемента применяются, чтобы оживить пространство при строительстве новых зданий и реконструкции существующих. Цветной пигментированный бетон обладает свойствами, аналогичными традиционному бетону, а именно высокой прочностью и устойчивостью к атмосферным воздействиям. В литературе можно найти характеристики и классификацию цветных пигментов, применяемых для цемента и бетона, возможности их использования, влияние пигментов на конечные характеристики бетона, такие как плотность, впитываемость, прочность при сжатии [1], модуль упругости в раз-

ном возрасте бетона [2], долговечность, сопротивление истиранию и непроницаемость [3]. Цветные цементы также проверялись на водопоглощение и морозостойкость [4]. Известно, что пигменты оказывают влияние и на усадку бетона [5, 6]. Кроме того проводились исследования [7], посвященные вопросу первичного и вторичного выцветания готовых цветных бетонных изделий (стойкости цвета). При этом использование пигментов увеличивает удельную стоимость бетона, что напрямую влияет на стоимость строительства [4], поэтому идет поиск недорогих пигментов, изготовленных из отходов и шлама различных производств [8, 9].

Пигменты, добавляемые в цветные цементы и бетоны, могут служить не только для декоративных целей, но и выполнять роль индикаторов воздействия на строительные объекты экстремальных условий, например высокой температуры. Влияние высокой температуры приводит к уменьшению прочности при сжатии и растяжении бетонных конструкций. Например, в работе [10] предлагается использовать пигмент, состоящий из диоксида марганца, дигидрофосфата аммония и фосфорной кислоты, имеющий темно-фиолетовый цвет из-за присутствия фосфата и аммиака. При повышении температуры до 410°C в результате испарения воды и выделения аммиака из частиц пигмента происходит изменение цвета на серовато-желтый. В эксперименте вносили в белый цемент фиолетовый пигмент в соотношении 1, 3 и 5% от общей массы и контролировали изменение цвета в шкалах *RGB* и *CIELAB*. При повышении температуры до 410°C цвет материала необратимо изменялся.

В отличие от визуальной колориметрии, рекомендуемой действующим ГОСТ 15825–80 «Портландцемент цветной. Технические условия», согласно которому цвета цемента на соответствие эталону проверяют визуально сравнением интенсивности цвета цементной покраски или цементного порошка и эталона, цифровая цветометрия (ЦЦМ) исключает субъективность этой оценки оператором, позволяет проводить не только качественный тест-анализ, но и полноценный количественный анализ, как показано в работах [10–15], в которых изучались возможности ЦЦМ в определении содержания минеральных добавок в цементах, отличающихся от него по параметрам цветности. Таким образом, разработка оперативного количественного контроля параметров цветности цветного цемента, материалов, изделий и конструкций с его применением является актуальной задачей.

Согласно классификации, принятой в ГОСТ 15825–80 «Портландцемент цветной. Технические условия», цементы подразделяют по цвету на красный, желтый, зеленый, голубой, розовый, коричневый и черный. При этом портландцементы могут содержать не более 15% минерального, искусственного или природного пигмента или не более 0,5% органического пигмента от общей массы цемента. Цвет портландцемента должен соответствовать утвержденному эталону. Эталонном служит образец портландцемента или цементная покраска. Образцы-эталонные утверждаются для каждого завода отдельно. Соответствие цвета цемента и цвета эталона определяют визуально при сравнении интенсивности окраски цементной покраски или цементного порошка и эталона, находящихся друг от друга на расстоянии не более 5 см. Однако визуальная оценка не всегда достоверна. Например, в работе [16] авторы отмечают, что распознать изменение цвета пигментированного бетона невооруженным

глазом было невозможно. Образцы пигментированного бетона в виде кубиков были испытаны в устройстве, имитирующем солнечное излучение, а затем были оценены изменения цвета и структуры поверхности. Найти отличия удалось только с помощью специальной компьютерной технологии оптического просмотра.

Как показано в [11–15], ключевыми преимуществами ЦЦМ перед визуально-колориметрической экспертизой или рядом инструментальных методов анализа являются объективность определения, отсутствие требования высокой квалификации оператора, возможность электронной документации (хранения и передачи) первичных данных и их обработки с помощью программного обеспечения (ПО), устанавливаемого не только на лабораторных компьютерах, но и непосредственно на мобильном устройстве. При этом стоимость единичного анализа остается невысокой, сохраняется экспрессность выполнения измерений.

За последние 20 лет наблюдается 20-кратный рост публикаций в научных изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (*Web of Science*, *Scopus*), посвященных использованию ЦЦМ в аналитической химии, фармацевтическом анализе, контроле качества и безопасности продукции [17–20]. В них прослеживается четкая тенденция все более активного применения в тест-методах исследований смартфонов с цифровыми фотокамерами. По прецизионности и другим метрологическим характеристикам ЦЦМ практически не уступает другим оптическим методам, применяемым в химическом анализе материалов [17–20]. Обобщая цитированные первоисточники, можно заключить, что смартфоны, оснащенные цифровыми камерами, имеют сходные технические характеристики с цифровыми фотоаппаратами, кроме того, они представляют собой мини-компьютеры, на которых можно выполнять не только регистрацию, но и обработку цифрового изображения. Смартфоны обладают несколькими удобными возможностями для оперативного анализа: совмещают в себе передающее устройство, фотокамеру и микропроцессор с достаточным объемом памяти, который позволяет хранить и перерабатывать информацию с помощью облачных технологий. Для смартфонов специально разработана широкая линейка ПО для обработки электронных изображений. Мобильность ЦЦМ с применением смартфонов является, несомненно, важнейшим достоинством этого способа оперативно и непосредственно на месте хранения, продажи или использования цветного цемента выполнять анализ его окраски в так называемых полевых условиях.

Целью работы являлось изучение особенностей использования цифровой цветометрии с применением смартфонов для контроля содержания пигментов в цементах.

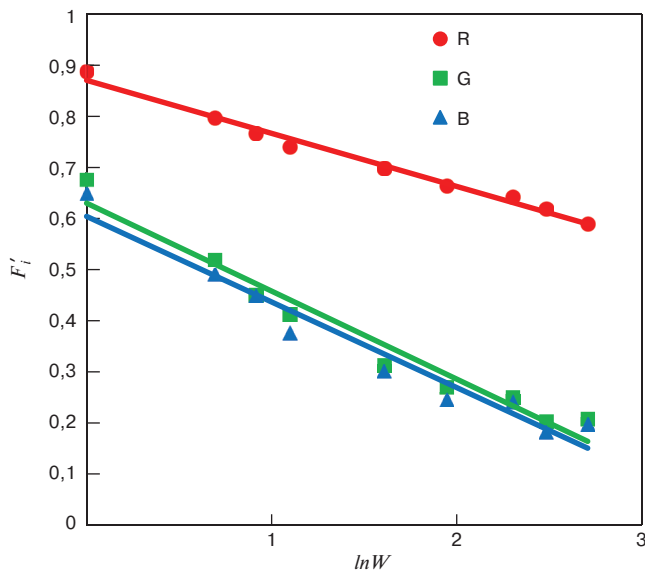


Рис. 1. Зависимость относительных интенсивностей компонент цветности F'_i от содержания красного минерального пигмента в портландцементе

Fig. 1. Dependence of relative intensities of color components F'_i on the content of red mineral pigment in Portland cement

Экспериментальная часть

В работе использовали белый портландцемент М-400 (ГОСТ 10178–85, г. Старый Оскол). Для приготовления цветного цемента использовали красный минеральный пигмент (FEPREN TP303, Чешская Республика), коричневый минеральный пигмент (железооксидный № 686, КНР), краску сухую пигментную для побелки органическую желтого цвета (ТУ 6-15-757-12) и розовый органический пигмент (розовый FVB, КНР).

Содержание минеральных пигментов в цементе варьировалось в пределах от 0 до 15%, а для органических – от 0 до 3%. Перед оценкой цвета цементы тщательно растирали в фарфоровой ступке до однородного состояния. Цветность образцов регистрировали в лунках микропланшета UniCell. Микропланшеты располагали под штативом на расстоянии 20 см от фотокамеры смартфона в помещении с искусственным освещением (140 ± 5 люкс). В качестве образца сравнения использовали порошок $BaSO_4$, ч.д.а., ГОСТ 3158–75 «Реактивы. Барий серно-кислый. Технические условия (с Изменениями № 1, 2)». Для приготовления градуировочных смесей (масса одной пробы 5 г) использовали технические весы с точностью $\pm 0,001$ г. Цифровые изображения регистрировали на смартфоне Huawei P Smart. Условия съемки: постоянная автофокусировка, автоматический режим баланса белого, без вспышки. Файлы изображений обрабатывали в программе Color Detector. Android (версия 1.0.79). Курсором выделяли пять точек изображения материала в лунке по углам выделенного квадрата и в его центре ($n=5$), проводили расчет средних значений яркости компонент цветности в системе RGB.

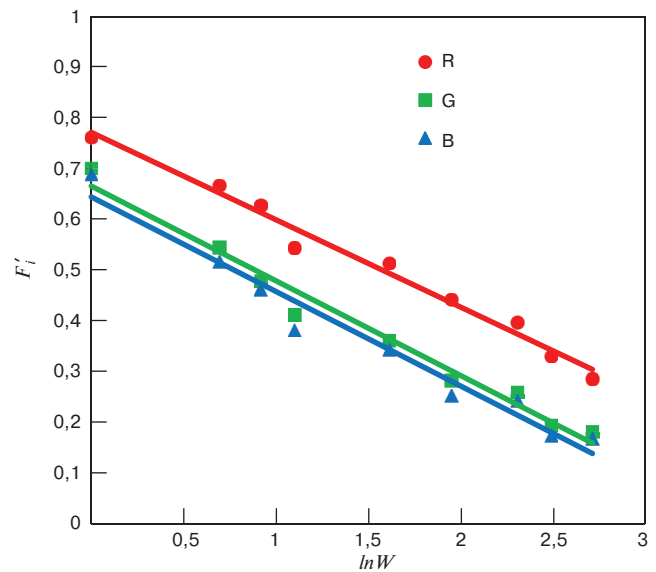


Рис. 2. Зависимость относительных интенсивностей компонент цветности F'_i от содержания коричневого минерального пигмента в портландцементе

Fig. 2. Dependence of relative intensities of color components F'_i on the content of brown mineral pigment in Portland cement

Статистико-математические расчеты проводили в оболочке ПО MS Excel 2007.

Результаты и их обсуждение

Выбор ПО для обработки цифровых изображений (Color Detector. Android, версия 1.0.79) обусловлен тем, что эта программа имеет удобный интерфейс, дает возможность при необходимости получать значения цветности сразу в нескольких цветовых шкалах (RGB, Lab, HSB и CMYK). При обработке изображение можно увеличивать, а также устанавливать баланс белого, сохранять результаты нескольких последних измерений.

Для нивелирования возможных погрешностей определения параметров цветности F_R , F_G и F_B анализируемого образца, связанных с освещением и техническими характеристиками цветорегистрирующего устройства, использовали не сами значения интенсивности компонент цветности (F_i), а относительные величины F'_i , найденные по формуле (1), где $F_{i,e}$ – интенсивности компонент цветности образца сравнения ($BaSO_4$), зарегистрированные параллельно:

$$F'_i = F_i / F_{i,e} \quad (1)$$

Например, относительная интенсивность красной компоненты для образца белого цемента без добавок пигментов $F'_R = F_R(\text{цемент}) / F_R(BaSO_4) = 209 / 227 = 0,919$.

Данный подход эффективно применяли в ряде исследований [21–23]. Если для бинарных смесей серого портландцемента со светлыми (мел, известь) или более темными минеральными добавками (зола-уноса) зависимости параметров цветности смеси от содержания добавки имели вид линейной функ-

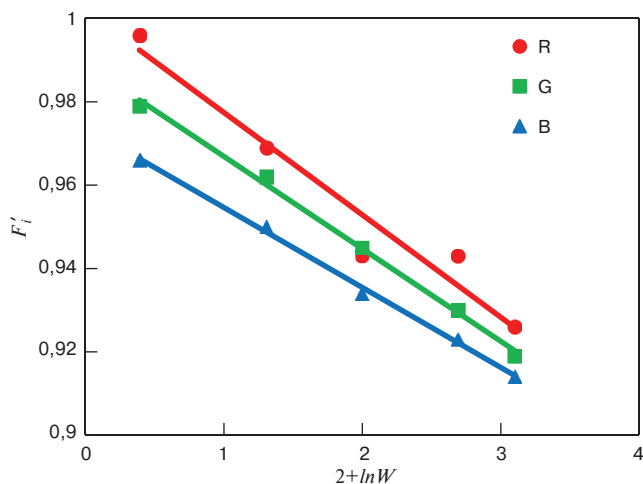


Рис. 3. Зависимость относительных интенсивностей компонент цветности F'_i от содержания розового органического пигмента в портландцементе

Fig. 3. Dependence of relative intensities of color components F'_i on the content of pink organic pigment in Portland cement

Градуировочные уравнения для определения содержания пигментов в смеси
Calibration equations for determining the pigment content in a mixture

Пигмент	Диапазон W , %	Градуировочное уравнение $F'_i = a - b \ln W$	Коэффициент детерминации, R^2
Красный	0–15	$F'_R = 0,871 - 0,104 \ln W$	0,99
		$F'_G = 0,630 - 0,172 \ln W$	0,96
		$F'_B = 0,604 - 0,168 \ln W$	0,96
Коричневый	0–15	$F'_R = 0,770 - 0,172 \ln W$	0,98
		$F'_G = 0,665 - 0,187 \ln W$	0,98
		$F'_B = 0,643 - 0,186 \ln W$	0,97
Розовый	0–3	$F'_R = 0,953 - 0,025 \ln W$	0,95
		$F'_G = 0,945 - 0,022 \ln W$	0,99
		$F'_B = 0,935 - 0,019 \ln W$	0,99

ции (2), где W – массовая доля добавки (%), то в случае добавки цветного пигмента к белому цементу эти зависимости были нелинейными, однако они с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 \geq 0,95$) линеализовались в виде полулогарифмических анаморфоз (3) (рис. 1–3):

$$F'_i = a + bW; \quad (2)$$

$$F'_i = a + b \ln W. \quad (3)$$

Полученные градуировочные функции представлены в таблице. Для смесей с минеральными пигментами расчет функций выполняли в доверительном интервале $P=0,95$ и значениях $n=9$, для смесей с желтым и розовым органическими пигментами – $n=5$.

Что касается зависимости F'_i от концентрации желтого пигмента в белом цементе ($n=5$; $P=0,95$; $W=0-3\%$), оказалось, что интенсивности компонент F'_R и F'_G изменяются незначительно (рис. 4), тангенс угла наклона небольшой, коэффициент детерминации $R^2 < 0,9$, т. е. изменения интенсивностей компо-

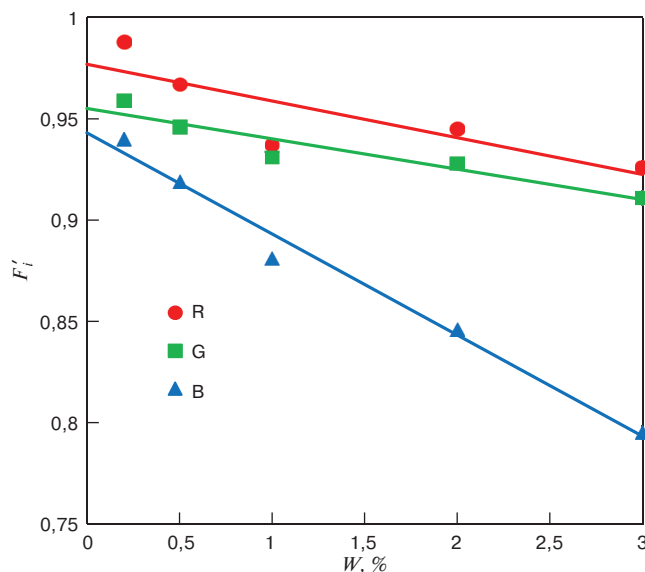


Рис. 4. Зависимость относительных интенсивностей компонент цветности F'_i от содержания желтого органического пигмента (%) в портландцементе

Fig. 4. The dependence color components relative intensities F'_i on yellow organic pigment content of (%) in Portland cement

нент R и G недостаточно информативны для их использования в определении содержания этого пигмента, в то же время F'_B хорошо подходит для градуировки в виде линейной функции (2): $F'_B = 0,943 - 0,05 W$ с коэффициентом $R^2 = 0,98$.

Таким образом, цифровая цветометрия с применением смартфонов перспективна в качестве оперативного способа контроля содержания минеральных и органических пигментов в портландцементах во внелабораторных условиях. Ассортимент неорганических и органических пигментов для бетонов достаточно широк, изучение цветометрических параметров этих пигментов и готовых материалов с их применением целесообразно продолжать.

Заключение

Применение мобильных цветорегистрирующих устройств (смартфонов) обеспечивает невысокую стоимость единичного анализа, экспрессность, отсутствие требования высокой квалификации оператора, возможность электронной документации (хранения и передачи) первичных данных, их обработки с помощью программного обеспечения, устанавливаемого непосредственно на мобильном устройстве. Цифровая цветометрия может быть полезна для проверки аутентичности марки пигмента, цветного портландцемента при наличии нормированных цветовых характеристик материала, а также для контроля содержания в нем пигментов. Статистико-математический анализ градуировочных функций, полученных цветометрическим способом с применением мобильных цветорегистрирующих устройств, показывает, что этот способ пригоден для количественных определений добавок пигментов в белый портландцемент.

Список литературы

1. Hospodarova V., Junak J., Stevulova N. Color pigments in concrete and their properties // *Pollack Periodica*. 2015. Vol. 10. No. 3, pp. 143–151. DOI: 10.1556/606.2015.10.3.15
2. Pecur I., Juradin S., Duvnjak M., Lovric T. Influence of pigments on concrete properties // *Beton-Technologie, Konstrukce, Sanace*. 2009. Vol. 9 (6), pp. 66–69.
3. Uysal M. The use of waste maroon marble powder and iron oxide pigment in the production of coloured self-compacting concrete // *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2018. Article ID 8093576. DOI: 10.1155/2018/8093576.
4. Yildizel S.A., Kaplan G., Öztürk A.U. Cost optimization of mortars containing different pigments and their freeze-thaw resistance properties // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. DOI: 10.1155/2016/5346213.
5. Bruce S.M., Rowe G.H. The influence of pigments on mix designs for block paving units. *Proceedings of the 4th International Conference on Concrete Block Paving*. Auckland, New Zealand. 1992. Vol. 2, pp. 117–124.
6. Lee H.S., Lee J.Y., Yu M.Y. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. No. 11, pp. 1889–1896. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00209-6
7. Sutan N.M., Sinin H. Efflorescence phenomenon on concrete structures // *Advanced Materials Research. Trans. Tech. Publications Ltd*. 2013. Vol. 626, pp. 747–750. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.747
8. Nenadović S.S., Mucsi G., Kljajević L.M., Mirković M.M., Nenadović M.T., Kristaly F., Vukanac I.S. Physicochemical, mineralogical and radiological properties of red mud samples as secondary raw materials // *Nuclear Technology and Radiation Protection*. 2017. Vol. 32. No. 3, pp. 261–266. DOI:10.2298/NTRP1703261N
9. Sadasivam S., Thomas H.R. Colour and toxic characteristics of metakaolinite–hematite pigment for integrally coloured concrete, prepared from iron oxide recovered from a water treatment plant of an abandoned coal mine // *Journal of Solid State Chemistry*. 2016. Vol. 239, pp. 246–250. DOI: 10.1016/j.jssc.2016.05.003
10. Rajadurai R.S., Lee J.H. High temperature sensing and detection for cementitious materials using manganese violet pigment // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 4, pp. 993. DOI: 10.3390/ma13040993.
11. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Усачев С.М., Хорохордин А.М. Цифровой цветометрический контроль минеральных добавок в цемент // *Химия, физика и механика материалов*. 2017. № 2. С. 3–13.

References

1. Hospodarova V., Junak J., Stevulova N. Color pigments in concrete and their properties. *Pollack Periodica*. 2015. Vol. 10. No. 3, pp. 143–151. DOI: 10.1556/606.2015.10.3.15
2. Pecur I., Juradin S., Duvnjak M., Lovric T. Influence of pigments on concrete properties. *Beton-Technologie, Konstrukce, Sanace*. 2009. Vol. 6, pp. 66–69.
3. Uysal M. The use of waste maroon marble powder and iron oxide pigment in the production of coloured self-compacting concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Vol. 2018. DOI: 10.1155/2018/8093576.
4. Yildizel S.A., Kaplan G., Öztürk A.U. Cost optimization of mortars containing different pigments and their freeze-thaw resistance properties. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. DOI: 10.1155/2016/5346213.
5. Bruce S.M., Rowe G.H. The influence of pigments on mix designs for block paving units. *Proceedings of the 4th International Conference on Concrete Block Paving*. Auckland, New Zealand. 1992. Vol. 2, pp. 117–124.
6. Lee H.S., Lee J.Y., Yu M.Y. Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. No. 11, pp. 1889–1896. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00209-6
7. Sutan N.M., Sinin H. Efflorescence Phenomenon on Concrete Structures. *Advanced Materials Research. Trans. Tech. Publications Ltd*. 2013. Vol. 626, pp. 747–750. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.626.747
8. Nenadović S.S., Mucsi G., Kljajević L.M., Mirković M.M., Nenadović M.T., Kristaly F., Vukanac, I.S. Physicochemical, mineralogical and radiological properties of red mud samples as secondary raw materials. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. 2017. Vol. 32. No. 3, pp. 261–266. DOI: 10.2298/NTRP1703261N
9. Sadasivam S., Thomas H.R. Colour and toxic characteristics of metakaolinite–hematite pigment for integrally coloured concrete, prepared from iron oxide recovered from a water treatment plant of an abandoned coal mine. *Journal of Solid State Chemistry*. 2016. Vol. 239, pp. 246–250. DOI: 10.1016/j.jssc.2016.05.003
10. Rajadurai R.S., Lee J.H. High temperature sensing and detection for cementitious materials using manganese violet pigment. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 4, pp. 993. DOI: 10.3390/ma13040993
11. Rudakov O.B., Khorokhordina E.A., Usachev S.M., Khorokhordin A.M. Digital colorimetric control of mineral additives in cement. *Himiya, Fizika i Mekhanika Materialov*. 2017. No. 2, pp. 3–13. (In Russian).
12. Rudakov O.B., Khorokhordina E.A., Groshev E.N., Tran Hai Dang, Selivanova E.B. Digital colorimetric control quality of construction materials. *Nauchnyj vestnik VGASU. Seriya: Fiziko-Khimicheskie Problemy i*

12. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Грошев Е.Н., Чан Х.Д., Селиванова Е.Б. Цифровой цветометрический контроль качества строительных материалов // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2013. № 7. С. 104–120.
13. Бахметьев К.А., Гридяев В.Е., Степанов Д.Е., Рудаков О.Б. Цифровая цветометрия цементов с применением мобильных устройств // *Химия, физика и механика материалов*. 2018. № 2 (17). С. 110–120.
14. Рудаков О.Б., Черноусова О.В., Вострикова Т.О., Усачев С.М. Цветометрический контроль цементов мобильными устройствами // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 3 (22). С. 35–48.
15. Черноусова О.В., Черепакхина Р.Г., Садыков С.О., Рудаков О.Б. Цифровая цветометрия сыпучих и полимерных материалов // *Инженерные системы и сооружения*. Вып. 1 (38). 2020. С. 37–45.
16. Kulhavý P., Kaniová E., Fliegel V., Vik M. Laboratory analysis of the main properties and a color stability of a coating layers under the UV loading. *In MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 89. 01008. DOI: 10.1051/mateconf/20178901008
17. Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А., Чан Хай Данг. Тонкослойная хроматография и цветометрия в контроле фенольного индекса отделочных строительных материалов // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 66–70.
18. Иванов В.М., Моногарова О.В., Осолок К.В. Возможности и перспективы развития цветометрического метода в аналитической химии // *Журнал аналитической химии*. 2015. Т. 70. № 10. С. 1011–1025. DOI: 10.7868/S0044450215100114
19. Апяри В.В., Горбунова М.В., Исаченко А.И., Дмитриенко С.Г., Золотов Ю.А. Использование бытовых цветорегистрирующих устройств в количественном химическом анализе // *Журнал аналитической химии*. 2017. Т. 72. № 11. С. 963–977. DOI: 10.7868/S0044450217110019
20. Черноусова О.В., Рудаков О.Б. Цифровые изображения в аналитической химии для количественного и качественного анализа // *Химия, физика и механика материалов*. 2019. № 2. С. 55–125.
21. Рудаков О.Б., Черноусова О.В., Черепакхина Р.Г., Рудаков Я.О. Цветометрическое определение минеральных примесей в цементах с использованием мобильных устройств // *Аналитика и контроль*. 2020. Т. 24. № 2. С. 114–123. DOI: 10.15826/analitika.2020.24.2.003
22. Рудакова Л.В., Рудаков О.Б. Информационные технологии в аналитическом контроле биологически активных веществ. СПб.: Лань, 2015. 468 с.
23. Люттов В.П., Четверкин П.А., Головастик Г.Ю. Цветоведение и основы колориметрии. М.: Юрайт, 2018. 168 с.
- Vysokie Tekhnologii Stroitel'nogo Materialovedeniya*. 2013. No. 7, pp. 104–120 (In Russian).
13. Bakhmetyev K.A., Gridiaev V.E., Stepanov D.E., Rudakov O.B. Digital colorimetry of cements using mobile devices. *Khimiya. Fizika i Mekhanika Materialov*. 2018. No. 2 (17), pp. 110–120 (In Russian).
14. Rudakov O.B., Chernousova O.V., Vostrikova T.O., Usachev S.M. Colorimetric control of cements by mobile devices. *Khimiya, Fizika i Mekhanika Materialov*. 2019. No. 3 (22), pp. 35–48 (In Russian).
15. Chernousova O.V., Cherepakhina R.G., Sadykov S.O., Rudakov O.B. Digital colorimetry of bulk and polymeric materials. *Inzhenernyye Sistemy i Sooruzheniya*. 2020. No. 1 (38), pp. 37–45. (In Russian).
16. Kulhavý P., Kaniová E., Fliegel V., Vik M. Laboratory analysis of the main properties and a color stability of a coating layers under the UV loading. *In MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. 2017. Vol. 89. 01008. DOI: 10.1051/mateconf/20178901008.
17. Rudakov O.B., Khorokhordina E.A., Chan Hai Dang. Thin-layer chromatography and colorimetry for control of phenol index of finishing building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 6, pp. 66–70. (In Russian).
18. Ivanov V.M., Monogarova O.V., Oskolok K.V. Capabilities and prospects of the development of a chromaticity method in analytical chemistry. *Zhurnal Analiticheskoy Khimii*. 2015. Vol. 70. No. 10, pp. 1165–1178. (In Russian). DOI: 10.7868/S0044450215100114.
19. Apiary V.V., Gorbunova M.V., Isachenko A.I., Dmitrienko S.G., Zolotov Y.A. Use of household color-recording devices in quantitative chemical analysis. *Zhurnal Analiticheskoy Khimii*. 2017. Vol. 72. No. 11. pp. 963–977. (In Russian). DOI: 10.7868/S0044450217110019
20. Chernousova O.V., Rudakov O.B. Digital images in analytical chemistry for quantitative and qualitative analysis. *Khimiya, Fizika i Mekhanika Materialov*. 2019. No. 2, pp. 55–125. (In Russian).
21. Rudakov O.B., Chernousova O.V., Cherepakhina R.G., Rudakov Ya.O. Colorimetric determination of mineral impurities in cements using mobile devices. *Analitika i Kontrol'*. 2020. No. 2, pp. 114–123. (In Russian). DOI: 10.15826/analitika.2020.24.2.003
22. Rudakova L.V., Rudakov O.B. Informacionnye tehnologii v analiticheskom kontrole biologicheski aktivnyh veshhestv [Information technologies for analytical control of biologically active substances] S.-Peterburg: Lan'. 2015. 468 p.
23. Lyutov V.P., Chetverkin P.A., Golovastikov G.Yu. Tsvetovedenie i osnovyi kolorimetri: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata [Color science and bases of colorimetry: a textbook and a practical work for academic baccalaureate]. Moscow: Yurayt Publishing. 2018. 158 p.

Ю.В. СОКОЛОВА¹, инженер (ассистент) (yu.sokolova@narfu.ru),
 А.М. АЙЗЕНШТАДТ¹, д-р хим. наук, профессор (a.isenshtadt@narfu.ru);
 Е.В. КОРОЛЕВ², д-р техн. наук, профессор (prorector.umr@spbgasu.ru);
 А.А. ЧИБИСОВ¹, магистрант (toxa_96@bk.ru)

¹ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)

Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего

Развитие Северных и Арктических регионов сдерживается неблагоприятными инженерно-геологическими условиями. Поэтому актуальной задачей является внедрение инновационных технологий в строительстве, которые обеспечивают улучшение физико-механических свойств дисперсных грунтов. Существуют различные способы укрепления и стабилизации грунтов, однако наиболее широкое применение находят комбинированные физико-химические методы, позволяющие создавать структуры с заданными эксплуатационными характеристиками по типу грунтобетона. Предварительные исследования показали эффективность использования добавки на основе глиоксаля для укрепления алюмосиликатных (песчаных и глинистых) грунтов оснований дорог и инженерных коммуникаций. Разработанную композицию на основе песка, сапонитсодержащего материала, глиоксаля и тонкодисперсной коры, исходя из изученного механизма топохимического взаимодействия между компонентами, можно рассматривать как модель грунтобетона на основе полимер-органического связующего. В качестве нетрадиционного вяжущего выступает система механоактивированная кора – глиоксаль, а в качестве наполнителя смесь полиминерального песка и сапонитсодержащего материала, характеризующаяся количественным варьированием последнего и обеспечивающая создание модельной системы глинистого грунта с заданным числом пластичности. Однако в настоящее время отсутствует оценка вклада основных параметров топохимического взаимодействия в структурообразующие свойства полимер-органического связующего и не определено влияние рецептурных и технологических факторов на свойства конечного композита. Целью исследования, представленного в данной работе, являлась апробация научно обоснованной методики оценки влияния химического и физико-химического факторов на структурообразование полимер-органического связующего, выявление максимально возможного синергетического эффекта и определение диапазонов варьирования содержания компонентов. Для характеристики влияния химического фактора было выбрано количество глиоксаля, выраженное через отношение поляризационной составляющей поверхностного натяжения системы кора – глиоксаль после завершения реакции поликонденсации, определяемого методом Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле (ОВРК), к начальной концентрации глиоксаля; для физико-химического фактора – количество активных центров, выраженное через удельную площадь поверхности механоактивированной коры. В качестве структурно-чувствительных свойств были выбраны прочность при сжатии композита и его влагостойкость, характеризуемая условным коэффициентом размягчения. Установлены зависимости влияния рецептурных и технологических факторов на свойства конечного композита. На прочность при сжатии наибольшее влияние оказывает физико-химический фактор, на влагостойкость – химический фактор. Разработаны принципы управления процессами структурообразования полимер-органического связующего. Получение грунтобетона с требуемыми прочностными характеристиками должно осуществляться путем контролирования удельной площади поверхности механоактивированной коры, а достижение заданной степени влагостойкости – за счет варьирования концентрации глиоксаля.

Ключевые слова: грунтобетон, полимер-органическое вяжущее, глиоксаль, механоактивированная кора, структурообразование, поверхностное натяжение, удельная поверхность, синергетический эффект.

Исследования выполнены на уникальной научной установке «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем» при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-43-292002 р_мк.

Для цитирования: Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Чибисов А.А. Оценка влияния рецептурных факторов на структурообразование полимер-органического связующего // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 27–36.
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-27-36>

Yu.V. SOKOLOVA¹, Engineer (Assistant) (yu.sokolova@narfu.ru), A.M. AYZENSHTADT¹, Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (a.isenshtadt@narfu.ru); E.V. KOROLEV², Doctor of Sciences (Engineering), Professor (prorector.umr@spbgasu.ru); A.A. CHIBISOV¹, Master student (toxa_96@bk.ru)

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

² St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005, Russian Federation)

Evaluation of the Influence of Prescription Factors on the Structure Formation of Polymer-Organic Binder

The development of the Northern and Arctic regions is hindered by unfavorable engineering and geological conditions. Therefore, an urgent task is to introduce innovative technologies in construction that improve the physical and mechanical properties of dispersed soils. There are various ways to strengthen and stabilize soils, but the most widely used are combined

physical and chemical methods that make it possible to create structures with specified performance characteristics by the type of soil concrete. Preliminary studies have shown the effectiveness of using an additive based on glyoxal to strengthen aluminosilicate (sandy and clay) soils of road bases and utilities. The developed composition on the basis of sand, saponite-containing material, glyoxal and fine bark, based on the studied mechanism of topochemical interaction between the components, can be considered as a model of soil-concrete based on a polymer-organic binder. The non-traditional binder is a system of mechanically activated bark – glyoxal, and the filler is a mixture of polymineral sand and saponite-containing material, characterized by quantitative variation of the latter and providing the creation of a model system of clay soil with a given number of plasticity. However, there is currently no assessment of the contribution of the main parameters of topochemical interaction to the structure-forming properties of the polymer-organic binder, and the influence of prescription and technological factors on the properties of the final composite is not determined. The purpose of the study presented in this paper was to test a scientifically based methodology for assessing the influence of chemical and physico-chemical factors on the structure formation of a polymer-organic binder, to identify the maximum possible synergistic effect and to determine the ranges of variation in the content of components. To characterize the influence of the chemical factor, the amount of glyoxal was chosen, expressed in terms of the ratio of the polarization component of the surface tension of the Cora-glyoxal system after completion of the polycondensation reaction, determined by the Ounce-Wendt-Rabel - Kjellble method to the initial concentration of glyoxal; for the physico-chemical factor, the number of active centers, expressed in terms of the specific surface area of the mechanoactivated bark. The compressive strength of the composite and its moisture resistance, characterized by a conditional softening coefficient, were chosen as structurally sensitive properties. The dependences of the influence of prescription and technological factors on the properties of the final composite are established. The compressive strength is most affected by the physical and chemical factor, and the moisture resistance is most affected by the chemical factor. The principles of controlling the processes of polymer-organic binder structure formation are developed. Obtaining soil concrete with the required strength characteristics should be carried out by controlling the specific surface area of the mechanically activated bark; and achieving a given degree of moisture resistance – by varying the concentration of glyoxal.

Keywords: soil-concrete, polymer-organic binder, glyoxal, mechanically activated bark, structure formation, surface tension, specific surface area, synergistic effect.

The research was carried out at the unique scientific installation “Surface physic-chemistry of nano-disperse systems” with the financial support of the RFBR, project No. 18-43-292002 r_mk.

For citation: Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M., Korolev E.V., Chibisov A.A. Evaluation of the influence of prescription factors on the structure formation of polymer-organic binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 27–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-27-36>

В настоящее время одним из приоритетов государственной политики России в соответствии со «Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года» является обеспечение устойчивого и сбалансированного развития территории, освоение отдаленных и труднодоступных Северных и Арктических регионов. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, в частности модернизировать инфраструктуру, создать динамично развивающуюся, стабильно функционирующую, доступную, конкурентоспособную и безопасную транспортную систему, способствующую социально-экономическому развитию и укрепляющую территориальную целостность страны. Для создания такой системы важно обеспечить надежность и долговечность дорожной конструкции, которые зависят не только от качества дорожной одежды, но и от прочности земляного полотна.

Однако одним из главных сдерживающих факторов являются неблагоприятные инженерно-геологические условия, характерные для Северных и Арктических регионов. Так, например, на территории Архангельской области преобладают алюмосиликатные дисперсные грунты (мелкие и пылеватые пески, глинистые грунты), представляющие собой многофазную многокомпонентную коллоидную систему и характеризующиеся большой изменчивостью свойств под действием природно-климатических и техногенных факторов [1, 2].

На основании вышеизложенного одной из актуальных задач является внедрение инновационных технологий в строительстве, которые обеспечивают улучшение физико-механических свойств дисперсных грунтов, залегающих в основании дорог и инженерных коммуникаций. Кроме того, следует отметить, что одними из приоритетных направлений в мировой науке являются создание строительных материалов на основе нетрадиционных композицион-

ных вяжущих, различных добавок, заменяющих часть традиционных вяжущих гидратационного типа твердения; рациональное природопользование; внедрение новых экологически чистых «зеленых» и устойчивых материалов; рециклинг, что способствует сокращению стоимости и сроков строительства, повышению долговечности конструкций и уменьшению нагрузки на окружающую природную среду.

Существуют различные способы укрепления и стабилизации грунтов. В настоящее время наиболее широкое применение находят комбинированные физико-химические методы, заключающиеся в смешивании грунтов с вяжущими и/или активными добавками различного состава, позволяющими создавать структуры с заданными эксплуатационными характеристиками за счет образования физических и химических связей между частицами грунта [3–7]. При этом с точки зрения терминологии [8] грунты, укрепленные за счет использования в качестве добавок вяжущих, способных к твердению по различным механизмам, называют цементогрунты, грунтобетоны. Таким образом, грунтобетон представляет собой смесь, состоящую из органоминерального (гибридного) связующего с модифицирующими добавками различной природы, наполнителем в которых являются дисперсные частицы грунта [9–11].

Предварительные исследования, представленные в работах [12, 13], показали целесообразность использования добавки на основе глиоксала для укрепления алюмосиликатных (песчаных и глинистых) грунтов оснований дорог и инженерных коммуникаций. Для обеспечения равномерной полимеризации глиоксала в объемной фазе песчаного грунта и достижения оптимальной влажности и требуемой подвижности реакционной системы в состав добавки входит гидрофильный сорбент – сапонитсодержащий материал (ССМ). Модификация песчаного грунта органоминеральной добавкой оптимального состава, созданной на основе композиции глиок-

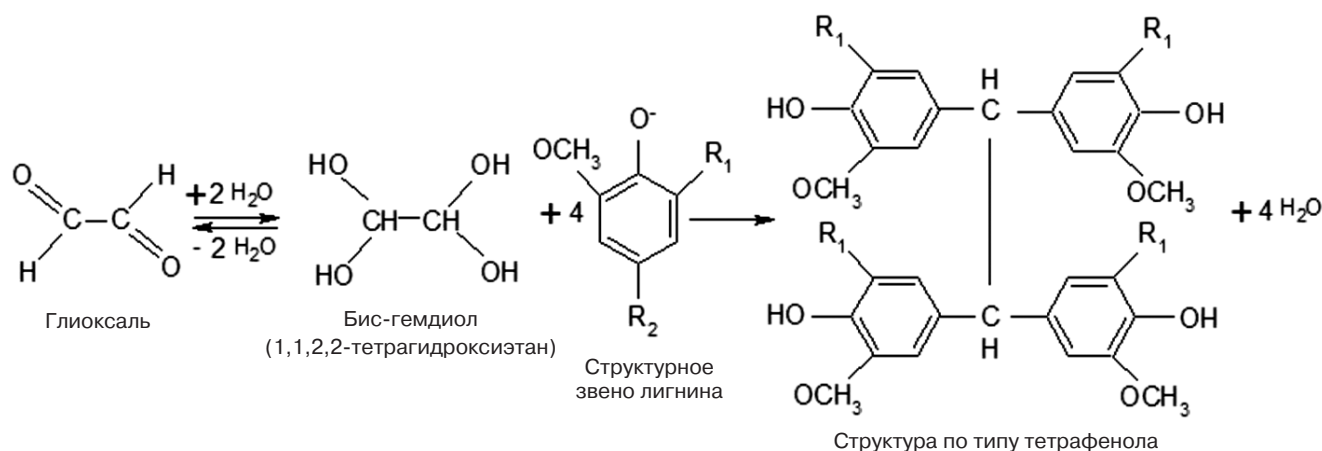


Рис. 1. Схема образования межмолекулярной связи в макромолекуле лигнина: R_1-H , OCH_3 ; R_2-H , $C-C$ связь, карбонильные, карбоксильные и спиртовые группы

Fig. 1. Scheme of the formation of an intermolecular bond in a lignin macromolecule: R_1-H , OCH_3 ; R_2-H , $C-C$ bond, carbonyl, carboxyl and alcohol groups

саль-сапонитсодержащий материал, повышает его удельное сцепление в 50 раз. Разработаны оптимальные составы органической добавки для модельных алюмосиликатных грунтов с разным числом пластичности. Установлено, что для песчано-глинистых грунтов, независимо от числа пластичности, оптимальное количество глиоксаля составляет 0,52% от массы грунта.

Для создания устойчивой к внешним температурно-влажностным воздействиям периодической коллоидной структуры (ПКС) в состав добавки вводят тонкодисперсную древесную кору, механизм действия которой заключается в образовании производных гидрофобных структур по типу тетрафенола путем топохимического взаимодействия глиоксаля с поверхностно-активными лигнинными веществами предварительно механоактивированной коры. Установлено, что реакция поликонденсации имеет отрицательный (минус первый) порядок по глиоксалу, это подтверждает выдвинутую рабочую гипотезу о механизме структурообразования в системе глиоксаль-кора: в элементарном акте взаимодействия глиоксаля со структурными единицами макромолекулы лигнина участвует одна молекула глиоксаля (рис. 1). Отрицательный порядок по глиоксалу, по нашему мнению, может быть связан с тем, что лимитирующей стадией реакции является стадия, протекающая в диффузионной области. В этом случае свободные реакционные центры поверхности растительного компонента смеси блокируются продуктами первичного взаимодействия, что и вызывает замедление процесса, несмотря на увеличение концентрации глиоксаля [14].

Доказано, что поверхностное натяжение твердой фазы реакционной системы, определяемое методом ОВРК (Оунса-Вендта-Рабеля-Кьельбле) [15–19], можно рекомендовать для характеристики процесса структурообразования при оптимизации состава органоминерального композита, а поляризационная составляющая поверхностного натяжения может быть использована в качестве основного информа-

ционного параметра для кинетического описания гетерогенных процессов.

Разработанную композицию на основе песка, сапонитсодержащего материала, глиоксаля и тонкодисперсной коры, по мнению авторов, можно рассматривать как модель грунтобетона на основе полимер-органического связующего, где в качестве нетрадиционного вяжущего вещества выступает система механоактивированная кора-глиоксаль, а в качестве наполнителя смесь полиминерального песка и сапонитсодержащего материала, характеризующаяся количественным варьированием последнего и обеспечивающая создание модельной системы глинистого грунта с заданным числом пластичности. Применение данного подхода обусловлено тем, что рассматриваемая композиция представляет собой гетерогенную дисперсную систему, состоящую из дисперсной фазы – порошковые компоненты (песок, ССМ, кора) и дисперсионной среды – жидкость затворения (водный раствор глиоксаля). Составляющие данной системы самопроизвольно вступают в физико-химическое взаимодействие, в результате чего имеет место постепенный переход от пластичного к твердообразному состоянию, которое характеризуется образованием периодической коллоидной структуры, устойчивой к внешним температурно-влажностным воздействиям.

Несмотря на установление кинетических закономерностей физико-химических превращений в системе глиоксаль-гваяцилпропановые структурные единицы лигнина механоактивированной коры, отсутствует оценка вклада основных параметров топохимического взаимодействия (реакционноактивная поверхность, концентрация глиоксаля) в структурообразующие свойства полимер-органического связующего и не определено влияние рецептурных и технологических факторов на свойства конечного композита. Данные факты не позволяют разработать принципы управления процессами получения грунтобетона с заданными эксплуатационными характеристиками.

Вместе с тем в настоящее время предложена научно обоснованная методология оценки вклада химических и физико-химических факторов в структурообразование сложных систем, предназначенная для выявления максимально возможного синергетического эффекта и определения диапазонов варьирования рецептурных параметров [20]. Данный подход основан на определении интенсивности влияния на структурно-чувствительные свойства композита химических и физико-химических факторов при их переменных значениях.

Исходя из установленных кинетических закономерностей и выдвинутой гипотезы о механизме взаимодействия в системе глиоксаль–кора, для характеристики влияния химического фактора было выбрано количество глиоксаля, выраженное через отношение поляризационной составляющей поверхностного натяжения системы глиоксаль–кора после завершения реакции поликонденсации к начальной концентрации глиоксаля; для физико-химического фактора – количество активных центров, выраженное через удельную площадь поверхности механоактивированной коры. В качестве структурно-чувствительных свойств были выбраны эксплуатационные характеристики конечного композита (прочность при сжатии и влагостойкость, характеризуемая условным коэффициентом размягчения).

Математическая модель данного подхода основывается на следующих выражениях [20]. Интенсивность влияния выбранных факторов на структурно-чувствительные свойства композита характеризуется уравнением:

$$F = I_{fh}^n I_{ff}^m, \quad (1)$$

где F – структурно-чувствительное свойство; I_{fh} и I_{ff} – величины, характеризующие влияние химического и физико-химического факторов соответственно; n и m – показатели степени, показывающие интенсивность влияния указанных факторов.

Для практических расчетов по [20] целесообразнее использовать относительное изменение рассматриваемых факторов:

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{I_{fh}}{I_{fh,0}}\right)^n \left(\frac{I_{ff}}{I_{ff,0}}\right)^m. \quad (2)$$

Приведем к общему знаменателю:

$$\ln\left(\frac{F_i}{F_0}\right) = \frac{n \ln\left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right) + \ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right) - n \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)}. \quad (9)$$

Отсюда n будет равно:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{F_i}{F_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right) - \ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right) - \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) \cdot \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)}. \quad (10)$$

Несмотря на уже доказанную эффективность применения данного подхода для оптимизации состава сложных гетерогенных минеральных систем, считаем необходимым в данной работе привести результаты пошаговых преобразований этой математической модели, что, по мнению авторов, должно послужить ее внедрению в материаловедческую практику. Так, для расчета показателей степени n и m необходимо решить систему из двух уравнений (3), (4):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{F_i}{F_0} &= \left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right)^n \left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)^m; \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{F_{i+1}}{F_0} &= \left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right)^n \left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)^m, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где i – порядковый номер эксперимента, в котором одновременно изменяются химический и физико-химический факторы; 0 – индекс, обозначающий номер эксперимента, принимаемого за начальное состояние системы (начальные значения факторов).

После логарифмирования выражения (4) получим:

$$\ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) = n \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) + m \ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right), \quad (5)$$

тогда из уравнения (5) показатель m :

$$m = \frac{\left[\ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) - n \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) \right]}{\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)}. \quad (6)$$

Чтобы получить математическое выражение для расчета показателя n , прологарифмируем выражение (3):

$$\ln\left(\frac{F_i}{F_0}\right) = n \ln\left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right) + m \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right). \quad (7)$$

Подставляя в уравнение (7) выражение (6), получаем:

$$\ln\left(\frac{F_i}{F_0}\right) = n \ln\left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right) + \frac{\left[\ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) - n \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) \right]}{\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)} \ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right). \quad (8)$$

Таблица 1
Table 1Параметры диспергирования
Dispersion parameters

№ пробы	Размольный стакан, объем, мл	Размольные тела, диаметр, мм/количество, шт.	Скорость вращения ротора, об/мин	Продолжительность помола, мин
1	500	Нержавеющая сталь 20/18	420	10
2	500	Нержавеющая сталь 20/18	420	10
	50	Нержавеющая сталь 5/150	420	20
3	500	Нержавеющая сталь 20/18	420	20
	50	Нержавеющая сталь 5/150	420	30

Преобразуем выражение (10), разделив числитель и знаменатель полученной дроби на $\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)$:

$$n = \left[\ln\left(\frac{F_i}{F_0}\right) - \ln\left(\frac{F_{i+1}}{F_0}\right) \frac{\ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)} \right] \cdot \left[\ln\left(\frac{I_{fh,i}}{I_{fh,0}}\right) - \ln\left(\frac{I_{fh,i+1}}{I_{fh,0}}\right) \frac{\ln\left(\frac{I_{ff,i}}{I_{ff,0}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{ff,i+1}}{I_{ff,0}}\right)} \right]^{-1} \quad (11)$$

Для установления наличия синергетического эффекта должно выполняться следующее условие [20]:

$$K_{syn} = (-1)^j \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N (|m_i| \cdot |n_i|)} > 0, \quad (12)$$

где N – количество структурно-чувствительных свойств; j – индекс, учитывающий наличие $m < 0$ или $n < 0$:

- при $m < 0$ или $n < 0$ значение $j = 1$;
- при $m > 0$ и $n > 0$ значение $j = 0$.

Целью исследования, представленного в данной работе, являлась апробация приведенного выше подхода для оценки влияния химического и физико-химического факторов на структурообразование полимер-органического связующего.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования были выбраны 40%-ный водный раствор глиоксаля (производитель ООО «Новохим», г. Томск); кора сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L).

Кору сосны предварительно доводили до постоянной массы при температуре 40°C для повышения размолоспособности и сохранения исходного химического состава и свойств коры. Для активации поверхностных центров лигнина было произведено сухое механическое диспергирование коры на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100. Параметры диспергирования были приняты опытным путем для достижения тонкодисперсного состояния (табл. 1).

Для определения размера частиц применяли метод фотонно-корреляционной спектроскопии, реа-

лизуемый на анализаторе субмикронных частиц Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers. В качестве рабочей жидкости использовали четыреххлористый углерод для исключения процессов набухания коры. Удельную площадь поверхности измеряли методом газопроницаемости Козени–Кармана на автоматизированном приборе ПСХ-10а.

Для определения поверхностного натяжения, прочности при сжатии и влагостойкости изготавливали образцы-кубы размером 0,02×0,02×0,02 м из смеси тонкодисперсной коры с различным содержанием глиоксаля (0,16–0,5 кмоль/м³). Количество водной фазы (В) принимали одинаковым для всех составов исходя из удельного водопоглощения коры (К) (В/К=1,8). После достижения однородности и требуемой подвижности смесь укладывали в формы слоями высотой 1–2 мм. Каждый слой уплотняли штыкованием равномерно по спирали от краев формы к ее середине. После окончания укладки и уплотнения смеси верхнюю поверхность образцов заглаживали металлической пластинкой. Образцы выдерживали в естественных условиях при температуре 25±2°C и относительной влажности воздуха 60±2% в течение 2 сут. Затем их расплаубливали и продолжали хранить в естественных условиях до завершения процесса поликонденсации глиоксаля, который контролировали путем измерения массы образцов. В качестве критерия окончания реакции поликонденсации было принято достижение постоянной массы.

Определение краевого угла смачивания выполняли на автоматической установке DataPhysics OCA 35. В качестве рабочих жидкостей использовали этиленгликоль, глицерин, декан, воду. После завершения серии экспериментов, заключающихся в обязательном проведении трех параллельных измерений, строили соответствующие функциональные зависимости и рассчитывали поляризирующую составляющую поверхностного натяжения для каждого состава.

Влагостойкость оценивали с помощью условного коэффициента размягчения:

$$K_p = \frac{R_{вл}}{R_{сух}}, \quad (13)$$

где $R_{вл}$ и $R_{сух}$ – предел прочности при сжатии соответственно влагонасыщенного (опытного) и сухого (контрольного) образцов материала, Па.

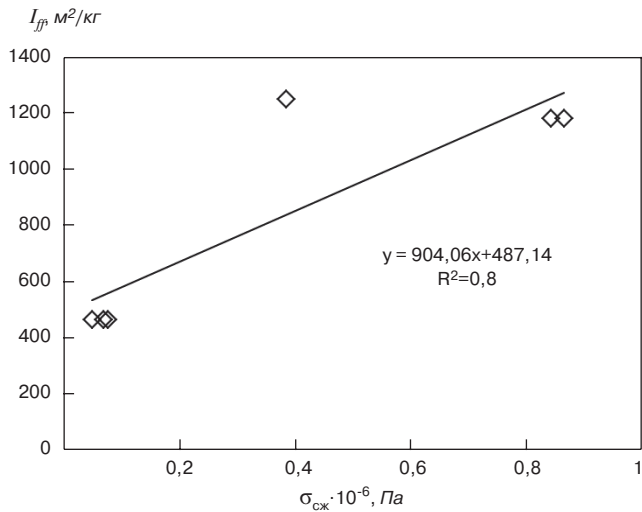


Рис. 2. Влияние физико-химического фактора на прочность при сжатии
Fig. 2. The influence of physicochemical factor on compressive strength

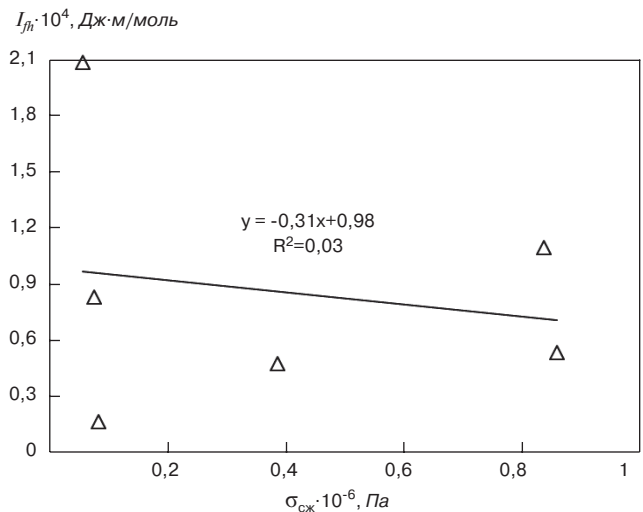


Рис. 3. Влияние химического фактора на прочность при сжатии
Fig. 3. The influence of chemical factor on compressive strength

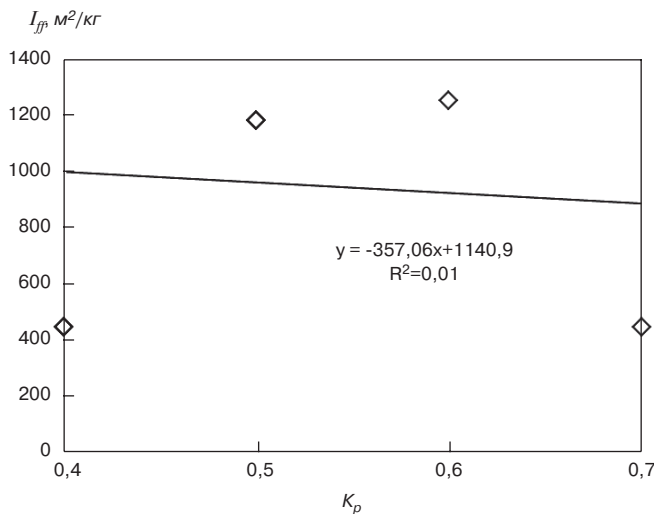


Рис. 4. Влияние физико-химического фактора на влагостойкость
Fig. 4. The influence of physicochemical factor on moisture resistance

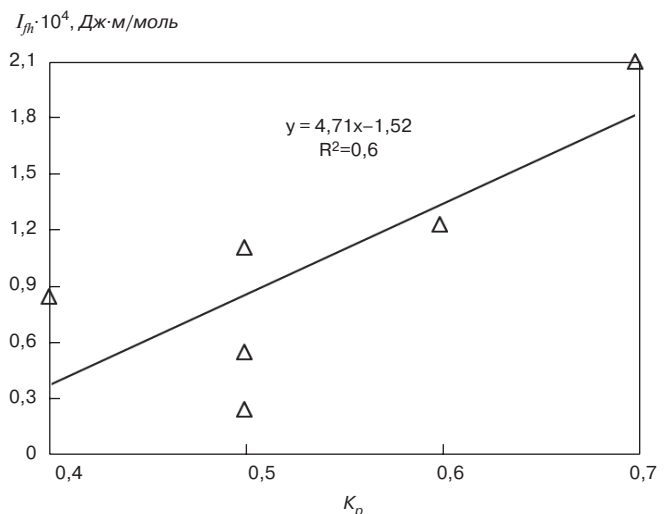


Рис. 5. Влияние химического фактора на влагостойкость
Fig. 5. The influence of chemical factor on moisture resistance

Для определения условного коэффициента размягчения контрольные образцы выдерживали в естественных условиях (температура $25 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $60 \pm 2\%$), опытные – во влажных условиях в эксикаторе. Через разные промежутки времени (2; 5; 6; 7; 8 сут) определяли размеры, массу и влажность образцов. Процесс влагопоглощения считался завершенным после достижения образцами постоянной массы.

Прочность на сжатие контрольных и опытных образцов определяли на универсальной настольной испытательной машине AGS-5kNX SHIMADZU. По завершении серии экспериментов, состоящих из трех параллельных измерений, рассчитывали среднее значение максимального напряжения при сжатии и условный коэффициент размягчения.

Определив значения физико-химического и химического факторов и структурно-чувствительных свойств, оценивали интенсивность влияния указанных параметров на структуру и свойства полимерорганического связующего. В расчете показателей

n и m в соответствии с формулами (6) и (11) участвуют значения факторов для трех различных составов (0, i , $(i+1)$). Исходя из классических законов комбинаторики максимально возможное количество различных комбинаций из 9 составов равно 84. Однако не все сочетания удовлетворяют основному условию возникновения синергетического эффекта, связанному с одновременным изменением и химического, и физико-химического факторов. Основываясь на данном положении, были выбраны 27 сочетаний. Для этой выборки рассчитали показатели интенсивности по формулам (6), (11), синергетический эффект для каждого из исследуемых структурно-чувствительных свойств и величина суммарного синергетического эффекта по формуле (12).

Результаты исследований

Средний размер частиц коры составил для пробы № 1 – 4,3 мкм; для пробы № 2 – 3,7 мкм; для пробы № 3 – 2,7 мкм. Гранулометрический анализ коры,

Таблица 2
Table 2Значения физико-химического и химического факторов и структурно-чувствительных свойств
Physicochemical and chemical factors and structure-sensitive properties

№	Начальная концентрация глиоксаля, $C_0 \cdot 10^{-3}$ моль/м ³	Поляризационная составляющая поверхностного натяжения σ_s^P , Дж/м ²	Физико-химический фактор I_{ff}	Химический фактор $I_{fh} \cdot 10^4$, Дж·м/моль	Структурно-чувствительное свойство F	
			Удельная площадь поверхности $S_{уд}$, м ² /кг		Прочность при сжатии $\sigma_{сж} \cdot 10^{-6}$, Па	Влагостойкость – условный коэффициент размягчения K_p
1	0,25	0,02	465	0,83	0,07	0,4
2	0,16	0,033		2,06	0,05	0,7
3	0,48	0,009		0,18	0,078	0,8
4	0,25	0,013	1176	0,54	0,864	0,5
5	0,16	0,017		1,09	0,842	0,5
6	0,48	0,011		0,24	1,029	0,5
7	0,25	0,029	1245	1,21	0,517	0,6
8	0,16	0,032		2,01	0,484	0,5
9	0,48	0,023		0,48	0,385	0*

Примечание. * Образец разрушился под воздействием влаги.

проведенный на анализаторе Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers, показал, что образцы являются тонкодисперсной системой (10^{-5} – 10^{-7} м), на поверхности частиц которой содержится лигнин с активными реакционными группами.

Полученные значения физико-химического и химического факторов и структурно-чувствительных свойств представлены в табл. 2. Интенсивность влияния указанных факторов на процесс структурообразования полимер-органического связующего и выявленный синергетический эффект для выбранных сочетаний представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что значения n и m изменяются в достаточно широком диапазоне: $n = -11, 17 - 53, 99$; $m = -101, 71 - 46, 36$. При этом синергетический эффект, рассчитанный отдельно для каждого структурно-чувствительного свойства, наблюдается только в некоторых сочетаниях: значения $K_{syn}^{(1)} > 0$, $K_{syn}^{(2)} > 0$. Суммарный синергетический эффект, учитывающий комплексное влияние химического и физико-химического факторов на эксплуатационные характеристики композита, не возникает во всех сочетаниях: значения $K_{syn} < 0$.

Для наглядного представления полученных экспериментальных данных, оценки комплексного влияния химического и физико-химического факторов на структурно-чувствительные свойства были построены линейные функциональные зависимости для сочетаний, в которых наблюдается синергетический эффект ($K_{syn}^{(1)} > 0$, $K_{syn}^{(2)} > 0$) (рис. 2–5). Тангенс угла наклона прямой характеризует интенсивность влияния фактора на структурно-чувствительное свойство.

Данные, приведенные на рис. 2–5, показали, что наибольшие коэффициенты достоверности аппроксимации характерны для функциональных зависимостей влияния физико-химического фактора на

прочность ($R=0,9$) и химического фактора на влагостойкость ($R=0,8$).

Так как физико-химический фактор представляет собой удельную площадь поверхности, следовательно, определяющим параметром, обеспечивающим прочность композита, является развитость поверхности, активные центры которой участвуют в структурообразовании. Кроме того, с возрастанием удельной площади поверхности увеличивается плотность упаковки частиц, тем самым улучшается взаимодействие между компонентами системы и повышаются прочностные характеристики материала.

Влагостойкость композита также связана с химическим взаимодействием активных центров поверхностных макромолекул лигнина с органическим субстратом. Усиление такого взаимодействия при увеличении концентрации глиоксаля в системе характеризует уменьшение величины поляризационной составляющей поверхностного натяжения (табл. 2). Кроме того, на влагостойкость композита в этом случае оказывает влияние процесс смачивания и быстрой пропитки поверхности жидкостью затворения. Так, исследование поверхностно-активных свойств водных растворов глиоксаля показало, что данное вещество относится к ПАВ [21], понижающим поверхностное натяжение растворителя (воды), увеличивая тем самым глубину проникновения связующего вещества в объем порового пространства твердой фазы (коры).

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Адаптирована методика определения синергетического эффекта влияния различных факторов на структурно-чувствительные свойства полимер-органического связующего на основе глиоксаля и тонкодисперсной коры для получения грунтобетон

Таблица 3
Table 3Интенсивность влияния химического и физико-химического факторов и синергетический эффект
The intensity of the impact of chemical and physicochemical factors and synergistic effect

Вариант сочетания	Интенсивность влияния химического и физико-химического факторов и синергетический эффект для структурно-чувствительных свойств						Величина суммарного синергетического эффекта K_{syn}
	Прочность при сжатии			Влагостойкость			
	n	m	$K_{syn}^{(1)}$	n	m	$K_{syn}^{(2)}$	
1-4-7	-0,81	2,34	-1,9	0,15	0,35	0,05	-0,32
1-4-8	-0,55	2,46	-1,35	-0,07	0,24	-0,02	-0,15
1-4-9	10,81	7,64	82,58	–	–	–	–
1-5-7	-7,82	5,01	-39,15	1,04	0,01	0,01	-0,64
1-5-8	-1,19	3,04	-3,62	-0,23	0,39	-0,09	-0,57
1-5-9	1,13	2,35	2,65	–	–	–	–
1-6-7	-0,5	2,22	-1,12	0,11	0,36	0,04	-0,21
1-6-8	-0,42	2,34	-0,97	-0,02	0,19	-0,003	-0,06
1-6-9	-1,46	0,94	-1,36	–	–	–	–
2-4-7	-0,78	1,95	-1,53	0,19	-0,13	-0,02	-0,19
2-4-8	-0,54	2,29	-1,25	-0,04	-0,46	-0,02	-0,15
2-4-9	30,07	46,36	1394,25	–	–	–	–
2-5-7	-4,78	-0,23	-1,12	0,9	0,26	0,23	-0,51
2-5-8	-1,12	2,28	-2,55	-0,15	-0,46	-0,07	-0,42
2-5-9	1,24	3,89	4,82	–	–	–	–
2-6-7	-0,5	2,1	-1,05	0,13	-0,16	-0,02	-0,15
2-6-8	-0,41	2,3	-0,95	0,001	-0,46	-0,0002	-0,02
2-6-9	-1,38	0,03	-0,05	–	–	–	–
3-4-7	-0,91	3,66	-3,33	0,24	-0,8	-0,19	-0,8
3-4-8	-0,59	3,29	-1,93	-0,04	-0,47	-0,02	-0,19
3-4-9	5,23	-3,57	-18,64	–	–	–	–
3-5-7	53,99	-101,71	-5491,11	-11,17	21,09	-235,49	-1137,37
3-5-8	-1,4	5,27	-7,39	-0,19	-0,12	-0,02	-0,41
3-5-9	1,01	0,62	0,63	–	–	–	–
3-6-7	-0,53	2,93	-1,55	0,15	-0,62	-0,09	-0,38
3-6-8	-0,43	2,91	-1,25	0,004	-0,58	-0,002	-0,05
3-6-9	-1,64	3,25	-5,35	–	–	–	–

Примечание. Выделены сочетания, в которых наблюдается синергетический эффект.

с управляемыми свойствами. Предложено для оценки вклада химических и физико-химических факторов в структурообразование использовать: количество глиоксаля, выраженное через отношение поляризационной составляющей поверхностного натяжения системы глиоксаль–кора после завершения реакции поликонденсации к начальной концентрации глиоксаля (химический фактор); количество активных центров, выраженное через удельную площадь поверхности механоактивированной коры (фи-

зико-химический фактор). Установлено, что на прочность при сжатии наибольшее влияние оказывает физико-химический фактор, а на влагостойкость – химический фактор.

2. Получение грунтобетона с требуемыми прочностными характеристиками должно осуществляться путем контроля удельной площади поверхности механоактивированной коры, а достижение заданной степени влагостойкости – за счет варьирования концентрации глиоксаля.

Список литературы

1. Мурашова Е.Г., Кисель Е.К. Инженерно-геологические свойства глинистых грунтов. *Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: Материалы*

References

1. Murashova E.G., Kissel E.K. Engineering-geological properties of clayey soils. *Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land planning and cadastres at the beginning of the III-rd millennium: Materials of the V-th*

- V Международной научно-практической конференции.* Комсомольск-на-Амуре, 2018. С. 157–160.
2. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Кальбергенов Р.Г., Кутергин В.Н., Румянцева Н.А. Реологические свойства глинистых грунтов // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* 2017. № 6. С. 41–51.
 3. Pourakbar S., Huat B. A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils. *International Journal of Geotechnical Engineering.* 2017. Vol. 11. No. 2, pp. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>
 4. Rahgozar M., Saberian M., Li J. Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study // *Transportation Geotechnics.* 2018. Vol. 14, pp. 52–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.09.004>
 5. Firoozi A., Guney Olgun C., Firoozi A., Baghini M. Fundamentals of soil stabilization // *International Journal of Geo-Engineering.* 2017. Vol. 8. No. 26, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
 6. Худайкулов Р.М., Мирзаев Т.Л. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог // *Транспортные сооружения.* 2019. Т. 6. № 1. С. 12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/14SAT5119>
 7. Лазоренко Г.И. Технологии стабилизации глинистых грунтов с применением наноматериалов // *Инженерный вестник Дона.* 2018. № 1 (48). С. 107.
 8. Безродных А.А., Нелюбова В.В., Строкова В.В., Беляев А.В., Дмитриева Т.В. Терминологические аспекты укрепления грунтов. *Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ.* Архангельск, 2019. С. 66–68.
 9. Безродных А.А., Дмитриева Т.В. Опыт применения грунтобетонов в дорожном строительстве. *Инновационные материалы и технологии в дизайне: Тезисы докладов V Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых.* СПб., 2019. С. 84–85.
 10. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Черногиль В.Б. Изучение физико-механических характеристик различных видов грунта, укрепленного отходами клинкерного производства // *Строительные материалы и изделия.* 2018. Т. 1. № 3. С. 43–50.
 11. Дмитриева Т.В., Куцына Н.П., Безродных А.А., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Эффективность укрепления техногенного грунта минеральными модификаторами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2019. № 7. С. 14–23. DOI: https://doi.org/10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159
- International scientific and practical conference.* Komsomolsk-on-Amur. 2018. pp. 157–160. (In Russian).
2. Osipov V.I., Karpenko F.S., Kalbergenov R.G., Kutergin V.N., Rummyantseva N.A. Rheological properties of the clay soils. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Hidrogeologiya, Geokriologiya.* 2017. No. 6, pp. 41–51. (In Russian).
 3. Pourakbar S., Huat B. A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils. *International Journal of Geotechnical Engineering.* 2017. Vol. 11. No. 2, pp. 206–216. DOI: <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>
 4. Rahgozar M., Saberian M., Li J. Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics.* 2018. Vol. 14, pp. 52–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.09.004>
 5. Firoozi A., Guney Olgun C., Firoozi A., Baghini M. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering.* 2017. Vol. 8. No. 26, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
 6. Hudaykulov R.M., Mirzayev T.L. The use of stabilizers to improve the strength of the soil foundation of roads. *Transportnye Sooruzheniya.* 2019. Vol. 6. No. 1, pp. 12. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/14SAT5119>
 7. Lazorenko G.I. Technologies for stabilizing clay soils using nanomaterials. *Inzhenernyi Vestnik Dona.* 2018. No. 1 (48), pp. 107. (In Russian).
 8. Bezrodnykh A.A., Nelyubova V.V., Strokova V.V., Belyaev A.V., Dmitrieva T.V. Terminological aspects of soils reinforcement. *Engineering tasks: problems and solutions: Papers of the All-Russian (national) scientific-practical conference of the Higher School of Engineering in NarFU.* Arkhangelsk. 2019, pp. 66–68. (In Russian).
 9. Bezrodnykh A.A., Dmitrieva T.V. The use of soil concrete in road construction. *Innovative materials and technologies in design: Abstracts of the V-th All-Russian scientific-practical conference with the participation of young people.* St. Petersburg. 2019. pp. 84–85. (In Russian).
 10. Trautvain A.I., Akimov A.E., Chernogil V.B. Study of physical and mechanical characteristics of various types of soil strengthened by clinker waste. *Stroitel'nye Materialy i Izdeliya.* 2018. Vol. 1. No. 3, pp. 43–50. (In Russian).
 11. Dmitrieva T.V., Kucyna N.P., Bezrodnykh A.A., Strokova V.V., Markova I.Yu. Efficiency of reinforcement of technological soil by mineral modifiers. *Vestnik Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta im. V.G. Shukhova.* 2019. No. 7, pp. 14–23. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.34031/article_5d14bdcc8eca43.21244159

12. Гайда Ю.В., Айзенштадт А.М., Мальков В.С., Фомченков М.А. Органическое минеральное добавка для укрепления песчаных грунтов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 11. С. 25–29.
13. Соколова Ю.В., Айзенштадт А.М. Оценка дисперсионного взаимодействия в алюмосиликатной системе под действием органической добавки // *Физика и химия обработки материалов*. 2017. № 4. С. 83–88.
14. Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Strokovaya V.V. Kinetic description of heterogeneous processes using surface tension as an information parameter // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. Iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077054>
15. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72>
16. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding // *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. Iss. 3, pp. 507–515. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23609>
17. Sun X., Mei C., French A.D., Wang Y., Wu Q. Surface wetting behavior of nanocellulose-based composite films // *Cellulose*. 2018. Vol. 25. No. 9, pp. 5071–5087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1927-8>
18. Wang C., Xian Y., Smith L.M., Cheng H., Zhang S. Interfacial properties of bamboo fiber-reinforced high-density polyethylene composites by different methods for adding nano calcium carbonate // *Polymers*. 2017. Vol. 9. No. 11, pp. 587. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym9110587>
19. Покровская Е.Н., Портнов Ф.А. Термодинамическая оптимизация модификаторов поверхностного слоя древесины // *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 5. С. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.05.29-36>
20. Гусев Б.В., Гришина А.Н., Королев Е.В. Особенности структурообразования гипсового вяжущего, модифицированного гидросиликатами цинка // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 2. С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.02.40-46>
21. Gayda J.V., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Organic-Mineral Aggregate for Sandy Subsoil Strengthening. *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics: Procedia Engineering, Advances in Transportation Geotechnics 3*. Guimaraes. 2016. Vol. 143, pp. 90–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.012>
12. Gayda Yu.V., Ayzenshtadt A.M., Malkov V.S., Fomchenkov M.A. Organic mineral additive for strengthening sandy soils. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2015. No. 11, pp. 25–29. (In Russian).
13. Sokolova Yu.V., Ayzenshtadt A.M. Evaluation of dispersion interaction in aluminum silicate system under the influence of organic additive. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 2017. No. 4, pp. 83–88. (In Russian).
14. Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Strokovaya V.V. Kinetic description of heterogeneous processes using surface tension as an information parameter. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. Iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077054>
15. Danilov V.E., Korolev E.V., Aizenshtadt A.M., Strokovaya V.V. Features of the calculation of free energy of the surface based on the model for interfacial interaction of Owens–Wendt–Rabel–Kaelble. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 11, pp. 66–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72>
16. Ariawan D., Mohd Ishak Z.A., Salim M.S., Mat Taib R., Ahmad Thirmizir M.Z. Wettability and interfacial characterization of alkaline treated kenaf fiber-unsaturated polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. Iss. 3, pp. 507–515. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23609>
17. Sun X., Mei C., French A.D., Wang Y., Wu Q. Surface wetting behavior of nanocellulose-based composite films. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. No. 9, pp. 5071–5087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1927-8>
18. Wang C., Xian Y., Smith L.M., Cheng H., Zhang S. Interfacial properties of bamboo fiber-reinforced high-density polyethylene composites by different methods for adding nano calcium carbonate. *Polymers*. 2017. Vol. 9. No. 11, pp. 587. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym9110587>
19. Pokrovskaya E.N., Portnov F.A. Thermodynamic optimization of modifiers of the surface layer of wood. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2017. Vol. 26. No. 5, pp. 29–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.05.29-36>
20. Gusev B.V., Grishina A.N., Korolev E.V. Characteristics of the structure formation of gypsum binder modified with zinc hydrosilicates. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. No. 2, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.02.40-46>
21. Gayda J.V., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Organic-Mineral Aggregate for Sandy Subsoil Strengthening. *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics: Procedia Engineering, Advances in Transportation Geotechnics 3*. Guimaraes. 2016. Vol. 143, pp. 90–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.012>

УДК 693.25

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-37-43>

М.К. ИЩУК, канд. техн. наук (kamkon@yandex.ru), Х.А. АЙЗЯТУЛЛИН, магистр (halit915@mail.ru),
 О.К. ГОГУА, канд. техн. наук (gok56@mail.ru)

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК),
 АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6)

Исследования связей из полимерных композитных сеток для трехслойной кладки

Приведены результаты экспериментальных исследований гибких связей из стеклокомпозитных сеток. Испытания проводились по ранее разработанной авторами методике. Определена прочность связей на вырыв из растворного шва, получены коэффициенты неравномерного включения в работу стержней в составе сеток, выявлены особенности работы сеток в качестве гибких связей. Получены графики перемещений отдельно в узлах анкеровки связей в растворные швы и между слоями кладки. Рассматривалось два вида предельного состояния – по несущей способности и допускаемым по условиям эксплуатации перемещениям. Показано, что оба вида исследованных связей удовлетворяют этим критериям. Результаты исследований использованы для получения обобщенных данных по гибким связям в многослойных каменных стенах, в том числе сеток из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: надежность, долговечность, сетка из полимерных композитных материалов, кирпичная кладка, трехслойные стены с гибкими связями, прочность на вырыв, деформации связи и узла анкеровки в растворный шов, неравномерность включения в работу связей.

Для цитирования: Ищук М.К., Айзятуллин Х.А., Гогуга О.К. Исследования связей из полимерных композитных сеток для трехслойной кладки // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-37-43>

M.K. ISHCHUK, Candidate of Sciences (Engineering) (kamkon@yandex.ru); Kh.A. AIZYATULLIN, Master (halit915@mail.ru);

O.K. GOGUA, Candidate of Sciences (Engineering) (gok56@mail.ru).

Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko (TSNIISK) JSC Research Center of Construction (6, 2-nd Institutskaya Street, Moscow 109428, Russian Federation)

Research of Ties from Polymer Composite Meshes for Three-Layer Masonry

The article presents the results of experimental studies of flexible ties made of polymer composite materials in the form of meshes used in masonry. The tests were carried out according to the method developed earlier by the authors. Determined the strength of the ties pulled out from the mortar joint, obtained the coefficients of the nonuniform switching of the cores in the composition of meshes, the features of meshes work as flexible ties. The graphs of movements separately in the anchorage nodes of connections in the mortar ties and between the layers of masonry are obtained. Two types of limit states were considered – for the load-bearing capacity and permissible movements under operating conditions. It is shown that both types of studied ties meet these criteria. The research data will be used to obtain generalized data on flexible ties in multilayer stone walls, including meshes made of polymer composite materials.

Keywords: a meshes made of polymer composite materials, brickwork, three-layer walls with flexible ties, strength to pull out, deformation of the connection and anchorage node in the mortar seam, uneven inclusion in the work of ties.

For citation: Ishchuk M.K., Aizyatullin Kh.A., Gogua O.K., Research of ties from polymer composite meshes for three-layer masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 37–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-37-43>

Исследования сеток, применяемых в качестве гибких связей многослойных наружных стен, носят ограниченный характер. Основное внимание уделяется исследованию одиночных (дискретных) связей [1–6 и др.].

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко на протяжении многих лет проводятся исследования работы гибких связей для многослойных наружных стен с лицевым слоем из каменной кладки из полимерных композитных материалов, выполняемых в виде как отдельных стержней [7–10], так и сеток [11 и др.]. Настоящая работа выполнена в развитие работ [12–14], где приведены результаты исследований в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева материала сеток и исследований в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко работы сеток на вырыв из растворных швов кладки.

В большинстве исследований работы гибких связей на вырыв из растворного шва измерение переме-

щений выполняется между зажимным устройством и стальными пластинами, установленными на поверхности кирпича. Реже измеряют перемещения связи относительно поверхности кирпича закрепленными непосредственно на связи приборами (рис. 1, 2) [5].

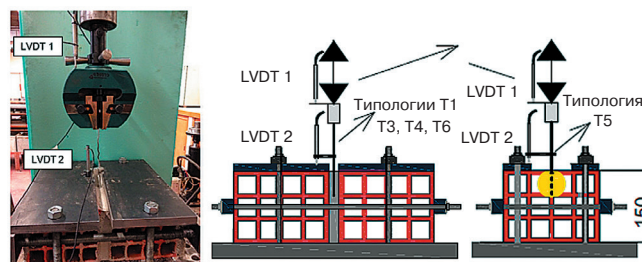


Рис. 1. Схема испытаний связи, установленной в растворный шов между двумя камнями, на выдергивание и сжатие [5]: LVDT-датчик перемещений

Fig. 1. Scheme of testing the tie installed in the mortar seam between two stones for pulling and compression [5]: LVDT-displacement sensor

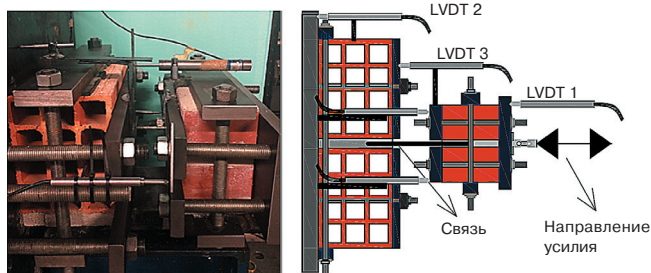


Рис. 2. Схема испытаний связи, установленной в растворные швы между двумя камнями и между двумя кирпичами, на выдергивание и сжатие [5]: LVDT-датчик перемещений
 Fig. 2. Scheme of testing the tie installed in the mortar joints between two blocks and between two bricks, for pulling and compression [5]: LVDT-displacement sensor

Методика проведения исследований

В лаборатории реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко отработана методика оценки жесткости узла анкеровки связи в растворный шов.

Производится измерение перемещений противоположно расположенных слоев кладки $e_{\text{стены}}$. Эти перемещения складываются из перемещений в двух узлах анкеровки связи $\Sigma e_{\text{уз}}$ и собственно материала связи $e_{\text{св}}$ на длине между слоями кладки:

$$e_{\text{стены}} = e_{\text{св}} + \Sigma e_{\text{уз}} \quad (1)$$

Для измерения $e_{\text{уз}}$ измерители перемещений (индикаторы часового типа) располагаются непосредственно на связи на некотором расстоянии от поверхности кирпича. При этом учитываются деформации самой связи на этой длине.

Перемещения за счет деформаций материала сетки равны разности суммарных перемещений $e_{\text{стены}}$ и перемещений в двух узлах анкеровки:

$$e_{\text{св}} = e_{\text{стены}} - \Sigma e_{\text{уз}} \quad (2)$$

Чтобы учитывать возможные эксцентриситеты приложения нагрузки, устанавливается по три индикатора на связи-стержни и по четыре на связи-сетки (рис. 3). С целью имитации нагрузки от веса вышележащей кладки образцы обжимались с помощью стальных обойм.

Нагрузка подается гидравлическим домкратом ступенями примерно по 1/10 предельной нагрузки с выдержкой на каждом этапе 3 мин.

Описание опытных образцов

В настоящей работе, как и в [12–14], образцы выполнялись из двух объединенных гибкой связью образцов-

«двоек», имитирующих два слоя ненесущей стены. Каждая «двойка» изготавливалась из двух половинок керамического пустотелого кирпича марки М150, соединенных между собой раствором толщиной 12 мм (рис. 1). Сетки заводились в шов на глубину 120 мм. Марка раствора – М150.

В качестве гибких связей использовали сетки двух видов.

Сетка стеклокомпозитная С1 – жесткая неплетеная, с соединением продольных и поперечных стержней в крестообразные соединения связующими на основе термоактивных смол (рис. 4, а). Ячейка 50×50 мм.

Сетка стеклокомпозитная С2 – жесткая плетеная, изготовленная с использованием связующего на основе терморезактивных смол с соединением плетения продольных (неполимеризованных) и поперечных (полимеризованных) стержней в крестообразные соединения и дальнейшей полимеризацией (рис. 4, б). Ячейка 50×50 мм.

Характеристики материала сеток подробно приведены в работах [12, 14]. Модуль упругости продольных нитей сеток составляет С1 46068 МПа и С2 49790 МПа; предельная нагрузка на разрыв одного продольного стержня соответственно 2,67 и 4,35 кН.

Данные сетки, как правило, выпускаются в виде рулонов. При раскатке рулона вдоль стены поперечные стержни сеток являются рабочими, когда они ис-



Рис. 3. Схема установки приборов для измерения перемещений [12, 14]
 Fig. 3. Diagram of installation of devices for measuring movements [12, 14]

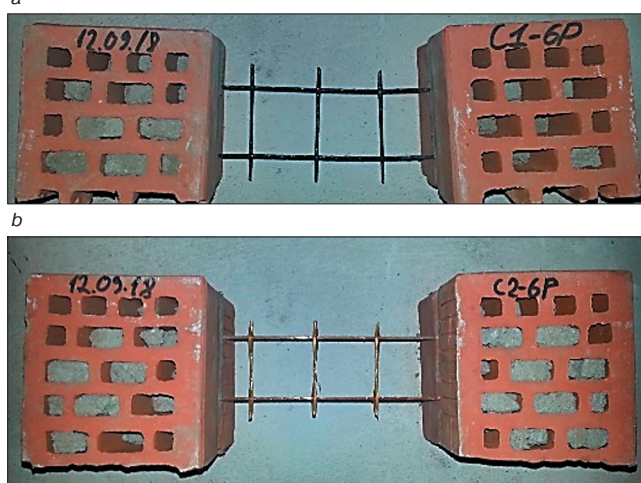
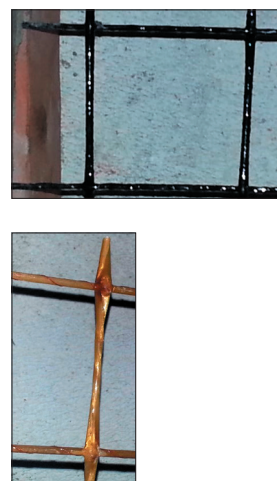


Рис. 4. Общий вид образцов до начала испытаний: а – образец серии С1.2; б – образец серии С2.2
 Fig. 4. General view of samples before testing: а – sample series S1.2; б – sample series S2.2



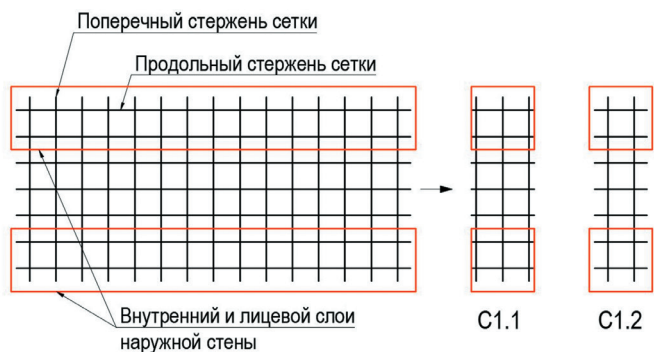


Рис. 5. Схемы испытываемых образцов связей
Fig. 5. Diagrams of the tested samples of connections

пользуются в качестве связей между слоями. Возможно комбинированное использование сеток одновременно для связи слоев и в качестве армирования кладки слоев. В последнем случае рабочими являются также и продольные стержни, воспринимающие растягивающие усилия, направленные вдоль стены.

В настоящей работе в качестве рабочих стержней для испытания связей были выбраны поперечные стержни сеток C1 и C2 (рис. 5).

Количество рабочих стержней в сетке новых образцов C1.2 принято равным двум, что отличает их от испытанных нами образцов C1.1, приведенных в работах [12, 14].

Общий вид образцов в установке для испытаний показан на рис. 6.

Результаты испытаний

В каждой из серий C1.2 и C2.2 с сетками с двумя продольными стержнями испытывалось по три образца. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Для сравнения приведены результаты испытаний сеток с тремя стержнями, описанными подробно в [12, 14]. В табл. 2 приведены расчетные значения усилий в одном стержне в составе сетки $N_{f,1}$ и соответствующие им перемещения между слоями кладки $e(N_{f,1})$.

Прочность связей-сеток на вырыв

В образцах серии C1.2 с сетками с двумя продольными стержнями и в аналогичных им образцах с такими же сетками, но с тремя продольными стержнями C1.1 [12, 14] предельное состояние наступало как от разрыва сеток, так и от вырыва из растворного шва (рис. 7, a).

В образцах серии C2.2 предельное состояние как в настоящем исследовании, так и в аналогичных образцах с сетками с тремя продольными стержнями C2.1 [12, 14] наступало преимущественно в результате вырыва стержней сетки из растворного шва (рис. 7, b).

Предельное усилие в одном стержне, вырезанном из сетки C1 $N_{f,ult,1}$, полученное из испытаний НИИЖБ [14], составило 2,67 кН.

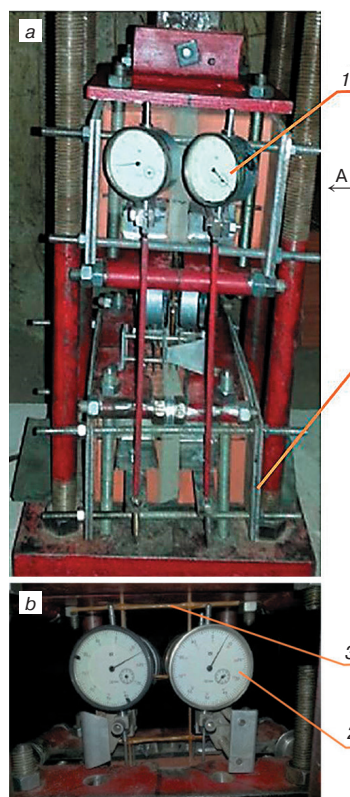


Рис. 6. Испытания на вырыв из растворного шва кладки гибких связей:
1 – индикатор часового типа, закрепленный на кирпиче, измеряющий перемещение между кирпичами; 2 – индикатор часового типа, закрепленный на сетке, измеряющий перемещение продольных стержней сетки относительно поверхности кирпича; 3 – сетка; 4 – стальная обойма, создающая усилия обжатия между кирпичами.
a – общий вид образца в установке; b – вид А
Fig. 6. Tests for breaking out of the mortar joint of masonry flexible ties:
1 – dial indicator, fixed on the bricks, which measure displacement between the bricks; 2 – dial indicator attached to the grid, which measures the displacement of the longitudinal bars of the mesh relative to the surface of the brick; 3 – mesh; 4 – the steel cage, creating the compression force between the bricks.
a – general view of the specimen in the installation; b – view A

В образцах серии C1.1 с сетками с тремя продольными стержнями, результаты испытаний которых приведены в [14], средняя величина предельного усилия $N_{ult,1}$ по трем образцам составила 5,9 кН. Коэффициент использования прочности одного стержня в составе сетки C1.2 равен:

$$K_{u,1} = N_{ult,1} / (3 N_{f,ult,1}) = 5,9 / (3 \cdot 2,67) = 0,7.$$

В образцах серии C1.2 с сетками с двумя продольными стержнями средняя величина предельного усилия $N_{ult,1}$ по трем образцам составила 5,63 кН. Коэффициент использования прочности одного

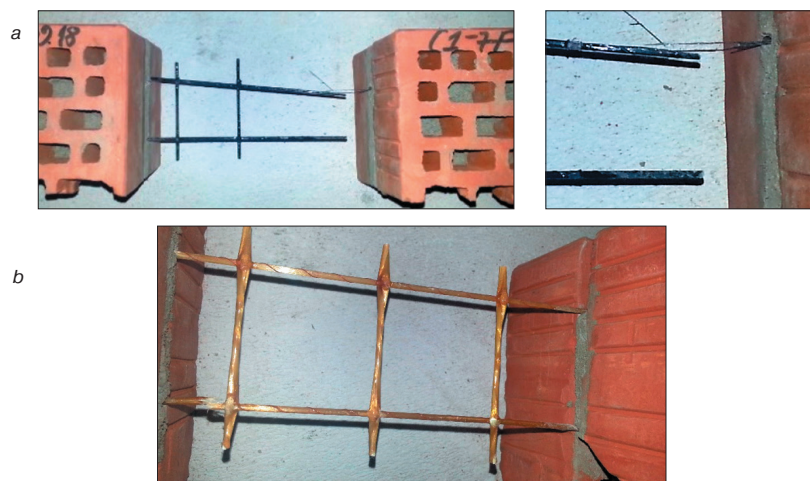


Рис. 7. Разрыв и вырыв сеток в образцах: a – образцы серии C1.2 (разрыв); b – образец серии C2.2 (вырыв)
Fig. 7. Ripping and tearing of meshes in samples: a – samples of the S1.2 series (ripping); b – sample of the S2.2 series (tearing)

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний образцов кладки
The test results of samples of masonry

Серия образцов	Наименование образца	Количество продольных стержней в сетке n , шт.	Характер разрушения образца	Предельное усилие в сетке N_{ult} , кН			Предельное перемещение одного стержня $e_{стерж.}$, мм	Среднее предельное усилие по результатам испытания отдельных стержней НИИЖБ [14] $N_{f,ult}$, кН	Коэффициент использования прочности стержней в составе сетки $K_n = N_{ult} / N_{f,ult}$
				Частное значение	Среднее значение	Среднее усилие в одном стержне сетки			
Серия испытаний с сетками C1.1 из трех продольных стержней [14]									
C1.1 [13]	C1.1 C1.2 C1.3 C1.4 C1.5	3	Вырыв связи из шва. Разрыв связи	–	5,9	1,97	0,48	2,67	0,7
Серия испытаний с сетками C1.2 из двух продольных стержней									
C1.2	C1.2–6	2	Вырыв связи из шва	4,38	>5,63	2,82	0,58	2,67	1
	>4,38								
	C1.3–7		Разрыв связи	6,25					
C1.4–8	Разрыв связи	6,25							
Серия испытаний с сетками C2.1 из трех продольных стержней [14]									
C2.1 [13]	C2.1 C2.2 C2.3 C2.4 C2.5	3	Вырыв связи из шва	–	8,8	2,93	0,34	4,35	0,7
Серия испытаний с сетками C2.2 из двух продольных стержней									
C2.2	C2.2–6	2	Вырыв связи из шва	5,63	>6,05	3,02	0,66	4,35	0,7
				>5,63					
	C2.2–7		Вырыв связи из шва Разрыв связи	6,88					
				>6,88					
C2.2–8	Вырыв связи из шва	5,63							
				>5,63					

Таблица 2
Table 2

Расчетные значения усилий в одном стержне в составе сетки $N_{f,1}$ и соответствующие им перемещения между слоями кладки $e(N_{f,1})$
Calculated values of forces in a single rod in the grid $N_{f,1}$ and their corresponding movements between layers of masonry $e(N_{f,1})$

Серия образцов	Номинальный диаметр стержня d , мм	Номинальная площадь поперечного сечения A , мм ²	Расчетное сопротивление растяжению одного стержня $R_1 = N_{ult,1} / A$, МПа	Расчетное усилие в одном стержне $N_{f,1} = N_{ult,1} / k^*$, кН	Перемещения между слоями кладки $e(N_{f,1})$ мм
C1.1 [13]	2	3,15	625	0,66	0,46
C1.2	2	3,15	895	0,94	1,1
C2.1 [13]	2,33	4,25	689	0,98	0,58
C2.2	2,33	4,25	711	1,01	1,01

* Коэффициент запаса к предельной нагрузке ($k=3$).

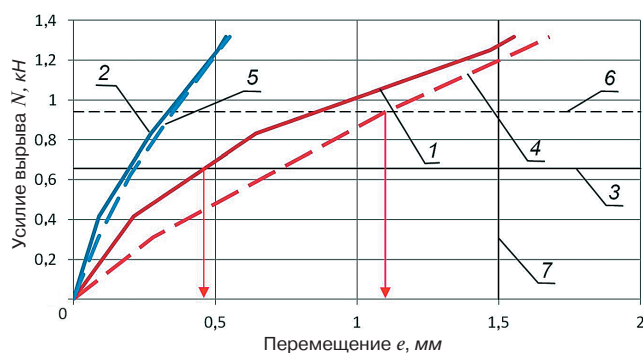


Рис. 8. Зависимость перемещений от усилий в одном стержне, находящемся в составе сетки С1. Образцы серии С1.1: 1 – перемещения между слоями кладки $e_{\text{стены}}$; 2 – перемещения в одном анкерном узле $e_{\text{уз}}$; 3 – расчетное усилие в одном стержне ($N_{f,1}=0,66$ кН). Образцы серии С1.2: 4 – перемещения между слоями кладки $e_{\text{стены}}$; 5 – перемещения в одном анкерном узле $e_{\text{уз}}$; 6 – расчетное усилие в одном стержне ($N_{f,1}=0,94$ кН); 7 – предельное перемещение сетки ($e_{\text{ult},1} = 1,5$ мм).

Fig. 8. The dependence of movements on forces in a single rod located in the S1 mesh. Samples of the S1.1 series: 1 – movement between layers of masonry; 2 – movement in one anchor node; 3 – calculated force in one rod. Samples of the S1.2 series: 4 – movement between layers of masonry; 5 – movement in one anchor node; 6 – calculated force in one rod; 7 – limit movement of the mesh

стержня в составе сетки С1.2 с двумя продольными стержнями равен:

$$K_{n,1} = N_{\text{ult},1} / (2 N_{f,\text{ult},1}) = 5,63 / (2 \cdot 2,67) = 1,05$$

Предельное усилие в одном стержне, вырезанном из сетки С2.1, $N_{f,\text{ult},2}$, полученное из испытаний [13], составило 4,35 кН.

В образцах серии С2.1 с тремя продольными стержнями средняя величина предельного усилия $N_{\text{ult},2}$ по трем образцам составила 8,8 кН. Коэффициент использования прочности одного стержня в составе сетки С2.1 равен:

$$K_{n,1} = N_{\text{ult},1} / (3 N_{f,\text{ult},1}) = 8,8 / (3 \cdot 4,35) = 0,7$$

В образцах серии С2.2 средняя величина предельного усилия $N_{\text{ult},2}$ по трем образцам составила 6,05 кН. Коэффициент использования прочности одного стержня в составе сетки С2.2 с двумя продольными стержнями равен:

$$K_{n,2} = N_{\text{ult},1} / (2 N_{f,\text{ult},1}) = 6,05 / (2 \cdot 4,35) = 0,7$$

Разброс показаний во многом объясняется смешанным характером предельного состояния – по прочности материала сетки и по прочности ее анкерного узла. Кроме того, при испытаниях сеток в первой партии (с тремя продольными стержнями) [12, 14] некоторое влияние оказало близкое расположение стержней к краю кирпича.

Следует ожидать, что при увеличении количества стержней в сетке за счет испытания сеток большей ширины коэффициент использования прочности стержня в сетке будет снижаться.

До получения результатов испытаний на большем количестве образцов и с другими сетками рекомендуется коэффициент использования прочности одного стержня в составе сетки K_n принять равным 0,7.

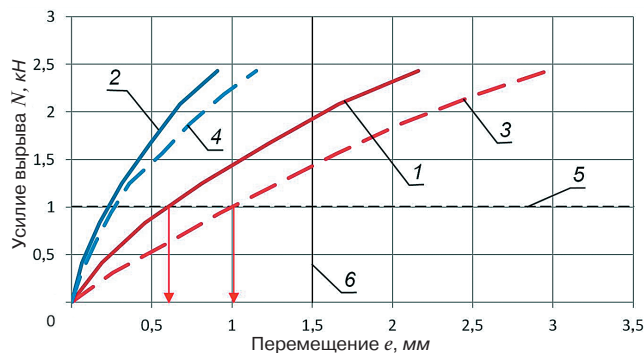


Рис. 9. Зависимость перемещений от усилий в одном стержне, находящемся в составе сетки С2. Образцы серии С2.1: 1 – перемещения между слоями кладки $e_{\text{стены}}$; 2 – перемещения в одном анкерном узле $e_{\text{уз}}$. Образцы серии С2.2: 3 – перемещения между слоями кладки $e_{\text{стены}}$; 4 – перемещения в одном анкерном узле $e_{\text{уз}}$; 5 – расчетное усилие в одном стержне ($N_{f,1}=1,01$ кН); 6 – предельное перемещение сетки ($e_{\text{ult},1} = 1,5$ мм).

Fig. 9. The dependence of movements on forces in a single rod located in the S2 mesh: Samples of the S2.1 series: 1 – movement between layers of masonry; 2 – movement in one anchor node. Samples of the S2.2 series: 3 – movement between layers of masonry; 4 – movement in one anchor node; 5 – calculated force in one rod; 6 – limit movement of the mesh

Перемещения

На рис. 8, 9 показаны графики зависимости перемещений от усилий в одном стержне, находящемся в составе сеток С1.1 с тремя и С1.2 с двумя продольными стержнями.

В многослойной кладке недопустимые для условий ее эксплуатации деформации могут наступить раньше исчерпания несущей способности связи на вырыв. Последствием таких деформаций может быть появление трещин в кладке, недопустимые перемещения из плоскости стен и т. д. Наряду с критерием прочности связи на вырыв из растворного шва во многих случаях должен вводиться критерий, ограничивающий деформации связи. При назначении максимальной величины деформации следует исходить из суммарных перемещений в анкерных узлах и собственно материала связи на длине между слоями кладки.

Перемещения между двумя слоями кладки $e_{\text{стены}}$, узлах анкерной связи $\Sigma e_{\text{уз}}$ и собственно материала связи $e_{\text{св}}$ на длине между слоями кладки определены по формулам (1) и (2).

В проведенном эксперименте измерялись перемещения между двумя слоями кладки $e_{\text{стены}}$ и перемещения в узле анкерной связи $e_{\text{уз}}$.

Для сеток С1.1 и С1.2 расчетные усилия в одном стержне $N_{f,1}$ равны соответственно 0,66 и 0,94 кН (табл. 2). Этим значениям соответствуют перемещения между слоями кладки, полученные из графика на рис. 8, равные соответственно 0,46 и 1,1 мм.

Для сеток С2.1 и С2.2 расчетные усилия в одном стержне $N_{f,1}$ равны соответственно 0,98 и 1,01 кН (табл. 2). Этим значениям соответствуют перемещения между слоями кладки, полученные по данным зависимости на рис. 8, равные соответственно, 0,58 и 1,01 мм.

В случае принятия по условиям эксплуатации предельной величины перемещений между слоями кладки 1,5 мм и при коэффициенте запаса к предельной нагрузке, равном 3, перемещения 1,5 мм не достигаются ни в одном случае.

Выводы

1. Предельное состояние связей наступало от вырыва стержней из растворного шва или их разрыва.
2. Коэффициент неравномерности включения отдельных стержней связей в работу сетки рекомендуется принять равным 0,7.

3. При коэффициенте запаса к предельной нагрузке, равном 3, перемещения 1,5 мм, ограничиваемые условиями эксплуатации, не достигаются ни в одном случае.

Список литературы

1. Обозов В.И., Давидюк А.А., Павлова М.О., Лазарев П.А. Несущая способность анкерного крепежа и гибких базальто-пластиковых связей в кладке из легкобетонных блоков на стекловидных заполнителях // *Жилищное строительство*. 2014. № 3. С. 39–43.
2. Орлович Р.Б., Рубцов Н.М., Зимин С.С. О работе анкеров в многослойных ограждающих конструкциях с наружным кирпичным слоем // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 1 (36). С. 3–11.
3. Орлович Р.Б., Найчук А.Я. Анкеровка лицевого слоя в слоистых каменных стенах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 6. С. 73–76.
4. Martins A., Vasconcelos G., & Costa A.C. (2017a). Experimental assessment of the mechanical behavior of ties on brick veneers anchored to brick masonry infills // *Construction and Building Materials*. 2017. No. 156, pp. 515–531.
5. Zavalis R., Jonaitis B. Experimental investigation of pull out strength of flexible ties in thin brick veneer layer // *Engineering Structures and Technologies*. 2019. Vol. 11. Issue 4, pp. 114–118.
6. Carbone I. & G. de Felice Bond performance of fiber reinforced grout on brickwork specimens // *Structural Analysis of Historic Construction*. 2008, pp. 809–815.
7. Ищук М.К., Гогуа О.К., Алехин Д.А., Файзов Д.Ш., Фролова И.Г., Николаев В.В. Экспериментальные исследования прочности и деформаций анкерования базальто-пластиковых связей на вырыв из растворных швов кладки до и после огневого воздействия // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 12. С. 49–52.
8. Ищук М.К., Гогуа О.К., Фролова И.Г. Особенности работы гибких связей в стенах с лицевым слоем из каменной кладки // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-40-44>
9. Ищук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. М.: РИФ «Стройматериалы», 2009. 390 с.
10. Ищук М.К., Ширай М.В. Экспериментальные исследования прочности и деформаций кладки из крупноформатных керамических камней с заполнением пустот утеплителем // *Строительные материалы*. 2012. № 5. С. 93–95.
11. Ищук М.К., Гогуа О.К., Айзятуллин Х.А., Черемных В.А. Исследования двухслойной кладки при сдвиге слоев // *Вестник НИИ «Строительство»*. 2020. № 24. С. 34–43. ISSN: 2224-9494 DOI: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>

References

1. Obozov V.I., Davidyuk A.A., Pavlova M.O., Lazarev P.A. Bearing capacity of anchor fasteners and flexible basalt-plastic ties in a masonry of lightweight concrete blocks on vitreous aggregates. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 3, pp. 39–43. (In Russian).
2. Orlovich R.B., Rubtsov N.M., Zimin S.S. On the work of anchors in layered walling with an outer brick layer. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 1 (36), pp. 3–11. (In Russian).
3. Orlovich R.B., Naichuk A.J. Anchoring of the surface layer in the layered masonry walls. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2010. No. 6, pp. 73–76. (In Russian).
4. Martins, A., Vasconcelos, G., & Costa, A. C. (2017a). Experimental assessment of the mechanical behavior of ties on brick veneers anchored to brick masonry infills. *Construction and Building Materials*. 2017. No. 156. pp. 515–531.
5. Zavalis R., Jonaitis B. Experimental investigation of pull out strength of flexible ties in thin brick veneer layer. *Engineering Structures and Technologies*. 2019. Volume 11. Issue 4. pp. 114–118.
6. Carbone I. & G. de Felice Bond performance of fiber reinforced grout on brickwork specimens. *Structural Analysis of Historic Construction*. 2008. pp. 809–815.
7. Ishchuk M.K., Gogua O.K., Alekhin D.A., Fayzov D.Sh., Frolova I.G., Nikolaev V.V. Experimental studies of the strength and deformation of anchoring basaltplastic ties to break out of masonry mortars before and after fire exposure. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo*. 2016. No. 12, pp. 49–52. (In Russian).
8. Ishchuk M.K., Gogua O.K., Frolova I.G. Features of operation of flexible ties in the walls with the facing layer of brick masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 7, pp. 40–44. DOI: [10.31659/0585-430X-2018-761-7-40-44](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-40-44). (In Russian).
9. Ischuk M.K. Otechestvennyi opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnymi stenami iz oblegchennoi kladki [Domestic experience in the construction of buildings with external walls of lightweight masonry]. Moscow: RIF Stroymaterialy. 2009. 390 p.
10. Ishchuk M.K., Shiray M.V. Strength and deformation of large-size ceramic block masonry with filling of voids with heat insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 5, pp. 93–95. (In Russian).
11. Ishchuk M.K., Gogua O.K., Aizyatullin Kh.A., Cheremnykh V.A. Researches of double-layer masonry under shear layers. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*.

12. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю., Никишов Е.И., Ишук М.К., Грановский А.В., Джамуев Б.К., Айзятуллин Х.А. Сетка композитная полимерная для каменной кладки // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-44-50>
13. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Ишук М.К., Грановский А.В. Композитная полимерная сетка для каменной кладки // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 11. С. 15–19.
14. Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Грановский А.В., Ишук М.К., Юрин Е.Ю., Королева Е.Н., Максимова Т.А., Никишов Е.И. Исследования сеток композитных полимерных для каменной кладки и определение рациональных областей применения. Отчет о НИР № 76/2018 от 02.03.2018 (ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве»).
15. СП 327.1325800.2017. Стены наружные с лицевым кирпичным слоем. Правила проектирования, эксплуатации и ремонта. М.: Стандартинформ, 2017. 33 с.
16. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. СНиП II-22-81* (с изменениями № 1, 2, 3). М.: Стандартинформ, 2019. 81 с.
17. EN 845-1:2013 Specification for ancillary components for masonry – Part 1: Wall ties, tension straps, hangers and brackets.
2020. No. 24, pp. 34–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
12. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Iurin E.U., Nikishov E.I., Ishchuk M.K., Granovskii A.V., Dzhamuev B.K., Aiziatullin Kh.A. Composite polymer mesh for brick masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 9, pp. 44–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-44-50>
13. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Ishchuk M.K., Granovskii A.V. Composite polymer mesh for brick masonry. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo*. 2019. No. 11, pp. 15–19. (In Russian).
14. Stepanova V.F., Buchkin A.V., Granovskii A.V., Ishchuk M.K., Iurin E.N., Koroleva E.N., Maksimova T.A., Nikishov E.I. Researches of grids composite polymeric for a stone laying and definition of rational scopes. Research report No. 76/2018 dated 02.03.2018 (FAA “Federal Center for Standardization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction”) (In Russian).
15. SP 327.1325800.2017. Exterior walls with a front brick layer. Rules for the design, operation and repair. Moscow: Standartinform. 2017. 33 p.
16. SP 15.13330.2012. Masonry construction. Construction Norms and Regulations of II-22-81* (with changes No. 1, 2, 3). Moscow: Standartinform. 2019. 81 p.
17. EN 845-1:2013 Specification for ancillary components for masonry – Part 1: Wall ties, tension straps, hangers and brackets.

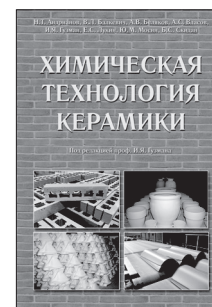
СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу

Книга «Химическая технология керамики»

Авторы – коллектив ученых РХТУ им. Д.И. Менделеева, под редакцией И.Я. Гузмана.

В пособии освещены вопросы современного состояния технологии основных видов керамических изделий строительного, хозяйственно-бытового и технического назначения, а также различных видов огнеупоров. Книга соответствует программе общего курса химической технологии керамики и огнеупоров при наличии также курсов соответствующих специализаций. Подробно изложены характеристика сырья, проблемы подготовки керамических масс и их формование, особенности механизмов спекания, а также дополнительные виды обработки керамики: металлизация, глазурирование, декорирование, механическая обработка. Описаны механические, деформационные, теплофизические, электрофизические свойства керамических изделий, в том числе при высокой температуре.



Книга «Керамические пигменты»

Авторы – Масленникова Г.Н., Пищ И.В.

В монографии рассмотрены физико-химические основы синтеза пигментов, в том числе термодинамическое обоснование реакций, теория цветности, современные методы синтеза пигментов и их классификация, методы оценки качества. Приведены сведения по технологии пигментов и красок различных цветов и кристаллических структур. Описаны современные методы декорирования керамическими красками изделий из сортового стекла, фарфора, фаянса и майолики. Книга предназначена для научных сотрудников, студентов, специализирующихся в области технологии керамики и стекла, а также для инженерно-технических работников, занятых в производстве керамических изделий и красок.



Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку произвольной формы по e-mail: mail@rifsm.ru или оформить заявку на сайте www.rifsm.ru

25 лет: от учебного центра предприятия до корпоративной Академии КНАУФ



Для немецкой компании КНАУФ, крупнейшего инвестора в российскую промышленность строительных материалов, 2020 год знаменателен 25-летием развития учебной и просветительской деятельности. Из учебного центра, созданного на первом российском предприятии КНАУФ в Красногорске в 1995 г., выросла эффективная образовательная система, включающая учебные, ресурсные и консультационные центры, лаборатории на базе ведущих вузов, работающие по единым стандартам компании и составляющие Академию КНАУФ. В соответствии с классическим определением Академия КНАУФ готовит широкий круг специалистов в области сухого строительства и применения инновационной продукции КНАУФ, от рабочего до преподавателя вуза.



Руководитель Академии КНАУФ
Е.В. Парикова

Когда фирма КНАУФ в первой половине 1990-х гг. начала деятельность в России, она столкнулась с двуединой проблемой российского рынка: огромной потребностью в новых высококачественных материалах и острейшим дефицитом квалифицированных кадров, способных правильно применять новые материалы и технологии. Это обусловило необходимость параллельно с развитием производственных предприятий организовывать обучение. Идейным вдохновителем и проводником образовательной деятельности фирмы КНАУФ в России стал доктор Хайнер Гамм.

Журнал «Строительные материалы»[®] с первых дней сотрудничества уделяет большое внимание освещению образовательных проектов компании КНАУФ. Именно в нашем журнале в 1995 г. появилась первая статья об открытии первого учебного центра на первом российском предприятии КНАУФ в Красногорске. Затем последовало создание учебных, ресурсных и консультационных центров в других городах России и странах СНГ. Разработка специальных учебных программ для вузов, разработка и внедрение профессиональных стандартов...

Пандемия COVID19 и связанные с ней ограничительные меры, направленные на предупреждение распространения инфекции, нарушили многие планы, в том числе и проведения торжественных мероприятий, которые пришлось отложить, а некоторые и вовсе отменить.

Однако мы не могли пропустить такое значимое событие и первую же деловую встречу после снятия ограничительных мер провели в Красногорске – беседовали с руководителем Академии КНАУФ Еленой Владимировной Париковой, канд. техн. наук, членом Совета по профессиональным квалификациям в строительстве, об эволюции

центров обучения применению выпускаемых фирмой материалов до Академии КНАУФ.

Елена Владимировна отметила, что главными задачами Академии КНАУФ являются всемерная популяризация материалов и технологий КНАУФ; формирование высокопрофессионального сообщества, ориентированного на их правильное применение и создание надежных, безопасных для здоровья и комфортных жилых пространств.

В настоящее время в России и СНГ работает 12 учебных, 14 консультационных и 54 ресурсных центра, имеющих современное оснащение и укомплектованных сотрудниками самой высокой квалификации, среди которых 7 кандидатов технических наук, эксперты по сухому строительству и штукатурным работам, авторы учебников по материаловедению и технологиям строительных материалов.

Академия КНАУФ реализует 24 программы обучения, разрабатываемые с учетом специфики региона и конкретного заказчика с разным уровнем компетенций и опытом работы. Обучаться технологиям КНАУФ и повышать квалификацию могут как люди без специального образования, так и опытные преподаватели вузов. Каждый приобретает новые знания, навыки и компетенции. С 1995 г. обучение по программам Академии КНАУФ прошли более 150 тыс. человек.

Что же отличает Академию от сети образовательных центров?

Главное отличие все-таки не формальное, а скорее философское. Ведь КНАУФ по сути не только и не столько готовит пользователей своих материалов. Немалые инвестиции в концептуальную разработку, материальную базу и интеллектуальный потенциал Академии КНАУФ фактически направлены на формирование качественной среды обитания человека.

Исходя из этой сверхзадачи формируются приоритетные направления деятельности Академии, включающие кроме непосредственного обучения технологиям КНАУФ и повышения престижа рабочих профессий выстраивание цивилизованного партнерства с профильными вузами и организациями среднего специального образования, легитимацию профессий сухого строительства на государственном уровне.

Каждое направление развивается комплексно и прецизионно. Например, в рамках сотрудничества с вузами не только созданы стандартные учебные модули, интегрированные в программы соответствующих специальностей, и оборудованы учебные аудитории и лаборатории. Для преподавателей вузов разработаны программы повышения

квалификации, в том числе с посещением учебных центров и предприятий КНАУФ за рубежом. Подготовлен ряд учебных пособий – традиционных и электронных. Студентам предлагаются экскурсии и практики на предприятиях КНАУФ, темы дипломных проектов, стипендии и гранты.

Реальным вкладом в развитие науки и технологии материалов на основе гипса является спонсорская поддержка различных научно-технических конференций и конкурсов. Концепция развития этого направления деятельности была заложена в рамках Первого симпозиума по строительным материалам КНАУФ для СНГ, который состоялся в 2004 г. в штаб-квартире КНАУФ в г. Ипхофене (Германия). Среди участников тогда были руководители и ведущие ученые строительных вузов из России, Украины, Казахстана.

Компания КНАУФ неоднократно выступала спонсором конференций, организатором которых была объединенная редакция журналов «Строительные материалы»® и «Жилищное строительство». Она постоянно поддерживает конкурс научно-технических статей по тематике производства и применения гипсовых материалов и технологий в рамках ежегодной Международной конференции по гипсу Российской гипсовой ассоциации.

Академия КНАУФ продолжает проведение симпозиумов, конференций, семинаров в сотрудничестве с общественными организациями и профессиональными сообществами, которые состоялись в Москве, Санкт-Петербурге, Казани, Сочи, Туле. Большой интерес студентов российских вузов вызывают мастер-классы ведущих немецких ученых в области гипса.

Важнейшим направлением деятельности Академии КНАУФ является разработка и внедрение профессиональных и образовательных стандартов по сухому строительству, которые эволюционируют с рынком труда. В 1993 г. компания КНАУФ фактически стала родоначальником профессии «мастер сухого строительства» в России, которая в настоящее время называется «монтажник каркасно-обшивных конструкций». Если профессия «штукатур» из советских классификаторов профессий органично перекочевала в российские, то профессии «монтажник каркасно-обшивных конструкций» в советское время не существовало. Соответственно, придя в Россию, компания КНАУФ стала работать в том числе и над легитимацией этой профессии. Был создан первый профессиональный стандарт специалиста сухого строительства – профессия была утверждена 5 марта 2004 г. Затем этот профессиональный стандарт был интегрирован в систему образования. По инициативе КНАУФ разработан образовательный стандарт «Мастер сухого строительства».

Этот стандарт затем был интегрирован в действующий образовательный стандарт «Мастер строительного-отделочных работ», а в дальнейшем перерос в новую профессию «монтажник каркасно-обшивных конструкций». В настоящее время данная специальность является одной из самых востребованных в России.

Непрерывная работа ведется по созданию различных учебных материалов: учебников и пособий, обучающих фильмов. Мы гордимся тем, что одни из первых учебных пособий (Х. Гамм. «Современная отделка помещений с использованием комплектных систем КНАУФ», 2002;



Индивидуальные элементные сметные нормы расхода материалов и затрат труда на отделку помещений комплектными системами КНАУФ. Т. 1–3, 2005) были выпущены в издательстве «Стройматериалы».

В прошлом году в издательстве «Академия» был выпущен новый учебник «Материаловедение для каркасно-обшивных конструкций» (Е.В. Парикова, Г.Н. Фомичёва), который получил гриф Министерства просвещения Российской Федерации и рекомендован как федеральный учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования.

Формирования устойчивого понимания ценности качества сухого строительства и уважительного отношения к профессии отделочника невозможно добиться без всемерной популяризации престижа рабочих профессий. В этом направлении Академия КНАУФ развивает сотрудничество с организаторами различных профессиональных конкурсов и соревнований как в России, так и за рубежом.

Компания поддерживает всероссийский конкурс «Строймастер», проводимый совместно с НОСТРОЙ, совместно с Союзом «Агентство развития профессиональных сообществ и рабочих кадров «Молодые профессионалы (Ворлдскиллс Россия)» (компания КНАУФ многие годы является партнером союза), проводит чемпионаты в компетенции «Сухое строительство и штукатурные работы».

Несмотря на сложности, продиктованные пандемией, коллектив Академии КНАУФ успешно реализует творческие планы юбилейного года. В их числе запуск первого в мире VR-тренажера по монтажу перегородок из гипсокартона и собственной платформы дистанционного обучения, выпуск очередной книги по отделочным работам в партнерстве с основателем «Школы маляров», обучение по новым актуальным программам для бригадиров и DIY. Есть новые перспективные проекты с НОПРИЗ. Кроме того, продолжают проекты по профориентации, корпоративные чемпионаты КНАУФ, а также чемпионаты Ворлдскиллс разного уровня.

Академия КНАУФ непрерывно развивается вместе с развитием компании, технологиями и окружающим миром. Пожелаем коллегам успехов!

Е.И. Юмашева

С.Ю. АНДРОНОВ¹, канд. техн. наук (atomic08@yandex.ru), А.Ф. ИВАНОВ¹, канд. техн. наук (alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru); А.В. КОЧЕТКОВ², д-р техн. наук (soni.81@mail.ru); В.И. АЛФЕРОВ³, канд. техн. наук, заместитель генерального директора (alferov-vrn@yandex.ru)

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

³ ФАУ «РОСДОРНИИ» (125493, г. Москва, ул. Смольная, 2)

Практическое применение направленного структурообразования асфальтовых материалов с дисперсным битумом на стадии объединения составляющих компонентов

Критерием оптимизации состава и технологии приготовления асфальтовых материалов с дисперсным битумом следует считать степень его дисперсности, которая влияет на протекание процессов структурообразования в последующих технологических переделах и в конечном счете на свойства асфальта в слоях дорожной одежды. В настоящей статье представлены результаты ремонта автомобильной дороги в Кувандыкском районе Оренбургской области. Впервые в промышленных объемах были приготовлены битумная суспензия и асфальтобетонная смесь на ее основе с применением битума во вспененном состоянии. На базе приведенных материалов можно сконструировать и изготовить установку для приготовления асфальтовых материалов с дисперсным битумом, от битумных мастик и укрепленных грунтов до асфальтовых и цементобетонных смесей с добавками битума. Установлена возможность получения достаточной степени дисперсности битума и равномерности его распределения в асфальтобетонной смеси с менее жесткими требованиями по содержанию минерального порошка и воды при введении битума в распыленном состоянии. Очистки от пыли и просушки ремонтируемого дорожного покрытия из холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного битума не требуется. Материал приспособлен к влажным и запыленным поверхностям. Его можно использовать и при горячей технологии на АБЗ без битумного хозяйства – подавать вместо битума холодную битумную суспензию. На асфальтобетонном заводе отпадает необходимость в битумном хозяйстве в классическом понимании: битумохранилище, битумный насос, теплоизолированный битумопровод, битумный котел для обезвоживания битума, расходный битумный котел.

Ключевые слова: диспергированный битум, холодные асфальтобетонные смеси, фибра, асфальтобетон, битумная суспензия, равномерное распределение, базальтовое волокно.

Для цитирования: Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В., Алферов В.И. Практическое применение направленного структурообразования асфальтовых материалов с дисперсным битумом на стадии объединения составляющих компонентов // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-46-53>

S.Yu. ANDRONOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (atomic08@yandex.ru), A.F. IVANOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru); A.V. KOCHETKOV², Doctor of Sciences (Engineering) (soni.81@mail.ru); V.I. ALFEROV³, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy General Director (alferov-vrn@yandex.ru)

¹ Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin (77, Politechnicheskaya Street, Saratov, 410054, Russian Federation)

² Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Prospect, Perm, 614990, Russian Federation)

³ "ROSDORNII" Federal autonomous institution (2, Smolnaya Street, Moscow, 125493, Russian Federation)

Practical Application of Directional Structure Formation of Asphalt Materials With Dispersed Bitumen at the Stage of Combining Components

The criterion for optimizing the composition and technology of preparation of asphalt materials with dispersed bitumen should be considered the degree of its dispersion, which affects the flow of structure formation processes in subsequent technological changes and ultimately the properties of asphalt in the layers of road pavement. This article presents the results of road repairs in the Kuvandyksky district of the Orenburg region. For the first time in industrial volumes, a bituminous suspension and an asphalt-concrete mixture based on it were prepared using bitumen in a foamed state. On the basis of materials presented it can be possible to design and manufacture an unit for the preparation of asphalt materials with dispersed bitumen from bituminous mastics and reinforced soils to asphalt mixtures and cement-concrete mixtures with bitumen additives. It is possible to obtain a sufficient degree of dispersion of bitumen and uniformity of its distribution in the asphalt concrete mixture with less stringent requirements for the content of mineral powder and water when introducing bitumen in a sprayed state. Cleaning from dust and drying of the repaired road surface from cold asphalt concrete mixes based on dispersed bitumen is not required. The material is adapted to wet and dusty surfaces. It can also be used for hot technology on the ACP (Asphalt concrete plant) without bituminous sector – to supply cold bituminous suspension instead of bitumen. At asphalt plant eliminates the need for bitumen sector in the classic sense: bitumen storage tank, bitumen pump, thermal insulated bitumen pipe, bitumen pot for bitumen dehydration, consumable bitumen pot.

Keywords: dispersed bitumen, cold asphalt-concrete mixes, fiber, asphalt concrete, bituminous suspension, uniform distribution, basalt fiber.

For citation: Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V., Alferov V.I. Practical application of directional structure formation of asphalt materials with dispersed bitumen at the stage of combining components. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 46–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-46-53>

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

Проблемы совершенствования технологии приготовления асфальтовых материалов, улучшения их качества, повышения производительности смесительного оборудования всегда являлись предметом исследований с момента их появления [1–7 и др.].

Производство асфальтовых смесей является одним из самых энергоемких процессов дорожного строительства. На асфальтобетонных заводах (АБЗ) около 30% тепловой энергии расходуется на приготовление битума, а остальное – на подготовку, нагрев и сушку минеральных материалов. Затраты на энергию составляют более 25% от стоимости материалов. Только за счет снижения температуры нагрева асфальтобетона на 10°C экономия топлива достигает 0,36 кг на 1 т смеси. Стоимость работ по приготовлению асфальтобетонных смесей составляет 45–55% от их себестоимости, или 30–40% стоимости асфальтобетона в слое покрытия дорожной одежды, причем на битум приходится 40–45% стоимости асфальтобетонной смеси. В связи с этим вопросы сбережения энергетических источников, разработки новых ресурсосберегающих технологий и процессов приобретают в настоящее время весьма существенное значение и являются важнейшей задачей научных исследований.

Развитие технологии в последнее время ориентировано преимущественно на повышение эффективности процессов перемешивания составляющих компонентов и снижения загрязнения окружающей среды [8, 9].

В дорожном строительстве наблюдается устойчивая тенденция поиска асфальтовых материалов и полуфабрикатов, которые при температуре окружающего воздуха могут длительное время сохранять технологические свойства, а после укладки и уплотнения приобретают требуемые характеристики. Такие материалы принято называть холодными асфальтобетонами или органоминеральными материалами [10–12]. В настоящее время во всех отраслях строительства все большее распространение получают производственные технологии с использованием диспергированных битумов [13–16].

Анализ последних достижений и публикаций

Заслуживают внимания исследования возможности интенсификации процессов структурообразования на стадии перемешивания минеральных материалов с использованием распылов битума или битумных пен. Большинство этих исследований касаются асфальтобетонов горячего приготовления.

Для реализации этого направления можно использовать разработки, приведенные далее. В США разработан метод приготовления смеси вспененного битуминозного вяжущего с минеральным наполнителем, который состоит в следующем (патент 879692, Великобритания): разжиженный битум непрерывным потоком при регулируемом давлении, превышающем атмосферное, поступает через штуцер в корпус распыляющего устройства; одновременно в распыляющее устройство через пробку по трубопроводу непрерывно подается пар при регулируемом давлении и объеме; битум через отверстия в кольце поступает в камеру наконечника, где при контакте с паром вспенивается; вспененный битум разбрызгивается из отверстия наконечника, попадает на минеральный материал и перемешивается с ним механически при атмосферном давлении.

В Мурманской области применяется упрощенная установка для приготовления смесей на эмульсиях (рис. 1).

Особенностью материалов с дисперсным битумом является растянутость во времени процессов формирования структуры и сопротивляемости внешним воздействиям. Это является сдерживающим фактором их широкого применения. Большинство процессов в технологии асфальтовых материалов с дисперсным битумом реализуется в гетерогенных трехфазных системах твердое–жидкость–газ. Диспергирование битума является основным процессом структурообразования на стадии приготовления асфальтовых смесей с дисперсным битумом. Критерием оптимизации состава и технологии приготовления асфальтовых материалов с дисперсным битумом следует считать степень его дисперсности, которая влияет на протекание процессов структурообразования в последующих технологических переделах и в конечном счете на свойства асфальта в слоях дорожной одежды [17–31].



Рис. 1. Мешалка с опрокидывающимся дозатором вяжущего
Fig. 1. Mixer with tipping binder dispenser



Рис. 2. Загрузка компонентов и получение смеси на основе диспергированного битума
Fig. 2. Loading components and obtaining a mixture based on dispersed bitumen



Отмеченные технологические процессы являются базовыми в своих отраслях промышленности, поэтому управление процессами диспергирования в этих технологиях является главной задачей. Выполненный анализ показывает, что наиболее широко реализуемые на практике традиционные способы механического диспергирования обладают множеством недостатков, которые существенно снижают эффективность технологических процессов, реализуемых на их основе. В этой связи является перспективным направление совершенствования технологических процессов и применение новых способов диспергирования битума.

Постановка задачи

Наиболее эффективным способом интенсификации процессов структурообразования является развитие поверхности контакта фаз между веществами, находящимися в жидкой и газообразной фазах, за счет увеличения свободной поверхности вещества, находящегося в жидкой фазе. Увеличение свободной поверхности битума может осуществляться различными способами: при помощи его вспенивания, диспергированием, смачиванием битумом различных присадок.

Диспергирование является технически наиболее просто осуществимым способом увеличения свободной поверхности битума, а его совершенствование представляет собой одну из основных задач технологии асфальтовых материалов. Это направление базируется на наличии широкого спектра технологических процессов, реализация которых невозможна без применения диспергирования жидкостей. Такими технологическими процессами являются: в области химической технологии — мокрая очистка газов от различных дисперсных примесей, абсорбция газовых примесей как для очистки, так и для выделения определенных компонентов, сушка и одновременное гранулирование материалов; в области радиоэлектронной промышленности — нанесение паяльных флюсов при автоматическом изготовлении печатных плат, покрытие полупроводниковых пластин фоточувствительным слоем на стадии фотолитографии при производстве полупроводниковых схем и др.

Результаты и обсуждение

При проектировании состава асфальтовых материалов с дисперсным битумом и технологии их приготовления необходимо стремиться к созданию условий для получения дорожных покрытий с требуемыми свойствами в минимальные сроки. Определяющим фактором практически всех процессов, связанных с тепломассопередачей, смачиванием, адгезией и рядом других, является поверхность раздела фаз. Чем выше поверхность раздела фаз, зависящая от степени дисперсности битума, тем интенсивнее протекают процессы стабилизации материала.

Быстрое формирование материала, обеспечивающее ранние сроки открытия движения транспорта по

устроенному слою, в значительной степени может быть заложено на стадии объединения составляющих компонентов. При объединении минеральных материалов с водой и битумом происходят сложные физико-химические процессы, характер которых в значительной степени зависит от свойств составляющих материалов и технологических факторов, определяющих в дальнейшем качество получаемого асфальтобетона.

Способность битумов к диспергированию определяется их химическим составом и структурно-механическими свойствами, зависящими от природы исходного сырья и способа получения. Процессы диспергирования битумов в большей степени изучены применительно к битумным эмульсиям на жидких эмульгаторах. Установлено, что эмульгируемость существенно зависит от содержания в битуме компонентов, понижающих поверхностное натяжение. Поверхностная активность битумов может резко повышаться за счет асфальтогеновых кислот и ангидридов. С увеличением концентрации этих веществ битумам можно придать кардинально отличное качество — способность самопроизвольно эмульгироваться в щелочных растворах.

Для перевода битума в диспергированное состояние в составе асфальтовой смеси должны содержаться эмульгатор и вода. В качестве эмульгатора целесообразно использовать минеральный порошок, который является обязательной составляющей минеральной части большинства асфальтовых материалов. Количество и тонкость помола минерального порошка должны обеспечить создание благоприятных условий для диспергирования битума.

Авторами исследовано влияние состава минеральной части, влажности смеси, температуры битума и скорости перемешивания на дисперсность битума. Установлено, что для обеспечения диспергирования битума в составе увлажненной минеральной части должно содержаться не менее 4% частиц минерального порошка размером менее 0,071 мм.

При повышении содержания минерального порошка до 10% дисперсность битума существенно улучшается. Дальнейшее увеличение содержания минерального порошка незначительно влияет на степень дисперсности битума и требует увеличения содержания воды. Для ускорения процессов формирования асфальтовых материалов в слоях дорожной одежды минеральные составляющие должны иметь возможно меньшую пористость; минеральная смесь должна содержать минимальное количество тонкодисперсной фракции, частицы которой обладают длительной водоудерживающей способностью.

Введение в состав минеральной части 2–3% извести позволяет существенно повысить дисперсность битума. За счет высокой удельной поверхности извести-пушонки и ее пластифицирующего действия потребность в минеральном порошке и воде существенно снижается.



Рис. 3. Выгрузка асфальтовой смеси с дисперсным битумом на грунтовое основание
Fig. 3. Unloading asphalt mix with dispersed bitumen on a soil base

Влажность минеральной части назначается из условий диспергирования битума, энергетических и временных затрат на уплотнение, формирования достаточной для движения транспорта прочности, образования и адгезии битумной пленки на минеральной поверхности.

Для получения необходимой степени дисперсности битума влажность минеральной части должна находиться в пределах 4–7 и 7–10% при содержании минеральных частиц размером мельче 0,71 мм соответственно 4–9 и 9–12%.

Установлена возможность получения достаточной степени дисперсности битума и равномерности его распределения в асфальтобетонной смеси с менее жесткими требованиями по содержанию минерального порошка и воды при введении битума в распыленном состоянии.

На основе положительного опыта применения битумных суспензий в августе 2018 г. для ремонта выбоин и трещин на дорогах, а также реставрации тротуаров в г. Оренбурге принято решение применения асфальтовых материалов на основе битумных суспензий для ремонта и строительства дорог с низкой интенсивностью движения в Оренбургской области.

В мае 2019 г. впервые в промышленных объемах были приготовлены битумная суспензия и асфальтобетонная смесь на ее основе с применением битума во вспененном состоянии. Работы выполнялись на



Рис. 4. Укладка асфальтовой смеси с дисперсным битумом на грунтовое основание
Fig. 4. Laying asphalt mix with dispersed bitumen on a soil foundation

АБЗ в г. Оренбурге. Дооборудования АБЗ системой подачи воды в мешалку не требовалось, так как она входит в заводскую конструкцию.

Из асфальтовых материалов с дисперсным битумом были устроены участки покрытий на территории АБЗ. На основе положительного опыта применения асфальтовых материалов на основе битумной суспензии в г. Оренбурге было принято решение о более широком их применении в Кувандыкском районе Оренбургской области на автомобильной дороге «Подъезд к с. Маячный (ПК 0+25 – ПК 40+25)» от автомобильной дороги Оренбург–Орск–Шильда км 182+150.

Экспериментальные работы начались 30 июля 2019 г. В п. Краснощеково на АБЗ в смесительной установке ДС-158 приготавливалась асфальтобетонная смесь с дисперсным битумом и битумная суспензия (рис. 2).

Для эксперимента был принят состав асфальтобетонной смеси, аналогичной той, которая приготавливалась по горячей технологии для планового объекта: гранулометрический состав соответствовал типу Б и содержал 6,7% известнякового минерального порошка, расход битума марки БНД 60/90 составлял 6%.

Асфальтовая смесь приготавливалась в следующем порядке: щебень и песок с температурой 15°C подавались по существующей линии с отключенной форсункой сушильного барабана на весовой дозатор,



Рис. 5. Уплотнение катком асфальтовой смеси с дисперсным битумом
Fig. 5. Roller compaction of asphalt mixture with dispersed bitumen



Рис. 6. Заготовка асфальтовой смеси с дисперсным битумом для ямочного ремонта
Fig. 6. Preparation of asphalt mix with dispersed bitumen for patching

а затем в мешалку, твердый эмульгатор в виде минерального порошка с температурой 15°C дозировался и подавался в мешалку, куда при непрерывном перемешивании вводилась вода с температурой 14°C в количестве 8% до получения смеси консистенции, похожей на цементобетонную смесь, затем подавался битум с температурой 155°C.

В процессе перемешивания в течение 20 с битума с увлажненной минеральной смесью он распался на частицы сферической формы со средним диаметром около 1 мкм.

Готовая асфальтовая смесь имела температуру 25°C, выгружалась в ковш скипового подъемника, а затем в автомобиль-самосвал и доставлялась к месту производства работ.

Асфальтовая смесь с дисперсным битумом по цвету, консистенции и удобоукладываемости представляла собой рыхлую рассыпчатую массу, аналогичную асфальтовой смеси горячего приготовления, и применялась для строительства экспериментальных участков покрытия.

Асфальтовая смесь выгружалась на профилированное и уплотненное сухое основание из грунта с добавкой ПГС без подгрунтовки (рис. 3).

Выгрузка осуществлялась без затруднений, налипания смеси на поверхность кузова не наблюдалось.

Смесь укладывалась рыхлым слоем толщиной до 8 см с помощью автогрейдера с корректировкой по толщине и ширине с помощью лопаты (рис. 4)

Дорожные рабочие с многолетним стажем отмечали, что укладка асфальтовой смеси с дисперсным битумом вручную лопатой более комфортна и менее трудоемка по сравнению с горячей асфальтобетонной

смесью. Налипания смеси на лопату не происходило, смесь укладывалась равномерным рыхлым слоем.

Уплотнение производилось катком ДУ-98 (рис. 5) непосредственно после укладки асфальтовой смеси за четыре прохода по одному месту.

Смачивания вальцов не производилось, налипания смеси не происходило.

Движение транспорта открывалось через 30 мин после уплотнения. Колеса автомобилей не оставляли следа на покрытии.

Асфальтовая смесь с дисперсным битумом в широком интервале температуры (от минусовых до любых плюсовых) длительное время сохраняет технологические и функциональные свойства.

В условиях, исключающих испарение воды, смесь может храниться несколько лет. Отмеченные свойства указывают на целесообразность применения асфальтовых смесей для ямочного ремонта.

В целях применения асфальтовой смеси с дисперсным битумом для ямочного ремонта производилась ее расфасовка в мешки.

Приготовленная смесь выгружалась на асфальтированную площадку, лопатой загружалась в мешки по 20–25 кг и отправлялась на склад для хранения (рис. 6).

Ямочный ремонт с применением асфальтовой смеси с дисперсным битумом производился в следующем порядке: удаление разрушенного асфальтобетона дорожной фрезой, удаление из ремонтируемой карты асфальтовой крошки, смачивание поверхности карты водой, заполнение карты асфальтовой смесью с запасом на уплотнение, уплотнение смеси виброплитой (рис. 7).



Рис. 7. Этапы ямочного ремонта асфальтовой смесью с дисперсным битумом: а – подготовка карты; б – заполнение карты смесью; с – уплотнение виброплитой
Fig. 7. Stages of patching with asphalt mixture with dispersed bitumen: a – preparation of a map; b – filling the card with a mixture; c – vibration plate seal

Следует отметить, что образцы из смесей, приготовленных на производстве, обладают лучшими свойствами, чем образцы из смесей, приготовленных в лаборатории. Об этом свидетельствуют меньшие показатели водонасыщения, повышенные коэффициенты водоустойчивости. Объяснить это можно тем, что в смесителе АБЗ смеси приготавливаются с меньшим содержанием воды и при этом достигается более качественное диспергирование битума и более равномерное распределение его в смеси.

Выводы

На базе приведенных материалов можно сконструировать и изготовить установку для приготовления асфальтовых материалов с дисперсным битумом, от битумных мастик и укрепленных грунтов до асфальтовых смесей и цементобетонных смесей с добавками битума.

Список литературы

1. Иванов А.Ф. Исследование путей направленного структурообразования асфальтовых материалов с дисперсным битумом на стадии объединения составляющих компонентов // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2015. № 2 (10). С. 5–7.
2. Ерофеев В.Т., Сальникова А.И., Каблов Е.Н., Старцев О.В., Варченко Е.А. Исследование долговечности битумных композитов в условиях переменной влажности, ультрафиолетового облучения и морской воды // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12–12. С. 2549–2556.
3. Касаткин Ю.Н. Обеспечение проектных показателей свойств асфальтовых материалов при выполнении из них гидроизоляционных конструкций // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2003. Т. 242. С. 161–168.
4. Нехорошев В.П., Нехорошев С.В., Нехорошева А.В., Тарасова О.И. Химическое модифицирование дорожных битумов атактическим полипропиленом // *Нефтехимия*. 2017. Т. 57. № 4. С. 380–385.
5. Зайцев А.И., Лебедев А.Е., Бадаева Н.В., Романова М.Н. Технологические особенности производства асфальтобетонной смеси с использованием частиц старого асфальтобетона, полученных в том числе методом терморазделения агломератов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 5–1. С. 38–42.
6. Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В. Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>
7. Андронов С.Ю., Артеменко А.А., Кочетков А.В., Задирака А.А. Влияние способа введения базаль-

Установлена возможность получения достаточной степени дисперсности битума и равномерности его распределения в асфальтобетонной смеси с менее жесткими требованиями по содержанию минерального порошка и воды при введении битума в расплавленном состоянии.

Очистки от пыли и просушки ремонтируемого дорожного покрытия из холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного битума не требуется. Материал приспособлен к влажным и запыленным поверхностям. Его можно использовать и при горячей технологии на АБЗ без битумного хозяйства – подавать вместо битума холодную битумную суспензию. В этом случае на асфальтобетонном заводе отпадает необходимость в битумном оборудовании в классическом понимании: битумохранилище, битумный насос, теплоизолированный битумопровод, битумный котел для обезвоживания битума, расходный битумный котел.

References

1. Ivanov A.F. Study of the ways of directional structure formation of asphalt materials with dispersed bitumen at the stage of combining component components. *Tekhnicheskoe Regulirovanie v Transportnom stroitel'stve*. 2015. No. 2 (10), pp. 5–7. (In Russian).
2. Erofeev V.T., Sal'nikova A.I., Kablov E.N., Startsev O.V., Varchenko E.A. The study of the durability of bitumen composites in conditions of variable humidity, ultraviolet radiation and sea water. *Fundamental'nye Issledovaniya*. 2014. No. 12–12, pp. 2549–2556. (In Russian).
3. Kasatkin Yu.N. Ensuring design indicators of the properties of asphalt materials when performing waterproofing structures from them. *Izvestiya Vserossiiskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2003. Vol. 242, pp. 161–168. (In Russian).
4. Nekhoroshev V.P., Nekhoroshev S.V., Nekhorosheva A.V., Tarasova O.I. Chemical modification of road bitumen with atactic polypropylene. *Neftekhimiya*. 2017. Vol. 57. No. 4, pp. 380–385. (In Russian).
5. Zaitsev A.I., Lebedev A.E., Badaeva N.V., Romanova M.N. Technological features of the production of asphalt concrete mix using particles of old asphalt concrete, including those obtained by the method of thermal separation of agglomerates. *Fundamental'nye Issledovaniya*. 2016. No. 5–1, pp. 38–42. (In Russian).
6. Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V. Highway repair using fiber-containing asphalt concrete mixes with dispersed binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 4–5, pp. 62–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>
7. Andronov S.Yu., Artemenko A.A., Kochetkov A.V., Zadiraka A.A. Influence of method for basalt fibers introduction on physical-mechanical indicators of composite asphalt concrete mixes. *Stroitel'nye*

- товых волокон на физико-механические показатели композиционных асфальтобетонных смесей // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 71–73. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-71-73>
8. Воскоњян В.Г. Пути снижения загрязнения окружающей среды твердыми отходами // *Успехи современного естествознания*. 2006. № 9. С. 30–34.
 9. Пархоменко А.Ю., Минаков А.С., Кияшко И.В. Мониторинг состояния дорожной одежды как фактор снижения загрязнения окружающей среды // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2011. № 52. С. 31–34.
 10. Наволокина С.Н. Холодный асфальтобетон и добавки для его производства. В сб.: *Образование, наука, производство*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 688–691.
 11. Старовойтова И.А. Перспективы использования органоминеральных связующих в строительных материалах // *Строительные материалы*. 2007. Наука. № 10. С. 82.
 12. Горнаев Н.А., Евтеева С.М. Органоминеральные материалы с дисперсными вяжущими // *Фундаментальные исследования*. 2008. № 6. С. 77.
 13. Горнаев Н.А., Пыжов А.С., Андронов С.Ю. Цементобетон с дисперсным битумом // *Современные наукоемкие технологии*. 2009. № 9. С. 141–142.
 14. Пыжов А.С. Технология дорожного цементного бетона с дисперсным битумом // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2010. № 19 (38). С. 51–57.
 15. Левченко Е.С., Розенталь Д.А., Залищевский Г.Д. Дисперсная система битума и ее изменение при приготовлении асфальтобетона // *Журнал прикладной химии*. 2004. Т. 77. № 3. С. 521–522.
 16. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Процессы взаимодействия на границе раздела фаз «битум – дисперсная фаза из цементного камня» // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 6 (82). С. 60–67.
 17. Патент РФ № 2285707. Способ изготовления битумосодержащих смесей с минеральным компонентом / А.В. Светенко, К.М. Страчков, Н.А. Горнаев. Заявл. 16.05.2005. Опубл. 20.10.2006. Бюл. № 29.
 18. Андронов С.Ю. Технология дисперсно-армированного композиционного холодного щебеночно-мастичного асфальта // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 4. С. 67–71.
 19. Горнаев Н.А. Технология асфальта с дисперсным битумом. Саратов, 1997. 61 с.
 20. Горнаев Н.А., Калашников В.П. Эмульгирующая способность минеральных порошков // *Проблемы транспорта и транспортного строительства: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ*, 2004. С. 156–158.
- Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 7, pp. 71–73. (In Russian).
 8. Voskon'yan V.G. Ways to reduce environmental pollution with solid waste. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2006. No. 9, pp. 30–34. (In Russian).
 9. Parkhomenko A.Yu., Minakov A.S., Kiyashko I.V. Monitoring the status of pavement as a factor in reducing environmental pollution. *Vestnik of the Kharkov National Automobile and Highway University*. 2011. No. 52, pp. 31–34. (In Russian).
 10. Navolokina S.N. Cold asphalt concrete and additives for its production. *In the collection: Education, science, production*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2015, pp. 688–691. (In Russian).
 11. Starovoitova I.A. Prospects for the use of organic mineral binders in building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. Nauka. No. 10, pp. 82. (In Russian).
 12. Gornaev N.A., Evteeva S.M. Organomineral materials with dispersed binders. *Fundamental'nye Issledovaniya*. 2008. No. 6, p. 77. (In Russian).
 13. Gornaev N.A., Pyzhov A.S., Andronov S.Yu. Cement concrete with dispersed bitumen. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii*. 2009. No. 9, pp. 141–142. (In Russian).
 14. Pyzhov A.S. Technology of road cement concrete with dispersed bitumen. *Vestnik of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2010. No. 19 (38), pp. 51–57. (In Russian).
 15. Levchenko E.S., Rozental' D.A., Zalishchevskii G.D. Dispersion system of bitumen and its change in the preparation of asphalt concrete. *Zhurnal Prikladnoi Khimii*. 2004. Vol. 77. No. 3, pp. 521–522. (In Russian).
 16. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Interaction processes at the phase boundary “bitumen – dispersed phase of cement stone”. *Inzhenerno-stroitel'nyi Zhurnal*. 2018. No. 6 (82), pp. 60–67.
 17. Patent RF No. 2285707. Sposob izgotovleniya bitumosoderzhashchikh smesei s mineral'nyim komponentom [A method of manufacturing bitumen-containing mixtures with a mineral component]. A.V. Svetenko, K.M. Strachkov, N.A. Gornaev; Decl. 05.16.2005; Publ. 10.20.2006. Bull. No. 29. (In Russian).
 18. Andronov S.Yu. The technology of dispersed-reinforced composite cold crushed stone and mastic asphalt. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 4, pp. 67–71. (In Russian).
 19. Gornaev N.A. Tekhnologiya asfal'ta s dispersnym bitumom [Dispersed bitumen asphalt technology]. Saratov. 1997. 61 p.
 20. Gornaev N.A., Kalashnikov V.P. The emulsifying ability of mineral powders. *Problems of transport and transport construction: interuniversity scientific collection*. Saratov: SSTU. 2004, pp. 156–158. (In Russian).

21. Горнаев Н.А., Страчков К.М. Стабилизация битумных эмульсий на твердых эмульгаторах // *Проблемы транспорта и транспортного строительства: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ*, 2004. С. 164–167.
22. А.с. 883221 СССР. Способ приготовления битумоминеральной смеси / Горнаев Н.А., Калашников В.П., Иванов А.Ф.. 1981. Опубл. в Б.И. № 43.
23. Патент РФ № 2351703. Способ приготовления холодной органоминеральной смеси для дорожных покрытий / Горнаев Н.А., Никишин В.Е., Евтеева С.М., Андронов С.Ю., Пыжов А.С. Публикация патента 10.04.2009.
24. Патент РФ № 2662493 Способ получения битумной эмульсии и битумная эмульсия. Патентообладатель А.В. Кочетков. Опубл. 26.07.2018. Бюл. № 21.
25. Кочетков А.В. Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // *Транспортные сооружения*. 2018. № 4. DOI: 10.15862/15SATS418.
26. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong, Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. Vol. 3. Iss. 5, pp. 412–426. doi: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
27. Cheng Yongchun, Yu Di, Tan Guojin, Zhu Chunfeng. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber-diatomite-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles // *Materials*. 2018. No. 11. 2148. DOI: 10.3390/ma1112148.
28. Celauro C., Praticò F.G. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 245–253 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>
29. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure analysis of modified asphalt mixtures under freeze-thaw cycles based on CT scanning technology // *Applied Sciences*. 2018. 8(11):2191. DOI: 10.3390/app8112191.
30. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159, pp. 508–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
31. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement performance investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and basalt fiber composite modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles // *Applied Sciences*. 2018. 8(12):2581. DOI: 10.3390/app8122581.
21. Gornaev N.A., Strachkov K.M. Stabilization of bitumen emulsions on solid emulsifiers. *Problems of Transport and Transport Construction: Interuniversity Scientific Collection*. Saratov: SSTU. 2004, pp. 164–167. (In Russian).
22. Copyright certificate No. 883221 of the USSR. Sposob prigotovleniya bitumomineral'noi smesi [A method of preparing a bitumen-mineral mixture]. N.A. Gornaev, V.P. Kalashnikov, A.F. Ivanov. 1981. Publ. in B.I. No. 43. (In Russian).
23. Patent RF No. 2351703. Sposob prigotovleniya kholodnoi organomineral'noi smesi dlya dorozhnykh pokrytii. [A method of preparing a cold organic-mineral mixture for road surfaces]. Gornaev N.A., Nikishin V.E., Evteeva S.M., Andronov S.Yu., Pyzhov A.S. Publ. 04.10.2009. (In Russian).
24. Patent RF No. 2662493 Sposob polucheniya bitumnoi emul'sii i bitumnaya emul'siya [A method for producing a bitumen emulsion and a bitumen emulsion]. A.V. Kochetkov. Publ. 07.26.2018. Bull. No. 21. (In Russian).
25. Kochetkov A.V. Solid emulsifier bitumen suspension. *Transportnye Sooruzheniya*. 2018. No. 4. DOI: 10.15862/15SATS418.
26. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong, Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. Vol. 3. Iss. 5, pp. 412–426. doi: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
27. Cheng Yongchun, Yu Di, Tan Guojin, Zhu Chunfeng. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber-diatomite-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles. *Materials*. 2018. No. 11. 2148. DOI: 10.3390/ma1112148.
28. Celauro C., Praticò F.G. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170, pp. 245–253 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>
29. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure analysis of modified asphalt mixtures under freeze-thaw cycles based on CT scanning technology. *Applied Sciences*. 2018. 8(11):2191. DOI: 10.3390/app8112191.
30. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 159, pp. 508–516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
31. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement performance investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and basalt fiber composite modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles. *Applied Sciences*. 2018. 8(12):2581. DOI: 10.3390/app8122581.

Е.В. КОРОЛЕВ¹, д-р техн. наук (prorector.umn@spbgasu.ru);

А.Н. ГРИШИНА², канд. техн. наук (GrishinaAN@mgsu.ru);

А.М. АЙЗЕНШТАДТ³, д-р хим. наук (a.isenshtadt@narfu.ru)

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

³ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности

Представлены результаты анализа зависимости прочности от концентрации дефектов структуры композитов. Полученные результаты согласуются с концепцией разрушения материалов, предложенной Е.Е. Дамаскинской и А.Г. Кадомцевым и предусматривающей два этапа в эволюции трещин: первый этап – зарождение трещин с размерами, зависящими от параметров структуры материала, и второй этап – развитие характерных начальных трещин, способных к саморазвитию. Установлено, что фрактальная размерность, вычисляемая по результатам испытаний, позволяет провести анализ процессов структурообразования материала и оценить геометрическую размерность элементов характерных трещин в зависимости от концентрации дефектов структуры. Показано, что для материалов с малой концентрацией дефектов структуры фрактальная размерность может варьироваться в широком диапазоне значений, это свидетельствует о возможности реализации различных эволюционных маршрутов развития трещин. Для материалов с высокой концентрацией дефектов возможна реализация только одного сценария развития трещин. Предельная концентрация дефектов структуры равна 0,865, а максимальная чувствительность материала к концентрации дефектов структуры должна наблюдаться у материалов с прочностью 13,5% от максимальной прочности. Предложена зависимость для вычисления удельной объемной поверхностной энергии и методика определения распределения трещин по относительным характерным размерам при заданном значении фрактальной размерности.

Ключевые слова: строительный композит, структурообразование, трещинообразование, разрушение, эволюция трещин, поверхностная энергия, прочность, фрактальная размерность, параметры структуры, концентрация дефектов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта # FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Королев Е.В., Гришина А.Н., Айзенштадт А.М. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61>

E.V. KOROLEV¹, Doctor of Sciences (Engineering); A.N. GRISHINA², Candidate of Sciences (Engineering) (GrishinaAN@mgsu.ru);

A.M. AYZENSHTADT³, Doctor of Sciences (Chemistry) (a.isenshtadt@narfu.ru)

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005, Russian Federation)

² National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

³ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

Analysis of Structure Formation of Composites Using Fractal Dimension

The results of the analysis of the dependence of strength on the concentration of defects in the structure of composites are presented. The results obtained are consistent with the concept of material destruction proposed by E.E. Damaskinskaya and A.G. Kadomtsev, which provides for two stages in the evolution of cracks: the first stage is the origin of cracks with dimensions depending on the parameters of the material structure, and the second stage is the development of characteristic initial cracks capable of self – development. It is shown that the fractal dimension calculated from the test results makes it possible to analyze the processes of material structure formation and estimate the geometric dimension of the elements of characteristic cracks depending on the concentration of structural defects. It is shown that for materials with a low concentration of structural defects, the fractal dimension can vary in a wide range of values, which indicates the possibility of implementing various evolutionary routes of crack development. For materials with a high concentration of defects, only one crack development scenario can be implemented. The maximum concentration of structural defects is 0.865, and the maximum sensitivity of the material to the concentration of structural defects should be observed in materials with a strength of 13.5% of the maximum strength. A dependence for calculating the specific volume surface energy and a method for determining the distribution of cracks by relative characteristic dimensions for a given value of the fractal dimension are proposed.

Keywords: construction composite, structure formation, crack formation, fracture, crack evolution, surface energy, strength, fractal dimension, structure parameters, defect concentration.

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

For citation: Korolev E.V., Grishina A.N., Ayzenshtadt A.M. Analysis of structure formation of composites using fractal dimension. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 54–61. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-54-61>

Современные строительные материалы, как правило, обладают типичной композитной структурой, параметры которой могут варьироваться в широком диапазоне значений. Это справедливо по отношению как к геометрическим, так и к физико-химическим параметрам [1–7]. К геометрическим параметрам целесообразно отнести: вид, форму, размеры и распределение по размерам, а также шероховатость поверхности дисперсной фазы, толщину прослойки матричного материала¹, однородность распределения дисперсной фазы, протяженность (толщину), объемное распределение «пленочной» фазы матричного материала и т. д. [8–10]. К физико-химическим параметрам относят: адсорбционную и/или химическую активность дисперсной фазы, распределение продуктов взаимодействия матричного материала с дисперсной фазой на границе раздела и др. [1, 11].

Изменения, происходящие в структуре материала как под влиянием физического и/или физико-химического потенциала его компонентов, так и вследствие воздействия эксплуатационных факторов, называются структурообразованием [12, 13]. Целесообразно выделить два периода: этап формирования структуры материала, или этап начального структурообразования, и этап структурообразования в эксплуатационный период. Первый период является своеобразным этапом формирования потенциала материала (параметров структуры), который в эксплуатационный период расходуется на компенсацию внешних и внутренних воздействий (сохранение или изменение параметров структуры). При снижении потенциала до критических значений в материале могут возникать и развиваться трещины, которые достигнув критических размеров, приведут к разрушению изделия или конструкции.

В [14, 15] рассматривается два сценария развития трещины:

а) образование и развитие одной трещины. При этом материал может уже содержать трещину, ее развитие происходит при наступлении определенных условий, которые для хрупких материалов могут быть установлены по теории Гриффитса;

б) формирование трещины, разрушающей материал. Происходит посредством эволюционного развития и объединения трещин меньших масштабов (от микро- к макротрещинам).

В [16] показано, что при нагружении материала процесс разрушения протекает в две стадии:

– *первая стадия* – образование дефектов характерного размера, величина которого зависит от параметра структуры (характерного элемента структуры). При этом энергетический спектр сигналов акустической эмиссии имеет экспоненциальный вид. Образование дефектов характерного размера в объеме материала происходит хаотически;

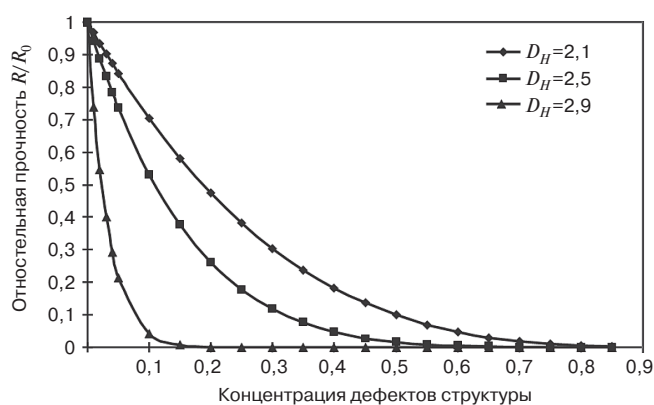


Рис. 1. Зависимости относительной прочности R/R_0 от концентрации дефектов v_h при различных значениях фрактальной размерности D_H
Fig. 1. Dependences of the relative strength R/R_0 on the concentration of defects v_h at different values of the fractal dimension D_H

– *вторая стадия* – образование опасных конфигураций дефектов характерного размера, способных к саморазвитию. Энергетический спектр сигналов акустической эмиссии при их формировании имеет степенной вид. Эти конфигурации могут являться зародышами очага разрушения.

Деформируемый материал, находящийся на второй стадии, переходит в состояние самоорганизованной критичности, при котором скейлинговое поведение системы (степенные распределения параметров) указывает на отсутствие характерных масштабов трещин [16].

Анализ уравнения прочности

Предварительно проведем формальный анализ общего уравнения прочности материала, имеющего следующий вид [17]:

$$R_c = R_0(1 - v_h)^t, \quad (1)$$

где R_0 – прочность плотного (бездефектного) материала; v_h – объемная доля пор и других дефектов, нарушающих объемную сплошность (структуру) материала; t – константа, рассчитываемая по формуле, принятой в [18]:

$$t = 3/(3 - D_H), \quad (2)$$

где D_H – фрактальная размерность; методика определения значений R_0 и D_H изложена в [19].

Естественно, что при увеличении концентрации дефектов прочность материала снижается (рис. 1). Причем на скорость снижения прочности:

$$\frac{dR_c}{dv_h} = -\frac{3R_0}{3 - D_H}(1 - v_h)^{D_H/(3 - D_H)} \quad (3)$$

существенное влияние оказывает величина фрактальной размерности D_H (рис. 2). Увеличение D_H приводит к значительному возрастанию скорости

¹ Здесь и далее будет применяться термин «матричный материал» как вещество, объединяющее в единое целое все компоненты материала, обеспечивающее его пространственную связность и участвующее в формировании эксплуатационных свойств материала.

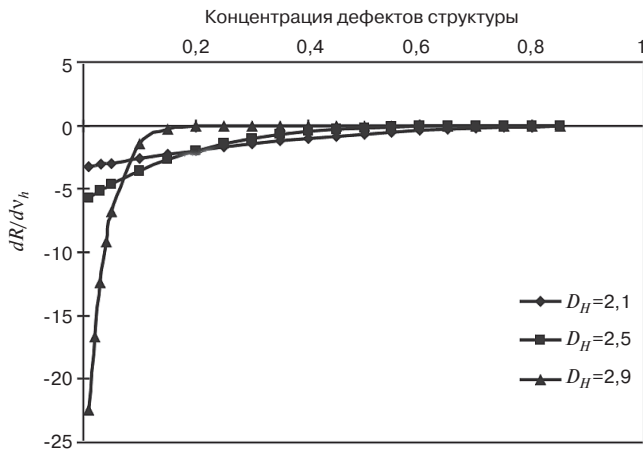


Рис. 2. Зависимость скорости изменения относительной прочности от концентрации дефектов v_h при различных значениях фрактальной размерности D_H
Fig. 2. Dependence of the rate of change in the relative strength on the concentration of defects v_h at different values of the fractal dimension D_H

снижения прочности. Так, в диапазоне изменения концентрации дефектов $v_h=0,01-0,1$ при $D_H=2,1$ скорость изменения относительной прочности составляет $\frac{d(R_c/R_0)}{dv_h}=0,65$, а при $D_H=2,9$ скорость $\frac{d(R_c/R_0)}{dv_h}=21$ (выше более чем в 30 раз). Однако с увеличением концентрации дефектов скорость снижения прочности уменьшается. Так, в диапазоне изменения концентрации дефектов $v_h=0,1-0,2$ при $D_H=2,9$ скорость изменения относительной прочности составляет $\frac{d(R_c/R_0)}{dv_h}=1,37$, а в диапазоне $v_h=0,5-0,85$ $\frac{d(R_c/R_0)}{dv_h}\approx 0,00$.

Анализ зависимости скорости изменения относительной прочности от фрактальной размерности:

$$\frac{dR_c}{dD_H} = \frac{3R_0}{(3-D_H)^2} (1-v_h)^{3/(3-D_H)} \ln(1-v_h) \quad (4)$$

позволяет выявить дополнительные особенности в изменении прочности (рис. 3). В частности, наличие на зависимостях $dR_c/dD_H=f(D_H)$ точек, для которых

$$\frac{d^2R_c}{dD_H^2} = 0, \quad (5)$$

указывающих на достижение максимальной скорости изменения прочности от фрактальной размерности (чувствительность прочности материала к изменению фрактальной размерности). Дальнейшее изменение фрактальной размерности сменяется уменьшением скорости снижения прочности. Абсцисса экстремума $dR_c/dD_H=f(D_H)$ определится из уравнения:

$$D'_H = 3 + \frac{3}{2} \ln(1-v_h). \quad (6)$$

Значения D'_H располагаются на кривой, убывающей при увеличении концентрации дефектов струк-

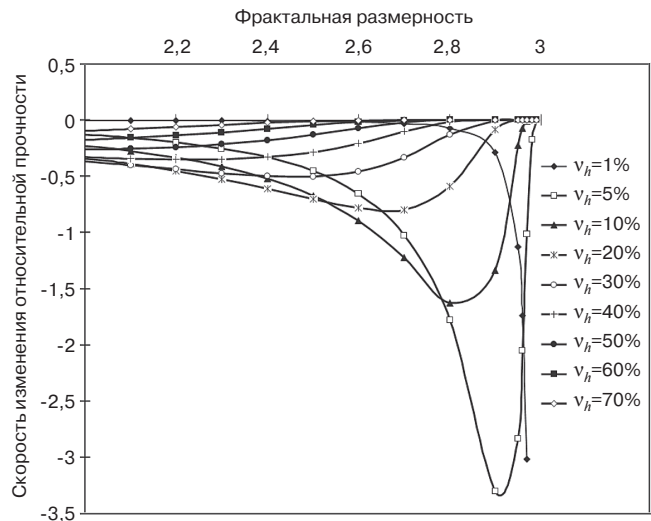


Рис. 3. Зависимость скорости изменения относительной прочности от фрактальной размерности D_H при различных концентрациях дефектов v_h
Fig. 3. Dependence of the rate of change in the relative strength on the fractal dimension D_H at various concentrations of defects v_h

туры (рис. 4). Указанная зависимость (6) демонстрирует, что максимальная чувствительность прочности материала к изменению фрактальной размерности будет определяться исключительно концентрацией дефектов, а их предельная концентрация определится при $D'_H=0$ и из формулы (6) будет равна:

$$v'_h = 1 - \exp(-2) = 0,865. \quad (7)$$

Кривая, представленная на рис. 4, демонстрирует также изменение геометрической размерности элементарных продуктов разрушения и, соответственно, границы концентрации дефектов структуры, при наличии которых материал обладает максимальной чувствительностью к изменению фрактальной размерности (см. таблицу). Под продуктом разрушения будем понимать геометрический элемент единичного акта разрушения, имеющего геометрическую размерность меньше евклидова пространства материала

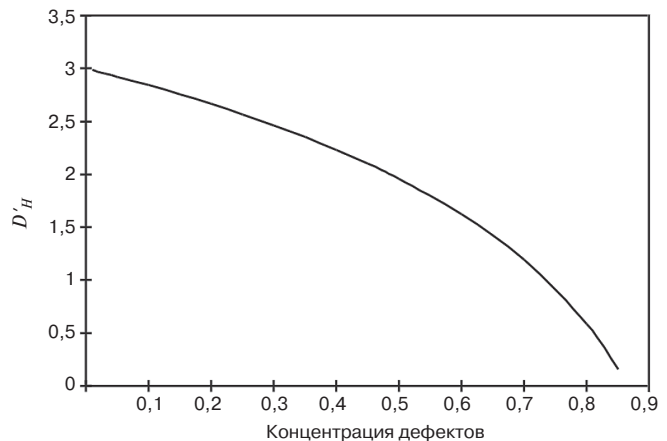


Рис. 4. Зависимость $D'_H=f(v_h)$
Fig. 4. Addition $D'_H=f(v_h)$

Диапазоны концентраций дефектов структуры и характерные формы продуктов разрушения
Concentration ranges of structural defects and characteristic forms of destruction products

Диапазон изменения фрактальной размерности D_H	Диапазон изменения концентрации дефектов структуры	Геометрический аналог продукта разрушения
2–3	0,001–0,486	Плоскость
1–2	0,486–0,736	Линия
0–1	0,736–0,865	Точка

или отдельного его структурного элемента (например, канала Плато–Гиббса для пен – аналога ячеистых материалов):

$$D_p = D_e - 1, \quad (8)$$

где D_e – евклидова размерность образца материала или его отдельного структурного элемента.

Данные таблицы демонстрируют, что продукты разрушения в виде элементарных плоскостей образуются при концентрации дефектов структуры не более $v_h=0,486$. Дальнейшее увеличение концентрации дефектов приводит к изменению геометрической формы продукта разрушения. При $v_h>0,736$ разрушение материала будет происходить посредством разрыва единичных контактов.

Максимальная чувствительность к изменению фрактальной размерности наблюдается только у материалов, для которых выполняется условие:

$$R_c = 0,135 R_0. \quad (9)$$

Данное условие получается при подстановке в уравнение (1) значений фрактальной размерности, вычисленных по формуле (6).

По зависимости $R_c=f(D_H)$ можно также оценить интервал варьирования величины фрактальной размерности при фиксированной концентрации дефектов структуры. Для этого предположим, что прочность материала может изменяться в некотором диапазоне:

$$\Delta R_c = k_R R_{c,0}, \quad (10)$$

где k_R – коэффициент ($k_R \leq 1$); $R_{c,0}$ – прочность материала при $k_R=1$.

Тогда диапазон изменения фрактальной размерности будет равен:

$$\Delta D_H = 1 - \frac{3}{3 + \frac{\ln(k_R)}{\ln(1 - v_h)}}. \quad (11)$$

Результаты расчетов, проведенных по формуле (11), представлены на рис. 5, из которых следует, что при небольших концентрациях дефектов структуры значение фрактальной размерности может быть в широком диапазоне.

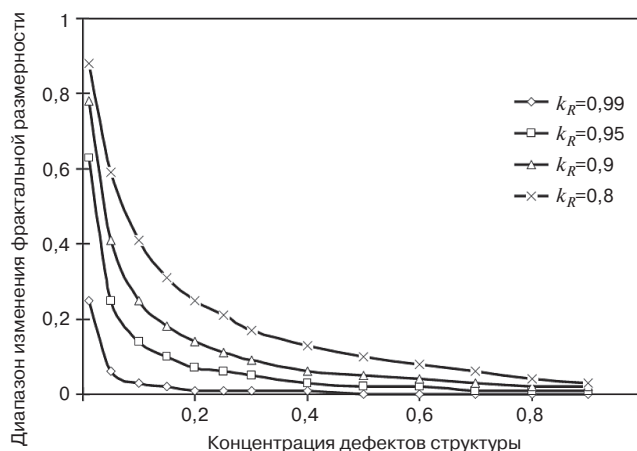


Рис. 5. Зависимость $\Delta D_H=f(v_h)$
Fig. 5. Dependence $\Delta D_H=f(v_h)$

С увеличением концентрации дефектов интервал варьирования фрактальной размерности существенно сокращается. На величину интервала варьирования фрактальной размерности закономерное влияние оказывает коэффициент k_R (рис. 5).

Таким образом, данные рис. 5 свидетельствуют о том, что при небольших концентрациях дефектов структуры концентрация и размер трещин могут находиться в широком диапазоне значений, т. е. в материале могут присутствовать трещины различных размеров, состоящие из элементарных ее элементов.

Для материалов с высокой концентрацией дефектов возможна реализация только одного сценария развития трещин.

Поверхностная энергия трещин

В работе [17] была представлена взаимосвязь между прочностью материала и поверхностной энергией дисперсных включений, входящих в его состав. Одним из основных выводов, полученных посредством анализа различных моделей дисперсных систем, являлось заключение об увеличении прочности материала с повышением поверхностной энергии. Естественно предположить, что аналогичное заключение верно и для рассматриваемой модели разрушения. Предположим, что зависимость прочности материала от площади образовавшихся трещин можно представить в виде:

$$R_c = a S_{cr}^\theta, \quad (12)$$

где a – константа; S_{cr} – площадь трещин; θ – показатель, зависящий от геометрических особенностей трещин.

Константу a можно определить, предполагая, что максимальная площадь трещин будет у материала, имеющего максимальную прочность, т. е.:

$$a = R_0 / S_{cr, \max}^\theta. \quad (13)$$

Отсюда после подстановки (13) в (12) и преобразования получим:

$$R_c = R_0 \left(\frac{S_{cr}}{S_{cr,max}} \right)^\theta \quad (14)$$

При естественном предположении о росте трещин между дефектами по кратчайшему пути очевидно, что с повышением концентрации дефектов v_h площадь трещин для формирования магистральной трещины будет закономерно уменьшаться. Отсюда можно принять:

$$\ln(1-v_h) = \ln(S_{cr}/S_{cr,max}), \quad (15)$$

следовательно:

$$\theta = t = 3/(3-D_H). \quad (16)$$

Отсюда окончательно получим зависимость прочности:

$$R_c = R_0 \left(\frac{S_{cr}}{S_{cr,max}} \right)^{3/(3-D_H)}. \quad (17)$$

Из формулы (17) выразим S_{cr} :

$$S_{cr} = S_{cr,max} \left(\frac{R_c}{R_0} \right)^{(3-D_H)/3}. \quad (18)$$

Площадь трещин можно выразить также через энергетические характеристики:

$$S_{cr} = \frac{E_{cr}}{e_s}, \quad (19)$$

где E_{cr} – поверхностная энергия; e_s – удельная поверхностная энергия, отнесенная к единице площади.

Также введем понятие плотности трещин – величину, характеризующую относительный объем, занимаемый трещинами, т. е.:

$$\rho_{cr} = \frac{S_{cr}\xi}{V_0}, \quad (20)$$

где ξ – условная толщина трещин; V_0 – объем материала.

Для материала с максимальной прочностью можно записать:

$$S_{cr,max} = \frac{V_0}{\xi_0}, \quad (21)$$

где ξ_0 – условная толщина трещин для материала с прочностью R_0 .

При этом естественно предполагается, что $\rho_{cr,max}=1$. Подставляя формулы (19) и (21) в формулу (18) и преобразуя относительно E_{cr} , получим:

$$E_{cr} = \frac{V_0}{\xi_0} e_s \left(\frac{R_c}{R_0} \right)^{(3-D_H)/3}. \quad (22)$$

Из теории размерностей известно, что давление P связано с энергией E и объемом V следующим образом:

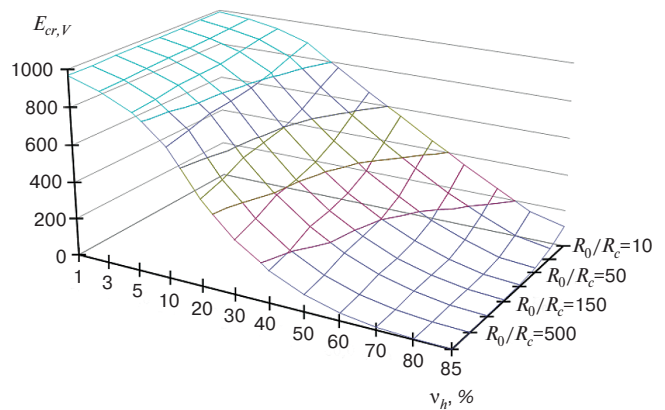


Рис. 6. Зависимость $E_{cr,V}$ от концентрации дефектов структуры
Fig. 6. Dependence of $E_{cr,V}$ on the concentration of structural defects

$$P = E/V. \quad (23)$$

Важной константой материала является прочность бездефектного материала R_0 , которая при использовании формулы (23) взаимосвязана с другими его константами следующим образом:

$$R_0 = \frac{e_s}{\xi_0}. \quad (24)$$

Подставляя формулу (24) в (22) и преобразуя ее относительно удельной поверхностной энергии – поверхностной энергии, отнесенной к единице объема, окончательно получим:

$$E_{cr,V} = R_0 \left(\frac{R_c}{R_0} \right)^{(3-D_H)/3}. \quad (25)$$

Формула (25) характеризует плотность поверхностной энергии образовавшихся трещин в единице объема материала.

Из формулы (25) следует, что удельная поверхностная энергия трещин с уменьшением прочности материала также снижается:

$$\frac{dE_{cr,V}}{d(R_0/R_c)} = -\frac{R_c}{3} (3-D_H) \left(\frac{R_c}{R_0} \right)^{(3-D_H)/3}. \quad (26)$$

Причем интенсивность этого процесса зависит от величины фрактальной размерности. Для материалов с фрактальной размерностью $D_H \rightarrow 3$ скорость изменения удельной поверхностной энергии трещин минимальна:

$$\lim_{D_H \rightarrow 3} \frac{dE_{cr,V}}{d(R_0/R_c)} = 0. \quad (27)$$

При фрактальной размерности $D_H < 3$ скорость изменения удельной поверхностной энергии трещин возрастает.

Для оценки влияния концентрации дефектов на плотность поверхностной энергии образовавшихся трещин воспользуемся формулой (6), по которой произведем расчет фрактальной размерности. Результаты расчета представлены на рис. 6.

Данные рис. 6 ожидаемо демонстрируют высокие значения удельной поверхностной энергии образовавшихся трещин для материалов, имеющих минимальную концентрацию дефектов структуры, а также малую значимость влияния для таких материалов степени отклонения их прочности от R_0 . Так, для материала с концентрацией дефектов $v_h=1\%$ относительное изменение $\delta E_{cr,V}$ составит всего 2,3% в диапазоне от $R_0/R_c=10$ до $R_0/R_c=1000$, а для материала с $v_h=30\%$ — $\delta E_{cr,V}=56\%$ в том же диапазоне изменения R_0/R_c . Причем с увеличением концентрации дефектов структуры относительное изменение поверхностной энергии $\delta E_{cr,V}$ также возрастает.

Формулу (25) с использованием (1) можно преобразовать к виду:

$$E_{cr,V} = R_0(1-v_h)^{3/(3-D_H)} \quad (28)$$

Из этой формулы получим:

$$D_H = 3 \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\ln(1-v_h)}{\ln(E_{cr,V}/R_0)}} \right) \quad (29)$$

Анализ формулы (29) указывает, что для каждого материала, имеющего дефекты структуры, величина удельной поверхностной энергии $E_{cr,V}$ всегда численно меньше R_0 .

Необходимо отметить принципиальную важность формулы (22). Данная формула устанавливает взаимосвязь между константами материала: R_0 , e_s и ξ_0 , которые характеризуют: механические свойства R_0 , энергетические характеристики вещества материала e_s и геометрические характеристики трещин ξ_0 , приведших к его разрушению. Последнюю константу можно также охарактеризовать как среднее расстояние между трещинами.

Методика определения R_0 представлена в [19]. Константу e_s можно определить на основе данных краевого угла смачивания берегов трещин, а константу ξ_0 — по формуле (24) после установления R_0 и e_s .

Определение распределения трещин по размерам

По величине фрактальной размерности, вычисленной по коэффициенту t , можно определить долю трещин и их относительный размер. Общее уравнение, устанавливающее взаимосвязь между относительным размером и долей структурных элементов соответствующего размера (трещин), имеет вид:

$$\ln(v_{cr}) = D_H \ln\left(\frac{L_{cr,max}}{l_{cr}}\right) + b, \quad (30)$$

где $L_{cr,max}$ — максимальный характерный размер трещины; v_{cr} — доля трещин с размером l_{cr} ; D_H — фрактальная размерность, определенная по результатам испытаний на прочность; b — константа.

Диапазон изменения характерных размеров трещин задается из физических условий: $L_{cr,max}$ — размер

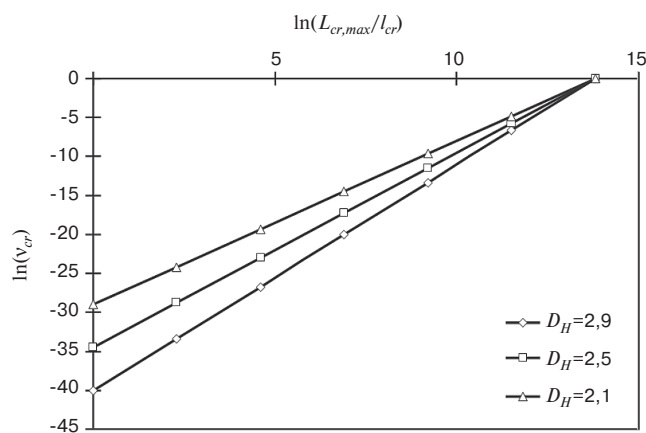


Рис. 7. Распределение трещин по относительным характерным размерам при различных значениях фрактальной размерности
Fig. 7. Distribution of cracks by relative characteristic sizes at different values of fractal dimension

образца (изделия), а $L_{cr,min}$ — характерный размер дефекта структуры. Для построения общего распределения $\ln(v_{cr}) = f(\ln(L_{cr,max}/l_{cr}))$ промежуточные значения $l_{cr,i}$ в диапазоне от $L_{cr,min}$ до $L_{cr,max}$ целесообразно задать с постоянным шагом ϵ :

$$\epsilon = \frac{L_{cr,max} - L_{cr,min}}{N}, \quad (31)$$

где N — задаваемое количество интервалов.

Значение $l_{cr,i}$ будет равно:

$$l_{cr} = L_{cr,min} + \epsilon \cdot i, \quad (32)$$

где i — номер интервала $i = 1, 2, 3 - N$.

Константа b принимает значения, при которых суммарная доля трещин равна:

$$\sum_i^N v_{cr,i} = 1. \quad (33)$$

Для диапазона изменения характерных размеров трещин: $L_{cr,min}=100$ нм и $L_{cr,max}=100$ мм, фрактальной размерности $D_H=2,1-2,99$ константу b можно вычислить по формуле:

$$b = -13,8195 \cdot D_H. \quad (34)$$

С учетом последней формулы билогарифмическое распределение можно преобразовать к виду:

$$\ln(v_{cr}) = D_H \left(\frac{L_{cr,max}}{l_{cr}} - 13,8195 \right). \quad (35)$$

Общий вид билогарифмического распределения трещин при различных значениях фрактальной размерности представлен на рис. 7.

Из данных рис. 7 следует, что основная доля трещин расположена в области малых характерных размеров и с повышением величины фрактальной размерности доля таких трещин существенно возрастает.

Таким образом, из представленной методики расчета распределения трещин по их относительным размерам следует, что при фрактальной размерности $D_H > 2$ для процесса разрушения материала характерно образование значительного количества микротрещин. Так как процесс разрушения является кинетическим процессом, указанные трещины объединяются в более крупные, которые в финале формируют магистральные трещины.

Обобщая результаты, представленные в [16], с предлагаемой методикой, за минимальный размер трещины можно принять характерный размер дефекта, величина которого определяется параметрами структуры материала.

Заключение

1. Из представленных результатов следует, что при наличии зависимости прочности материала от концентрации дефектов его структуры, подчиняющейся формуле (1), эволюция процесса разрушения хорошо описывается моделью, предложенной в [16]. Причем для материаловедца принципиально важным является первый этап — накопление трещин характерного размера, величина которого зависит от параметров структуры материала. Геометрическая размерность таких элементарных трещин зависит от концентрации дефектов (см. таблицу). Предельная концентрация дефектов структуры равна 0,865, а максимальная чувствительность к концентрации дефектов при прочности 13,5% — от максимальной прочности материала.

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Системный анализ в строительном материаловедении. М.: МГСУ, 2012. 432 с.
2. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Формализованное описание частных критериев строительных материалов // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 1 (42). С. 25–31.
3. Гарькина И.А., Данилов А.М. Методы системного анализа в проектировании композитов // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 1 (42). С. 63–68.
4. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Данилов А.М., Гарькина И.А. Управление свойствами композиционных материалов как сложных систем // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 35–43.
5. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Принципы системности и декомпозиции при разработке композитов // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 44–49.
6. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Краткий обзор аналитических методов синтеза сложных систем // *Региональная архитектура и строительство*. 2018. № 4 (37). С. 48–54.

При этом важно отметить, что для материалов с небольшой концентрацией дефектов фрактальная размерность может варьироваться в широком диапазоне значений, это свидетельствует о возможности реализации различных эволюционных маршрутов развития трещин (концентрация и размер трещин могут находиться в широком диапазоне значений), а для материалов с высокой концентрацией дефектов возможна реализация только одного сценария развития трещин.

2. На основе результатов экспериментальных исследований (прочности R_c и фрактальной размерности D_H) с применением константы R_0 предложена зависимость для вычисления удельной объемной поверхностной энергии $E_{cr,v}$, по величине которой можно рассчитать объемную долю разрушенного материала (этот параметр также представляет интерес для материаловедов).

3. Разработана методика определения распределения трещин по относительным характеристическим размерам при заданном значении фрактальной размерности. В данной методике за характерный минимальный размер трещины может быть принят характерный размер дефекта, величина которого определяется параметрами структуры материала. Представленные результаты расчетов показывают, что при фрактальной размерности $D_H > 2$ для процесса разрушения материала характерно образование значительного количества микротрещин, которые эволюционируют в более крупные с финальным образованием магистральной трещины.

References

1. Bazhenov Yu.M., Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Sistemnyj analiz v stroitel'nom materialovedenii [Systems analysis in construction materials science]. Moscow: MGSU. 2012. 432 p.
2. Budylyina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. Formalized description of building materials particular criteria. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2020. No. 1 (42), pp. 25–31. (In Russian).
3. Garkina I.A., Danilov A.M. Application of systems analysis for desing of composites. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2020. No. 1 (42), pp. 63–68. (In Russian).
4. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L., Danilov A.M., Garkina I.A. Composite materials as complex systems: control of properties. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2019. No. 3 (40), pp. 35–43. (In Russian).
5. Budylyina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M. Systems theory and decomposition during design of composites. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2019. No. 3 (40), pp. 44–49. (In Russian).
6. Garkina I.A., Danilov A.M., Korolev E.V. Brief review of analytical methods for the synthesis of complex systems. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2018. No. 4 (37), pp. 48–54. (In Russian).

7. Данилов А.М., Гарькина И.А. Концептуальные модели композитов как сложных систем: состояние и перспективы // *Региональная архитектура и строительство*. 2018. № 3 (36). С. 56–61.
8. Королев Е.В., Самошин А.П., Смирнов В.А., Королева О.В., Гришина А.Н. Методики и алгоритм синтеза радиационно-защитных материалов нового поколения. Пенза: ПГУАС, 2009. 132 с.
9. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. СПб.: Наука, 2012. 476 с.
10. Бобрышев А.Н. Козомазов В.Н., Лахно А.В., Тучков В.В. Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов. Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. 170 с.
11. Бudyлина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Сорокин Д.С. Синтез композитов: логико-методологические модели // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 5. С. 149–156.
12. Королев Е.В. Баженов Ю.М., Альбакасов А.И. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза–Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
13. Гришина А.Н., Королев Е.В. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения. М.: МГСУ, 2015. 224 с.
14. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
15. Иванова В.С., Закирничная М.М., Кузеев И.Р. Синергетика и фракталы. Универсальность механического поведения материалов. Ч. 1. Уфа: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т, 1998. 144 с.
16. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Особенности стадий процесса разрушения при деформировании гетерогенных природных материалов // *Вестник ТГУ*. 2015. Т. 20. Вып. 1. С. 77–84.
17. Гусев Б.В., Королев Е.В., Гришина А.Н. Модели полидисперсных систем: критерии оценки и анализ показателей эффективности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 31–39.
18. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков. М.: Химия, 1992. 252 с.
19. Королев Е.В., Гришина А.Н. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 1 (42). С. 5–15.
7. Danilov A.M., Garkina I.A. Conceptual models of composites as complex systems: current state and prospects. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2018. No. 3 (36), pp. 56–61. (In Russian).
8. Korolev E.V., Samoshin A.P., Smirnov V.A., Korolev O.V., Grishina A.N. Metodiki i algoritm sinteza radiacionno-zashchitnykh materialov novogo pokoleniya [Selection of algorithm for the synthesis of new-generation radiation-protective materials]. Penza: PGUAS. 2009. 132 p.
9. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomazov V.N. Fizika i sinergetika dispersno-neuporyadochennykh kondensirovannykh kompozitnykh sistem [Physics and synergistics of disperse disordered condensed composites]. St. Petersburg: Nauka. 2012. 476 p.
10. Bobryshev A.N. Kozomazov V.N., Lakhno A.V., Tuchkov V.V. Prochnost' i dolgovechnost' polimernykh kompozicionnykh materialov [Strength and durability of polymer composite materials]. Lipetsk: RPF "Yulis". 2006. 170 p.
11. Budylyina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M., Sorokin D.S. Synthesis of composites: models based on logical algorithms. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2014. No. 5, pp. 149–156. (In Russian).
12. Korolev E.V. Bazhenov Yu.M., Albasov A.I. Radiacionno-zashchitnye i himicheski stojkie sernye stroitel'nye materialy [Radiation-protective and chemically resistant sulphur building materials]. Penza-Orenburg: IPK OGU, 2010. 364 p.
13. Grishina A.N., Korolev E.V. Zhidkostekol'nye stroitel'nye materialy special'nogo naznacheniya [Special-purpose building materials based on liquid glass]. Moscow: Moscow State University, 2015. 224 p.
14. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Z., Oksogoev A.A. Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow: Nauka. 1994. 383 p.
15. Ivanova V.S., Zakirnichnaya M.M., Kuzeev I.R. Sinergetika i fraktaly. Universal'nost' mekhanicheskogo povedeniya materialov [Synergetics and fractals. The universal character of material's mechanics. Part 1]. Ufa: UGNTU. 1998. 144 p.
16. Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G. Features of the stages of the process of destruction during deformation of heterogeneous natural materials. *Vestnik TGU*. 2015. Vol. 20 (1), pp. 77–84. (In Russian).
17. Gusev B.V., Korolev E.V., Grishina A.N. Models of polydisperse systems: evaluation's criteria and analysis of performance factors. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2018. No. 8, pp. 31–39. (In Russian).
18. Uryev N.B., Potanin A.A. Tekuchest' suspensij i poroshkov [Fluidity of suspensions and powders]. Moscow: Himiya. 1992. 252 p.
19. Korolev E.V., Grishina A.N. Fractal dimension as a universal characteristic of material structure and strength parameters. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2020. No. 1 (42), pp. 5–15. (In Russian).

А.В. ЗАХАРОВ¹, канд. физ.-мат. наук (ralzax@yandex.ru),
У.Ш. ШАХАХМЕТОВ¹, д-р техн. наук (Rusairu@ufanet.ru);
Е.А. СИНИЦИНА², инженер (ассистент) (sinitsina.katy@yandex.ru),
И.В. НЕДОСЕКО², д-р техн. наук (nedoseko1964@mail.ru)
А.Н. ПУДОВКИН³, канд. техн. наук (11pk@rambler.ru)

¹ Башкирский государственный университет (450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32)

² Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

³ Оренбургский государственный университет, Кумертауский филиал (453300, г. Кумертау, Республика Башкортостан, 2-й Советский пер., 35)

Применение теории зернистой структуры в строительном материаловедении

Представлена феноменологическая квантовая теория, точные решения которой описывают скорость роста кристаллических зерен из расплава или раствора и зернистую структуру материала по его параметрам, температуре и давлению. Установлена связь температуры плавления и энергии активации с температурой отскока, при которой скорость кристаллизации максимальна. Показано, что одномерные молекулярные соединения не имеют зернистой структуры, а для двумерных и трехмерных кристаллических материалов получена формула зависимости размеров кристаллов от температуры и параметров материала. Выявлено, что со временем в зернистой структуре происходит рост кристаллических зерен при поглощении более мелких единичных зерен. Указан критерий максимальных размеров зерен, при котором дальнейший рост останавливается: поверхностная энергия поглощенного зерна становится больше изменения энергии электронной системы всего тела при поглощении одного зерна. Показано, что при увеличении размеров зерен уменьшается энергия связи атомов в межзернистой области, это приводит к потере прочности материалов – старению. Срок образования зерен максимальных размеров определяет время долговечности материалов, которое в первом приближении рассчитывается по формуле С.Н. Журкова. Указан метод определения степени старения материалов по размерам зерен. Данные теоретические результаты имеют важное практическое значение и получены впервые.

Ключевые слова: скорость роста кристалла, размеры кристаллического зерна, межзернистое пространство, энергия активации, температура отскока, закалка металлов, температура и время спекания.

Для цитирования: Захаров А.В., Шахаметов У.Ш., Синицина Е.А., Недосеко И.В., Пудовкин А.Н. Применение теории зернистой структуры в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2020. № 9. С. 62–68.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-62-68>

A.V. ZAKHAROV¹, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics) (ralzax@yandex.ru),
U.Sh. SHAYAKHMETOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (Rusairu@ufanet.ru); E.A. SINITSINA², Engineer (Assistant) (sinitsina.katy@yandex.ru),
I.V. NEDOSEKO², Doctor of Sciences (Engineering) (nedoseko1964@mail.ru); A.N. PUDOVKIN³, Candidate of Sciences (Engineering), (11pk@rambler.ru)
¹ Bashkir State University (32, Zaki Validi Street, Ufa, 450076, Russian Federation)
² Ufa State Petroleum Technical University (195, Mendeleeva Street, Ufa, 450080, Russian Federation)
³ Kumertau branch of Orenburg State University (3B, 2nd Lane Soviet, Kumertau, 453300, Russian Federation)

Application of the Theory of Granular Structure in Building Materials Science

A phenomenological quantum theory is presented, the exact solutions of which describe the growth rate of crystal grains from a melt or solution and the granular structure of the material according to its parameters, temperature and pressure. The relationship between the melting temperature and activation energy and the rebound temperature at which the crystallization rate is maximal is established. It is shown that one-dimensional molecular compounds do not have a granular structure, and for two-dimensional and three-dimensional crystalline materials, a formula for the dependence of crystal sizes on temperature and material parameters is obtained. It is revealed that over time, the growth of crystalline grains occurs in the granular structure when smaller individual grains are absorbed. The criterion of maximum grain sizes is specified, at which further growth stops: the surface energy of the absorbed grain becomes greater than the change in the energy of the electronic system of the entire body when one grain is absorbed. It is shown that as the grain size increases, the binding energy of atoms in the intergranular area decreases, which leads to a loss of strength of materials – aging. The period of formation of grains of maximum size determines the durability of materials, the time of durability of materials, which in the first approximation is found by the formula of S. Zhurkov. A method for determining the degree of aging of materials by grain size is specified. These theoretical results are of great practical importance and are obtained for the first time.

Keywords: crystal growth rate, crystal grain size, intergranular space, activation energy, rebound temperature, metal quenching, sintering temperature and time.

For citation: Zakharov A.V., Shayakhmetov U.Sh., Sinitsina E.A., Nedoseko I.V., Pudovkin A.N. Application of the theory of granular structure in building materials science. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 9, pp. 62–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-784-9-62-68>

В описании многих явлений в твердых материалах преимущественно используется классический подход. Рассматриваются расположение атомов, их диффузия, дефекты кристаллической решетки и дислокации. На таком классическом представлении не удастся теоретически описать зернистую структуру третьего уровня, которая играет главенствующую роль в таких важнейших свойствах конструктивных и строительных материалов, как твердость, упругость,

пластичность, прочность, долговечность. Ввиду особой важности зернистой структуры ее экспериментальному исследованию посвящено много работ во всех мировых центрах материаловедения металлов, керамики, пластмасс и органических нитевидных и кристаллических соединений [1–12]. Многие технологические процессы изготовления изделий при помощи термообработки и механической обработки направлены на изменение зернистой структуры в

целях повышения прочности материала и снятия внутренних напряжений для повышения долговечности. Для этих процессов важными являются значения температуры, давления, степени деформации, скорости процессов роста размеров зерен, времени воздействия, приводящие к оптимальным размерам зерен. Переход от классического рассмотрения к квантово-механическому волновому, основанному на уравнениях, описывающих состояние волновой функции, приводит к полной картине явления, которая согласуется с многочисленными экспериментальными данными, способен прогнозировать параметры явления и предсказывать новые явления, выпадающие ранее из рассмотрения. Таким примером служит теория теплоемкости Дебая, теория излучения черного тела Планка и многие другие, в которых классический подход не способен дать полную непротиворечивую картину явления.

Теория зернистой структуры

В представленной работе рассматривается волновая функция, имеющая спинорный, или кватернионный характер:

$$\psi = h_1 f_1 + h_2 f_2 + h_3 f_3, \quad (1)$$

где h_i – трехмерные спинорные матрицы или векторы кватернионного базиса; $f_i(x, y, z, t)$ – три действительные функции координат и времени.

По алгебраическим свойствам кватернионов или матриц типа матриц Дирака [13, 14] плотность вероятности как квадрат модуля волновой функции вычисляется:

$$\bar{\psi}\psi = \bar{f}_1 f_1 + \bar{f}_2 f_2 + \bar{f}_3 f_3, \quad (2)$$

где чертой обозначена сопряженная величина. Аналогично записывается квадратичная форма оператора энергии в дифференциальном или в матричном виде, когда матрицы взаимодействий приведены к диагональному виду:

$$\bar{\psi}\hat{a}\psi = \bar{f}_1 a_1 f_1 + \bar{f}_2 a_2 f_2 + \bar{f}_3 a_3 f_3 \quad (3)$$

и

$$\bar{\psi}\hat{b}\psi = \bar{f}_1 b_1 f_1 + \bar{f}_2 b_2 f_2 + \bar{f}_3 b_3 f_3. \quad (4)$$

Авторы предлагают следующие интерпретации теории. Выражение (2) дает плотность числа спаренных электронов, образующих химическую связь атомов или атомных комплексов в кристалле. В тех областях тела, где плотность максимальна, достигается наибольшая связность атомов и прочность материала. В областях с меньшей плотностью спаренных электронов будет наблюдаться меньшая степень химической связи и меньшая прочность тела и материал переходит из кристаллической фазы в стекловидную. В областях, где плотность электронных пар равна нулю, образуются участки с наименьшей степенью химической связи типа вандерваальсовых взаимодействий, где при нагрузках могут зарождаться трещины. Данное положение можно рассматривать как условие старения материалов.

Энергию Гиббса системы взаимодействующих в кристаллическом теле электронных пар по аналогии с теорией Гинзбурга – Ландау записываем в виде:

$$G = \frac{1}{2} \iiint dV \left[-\frac{\hbar^2}{2M} \bar{\nabla}\psi \nabla\psi - (T_c - T) \bar{\psi} \hat{a} \psi + \bar{\psi} \hat{b} \psi \right], \quad (5)$$

где три члена под интегралом определяют плотности кинетической энергии спаренных электронов, их собственной энергии и энергии связи с парами в других соседних узлах кристаллической решетки соответственно.

Из условия стремления свободной энергии Гиббса (5) к наименьшему значению вариационным методом получается уравнение (6), аналогичное уравнению Горькова [15] в теории сверхпроводимости в нестационарном случае:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2M} \Delta \psi - (T_c - T) \cdot (a_1 h_1 f_1 + a_2 h_2 f_2 + a_3 h_3 f_3) + 2(b_1 h_1 f_1^3 + b_2 h_2 f_2^3 + b_3 h_3 f_3^3) \quad (6)$$

и уравнению, аналогичному уравнению Гинзбурга–Ландау [14] в стационарном случае, в которое переходит уравнение (6) при $\frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$.

В уравнении (6) M – масса атомных комплексов кристалла. В качестве масштабного временного фактора служит коэффициент диффузии атомов из одной фазы в другую, и он в соответствии с экспериментами выражается в форме закона Аррениуса [11] с добавлениями С.Н. Журкова [16]:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q - \frac{1}{2} \sigma_i V}{RT}}. \quad (7)$$

В формуле (7) и далее σ_i – компонента тензора напряжений; ε_i – компонента тензора деформаций в главных осях; V – молярный объем; Q – энергия активации.

Воспользовавшись аналогией с теорией сверхпроводимости на том основании, что в ее основе на микроскопическом уровне лежит гамильтониан Н.Н. Боголюбова [17], который является универсальным для любых физических конденсированных систем и позволяет производить расчеты методом статистического среднего Н.Н. Боголюбова при любой по величине константе связи [18]. Воспользовавшись этой идеей, В.Г. Соловьев рассчитал многие свойства ядер, в которых, как оказалось, в теории и потом было обнаружено в экспериментах, существует кристаллическая ядерная материя и сверхтекучая [19]. В твердых телах обменная энергия ковалентных, ионных, металлических, водородных связей в тысячи раз превышает энергию дебаевских фононов, но структура гамильтониана Н.Н. Боголюбова сохраняется, как и уравнения Горькова и Гинзбурга–Ландау.

Решения уравнений и их интерпретация

В силу линейной независимости спинорных матриц или векторов базиса кватерниона, уравнение (6) распадается на три независимых уравнения для каждой функции $f_k(x, y, z, t)$, точное решение которых имеет вид:

$$f_i(x,y,z,t) = \frac{\sqrt{a_i(T_c - T)}}{\sqrt{8b_i}} (1 - \tanh(K_{ix}x + K_{iy}y + K_{iz}z - \omega t)). \quad (8)$$

Циклическая частота и модуль волнового вектора равны:

$$\omega = \frac{3}{4} a_i D (T_c - T), \quad K_i = \sqrt{\frac{a_i M (T_c - T)}{4h^2}}. \quad (9)$$

График волновой функции (8) представляет волну цунами. Крутой фронт движется в направлении волнового вектора \vec{K}_i с фазовой скоростью волны:

$$V_i = \frac{\omega}{k} = \frac{3hD_i \sqrt{a_i(T_c - T)}}{2\sqrt{M}}. \quad (10)$$

В соответствии с принятой нами интерпретацией максимальный уровень волны соответствует максимально связанному кристаллическому состоянию, а минимальный уровень – раствору, расплаву или стекловидному состоянию. При температуре T , меньшей температуры плавления T_c , фронт волны движется в сторону увеличения кристаллической фазы, а при ($T_c < T$) знак ($T_c - T$) в ω меняется и волна меняет направление в сторону увеличения фазы расплава и уменьшения кристаллической фазы. Каждое i -тое направление волнового вектора перпендикулярно кристаллической плоскости растущего зерна. Независимость уравнений, на которые распадается уравнение (6), означает независимость роста кристаллической грани зерна от роста сопряженных граней. Это обеспечивает форму растущего кристалла в зависимости от скоростей его роста V_i в направлениях \vec{K}_i .

Отметим, что в формуле скорости кристаллизации (10) имеется коэффициент диффузии, который устанавливает соответствие с законом скорости химических реакций Аррениуса [11], а радикал $\sqrt{(T_c - T)}$ устраняет ее противоречие, которое состоит в неспособности формулы Аррениуса сменить экспоненциальный рост на снижение до нуля скорости кристаллизации, когда температура приближается к температуре плавления. Это очевидно обеспечивает радикал, а также существование температуры отскока T_j , при которой скорость достигает максимальных значений. Радикал напрашивался как в формуле для скорости роста кристаллического зерна, так и в формуле долговечности С.Н. Журкова. Многие авторы приписывали его, не давая каких-либо теоретических обоснований. Так, его приписывали к коэффициенту диффузии, что вступало в противоречие с экспериментом, поскольку коэффициент диффузии с ростом температуры только возрастает. В представленном подходе радикал возник из-за члена, описывающего энергию спаренных в химической связи электронов, и ясно, что с ростом температуры связь разрывается и энергия связи пары стремится к нулю. Продemonстрируем изложенное графиком, построенным по формуле (10) (рис. 1).

На рис. 1 по оси абсцисс отложена температура, а по оси ординат отложена скорость кристаллизации. Более высокий график отвечает скорости кристаллизации под давлением в 1000 ат, нижний график от-

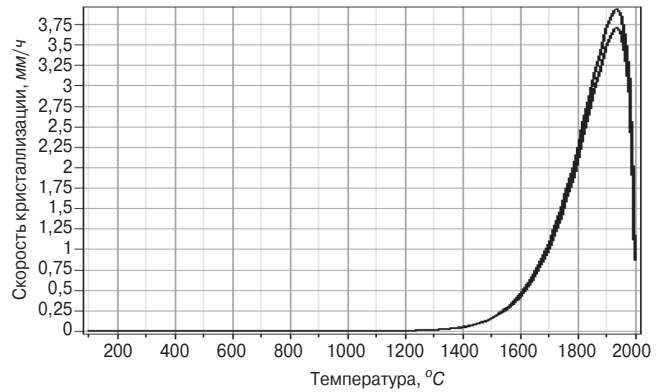


Рис. 1. Графики зависимости скорости кристаллизации от температуры, построенные по формуле (10)

Fig. 1. Graphs of the dependence of the crystallization rate on temperature, built by the formula (10)

вечает атмосферному давлению. Параметры формулы (10) соответствуют корунду.

Графики рис. 1 показывают экспоненциальный рост скорости кристаллизации, соответствующий формуле Аррениуса, достижение максимальной скорости роста при температуре отскока T_j и снижение скорости роста кристалла при приближении к температуре плавления T_c .

Формула (10) позволяет найти температуру отскока T_j :

$$T_j = \frac{1}{2R} (\sqrt{Q^2 + 4RQT_c} - Q) \quad (11)$$

и с учетом кристаллизации под давлением:

$$T_j = \frac{1}{2R} (\sqrt{4Q^2 - 4Q\sigma\varepsilon V + (\sigma\varepsilon V)^2 + 4RT_c(2Q - \sigma\varepsilon V)} - (2Q - \sigma\varepsilon V)). \quad (12)$$

Формула (11) соответствует экспериментальным данным для полимеров, металлов, керамики. Обратная к (11) функция:

$$Q = \frac{RT_j^2}{2(T_c - T_j)} \quad (13)$$

позволяет вычислить энергию активации по температуре плавления T_c и температуре отскока T_j . Формула (13) позволяет находить трудно измеряемую энергию активации простым измерением температуры при максимальной скорости роста кристалла, а температура плавления для многих материалов известна или ее можно замерить, повышая температуру до обнуления скорости роста кристалла. Обе температуры близки, как показывает график рис. 1.

Уникальным является точное решение стационарного уравнения (6):

$$f_n(x) = k_n \sqrt{\frac{y\Delta T}{(k_n^2 + 1)}} \text{JakobiSN}(K_n(x - x_0), k_n). \quad (14)$$

В формуле (14) волновая функция стационарного состояния в одном из независимых кристаллических направлений выражается через функцию синус Якоби и задает зернистую структуру материала как периодическая функция волновой вектор

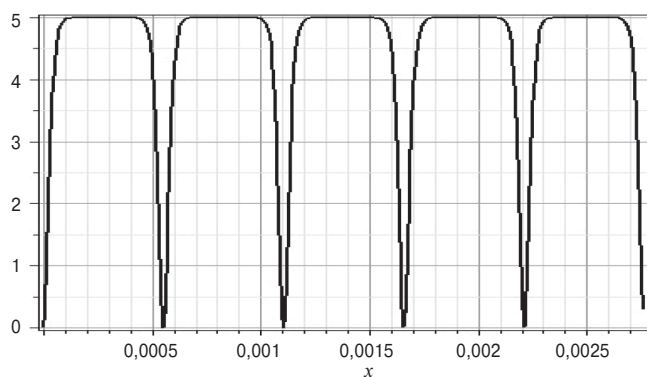


Рис. 2. Энергия связи в одномерном зернистом кристалле
Fig. 2. Binding energy in a one-dimensional granular crystal

$K_n = \frac{\sqrt{2M}}{h} \sqrt{\frac{a\Delta T}{1+k_n^2}}$, второй аргумент функции синус Якоби, имеющий смысл степени сжатия эллипса:

$$K_n = \frac{C_n}{\sqrt{-1+y\Delta T}}, \quad (15)$$

где обозначено: $y=a/b$; $\Delta T=T_c-T$; C_n и x_0 – постоянные интегрирования. Постоянная x_0 согласует систему координат с текстурой материала. Постоянная C_n , не зависящая от свойств материала, выполняет роль квантовой постоянной одновременно с параметром сжатия эллипса k_n . Динамика квантовой системы заключается в квантовых переходах от одного состояния с параметром k_n к состоянию (14) с другим значением k . Графики зернистой структуры в одномерном случае нитевидного кристалла как решения (14) приведены на рис. 2.

График рис. 2 показывает, что в одномерном кристалле энергия связи в межзернистом пространстве достигает нулевого значения. Это означает, что одномерных поликристаллических (зернистых) материалов не бывает. Зерна распадаются на единичные, что соответствует теореме Н.Н. Боголюбова [6]. Могут быть длинные многоатомные молекулы, для которых параметр $k_1=1$, состоящие только из одного зерна. Этот вывод важен для технологии производства волокон из расплава стекла или других неорганических минералов. Очень тонкие волокна будут разрываться на зерна при отклонении параметра k_1 от единицы, а формула (15) показывает, за счет чего это происходит – за счет незначительных колебаний температуры от сквозняка или вентилятора.

Уникальность формулы (14) не только в том, что она показывает существование зернистой структуры как фундаментального свойства материалов, показывает степень кристаллизации в зерне и в межзернистом пространстве, от которой зависит прочность материалов, но и в том, что она позволяет получить формулу для размеров зерен в зависимости от параметров материала, температуры, давления и времени существования материала в тех или иных условиях. Как известно, половина периода синуса равна π . При изменении угла на π дуга сопряженного эллипса в функции *JacobiSN*(U, k) с

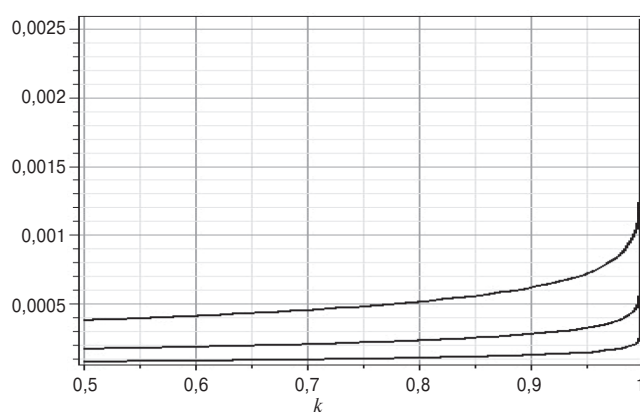


Рис. 3. Графики зависимости размера зерна от квантового числа при различной температуре

Fig. 3. Graphs of the dependence of the grain size on the quantum number at different temperatures

единичной полуосью и степенью сжатия эллипса k_n будет равна $U=2\text{EllipticK}(k)$ [19]. Делим этот отрезок на масштабный фактор для наших координат, как-то является волновой вектор, и находим период в наших координатах:

$$L_n = \frac{U_k}{K_k} = \frac{2h\text{EllipticK}(k_n)}{\sqrt{2Ma\Delta T} \sqrt{1+k_n^2}}. \quad (16)$$

Так как между границами тела может располагаться целое число зерен, то условие квантования имеет вид:

$$n = \frac{l}{L(k)}, \quad (17)$$

где l – длина образца; $L(k)$ – размер зерна; n – целое число.

Постоянная Планка в формуле (16) подчеркивает квантовый волновой характер образования зернистой структуры и дает полный квантовый набор размеров зерен данного образца в зависимости от его параметров a и b , температуры плавления и внешней температуры, а также от размеров образца. На практике зерна принимают один размер или некоторый набор размеров и стремятся к состоянию с большим размером зерен и меньшему их числу, что связано со стремлением к состоянию с наименьшей энергией Гиббса электронной системы всего образца. Для наглядности покажем графики функций (16) и функционала (5) на функциях (14) в зависимости от квантового числа k_n .

На графиках показаны размеры зерен при различной температуре. При уменьшении параметра $a\Delta T$ размеры зерен увеличиваются незначительно. Но при приближении k к единице размеры зерен очень быстро и чувствительно на отклонение k от единицы увеличиваются.

Энергетические и квантовые условия роста зерен

Энергия Гиббса (5) на функциях (14) находится по простой формуле:

$$G = -\frac{V}{b} \frac{(ka\Delta T)^2}{(1+k^2)^2}. \quad (18)$$

Ее график показан на рис. 4.

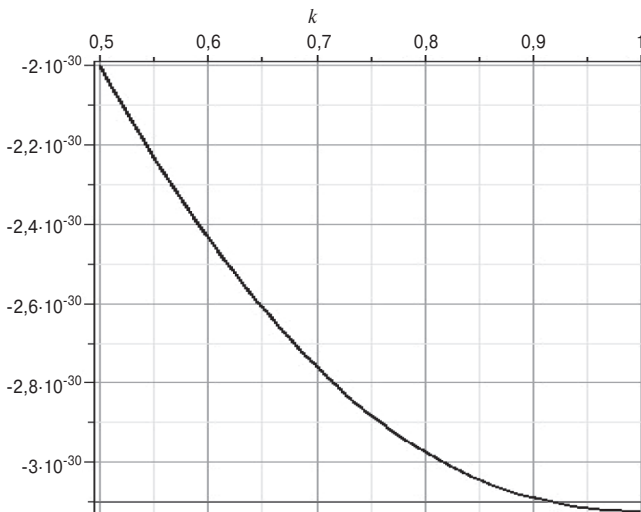


Рис. 4. График зависимости энергии Гиббса спаренных электронов от квантового числа k
 Fig. 4. Graph of the dependence of the Gibbs energy of paired electrons on the quantum number k

На рис. 4 по оси ординат отложены значения энергии Гиббса в Дж спаренных электронов железа при температуре 1000°C в тонком стержне длиной 10^{-3} м. По оси абсцисс отложены значения квантового числа k . При других температурах мы получаем подобный график, но расположенный выше по мере повышения температуры тела, т. е. при повышении температуры энергия связи понижается для всех квантовых чисел k .

Можно заметить, что темпы понижения энергии Гиббса при увеличении k и размеров зерен соответственно примерно одинаковые до значений $k < 0,8$. Но при приближении к единице темпы падают до нуля. Как известно, именно градиент термодинамического потенциала служит термодинамическими силами. Это проявляется в том, что скорость роста зерен в зернистой структуре тела отличается от скорости роста зерна из расплава или раствора, может в режиме малых значений квантового числа k повторять закономерности роста одиночного зерна. Но при приближении квантового числа к единице рост зерен в зернистой структуре замедляется и останавливается при некотором предельном значении квантового числа и размеров зерен, хотя единичное зерно продолжало бы быстрый рост.

Рост зерен сопровождается выходом хотя бы одного зерна, а точнее, его поверхностной энергии за пределы тела. Ситуация напоминает мыльные пузыри, заполняющие некоторый объем. Когда один пузырек лопаются, его объем занимают другие пузырьки, увеличившие свой размер.

Пусть поверхностная энергия ушедшего зерна ΔE_k , где k – квантовое число. При увеличении квантового числа и уменьшении числа зерен на единицу длины тела соответствующая выходу одного зерна энергия Гиббса тела изменится на величину:

$$\Delta G_n = G(k_n) - G(k_{n-1}). \quad (19)$$

Рост зерен возможен, пока:

$$|\Delta G_n| > |\Delta E_{k_n}|. \quad (20)$$

Условие (20) определяет равновесную зернистую структуру и максимальные размеры монокристалла. Величины формулы (20) вычисляются в рамках развиваемой в данной работе теории:

$$\Delta G_n = -\frac{a^2 \Delta T^2}{b} V^3 \frac{(1-k_{n+1}^2 k_n^2)}{(1+k_{n+1}^2)^2} \frac{(k_{n+1}^2 - k_n^2)}{(1+k_n^2)^2}. \quad (21)$$

Упростим задачу вычисления поверхностной энергии допущением, не меняющим сущности и близким к истине, о том, что толщина поверхностного слоя составляет 0,1 от размера зерна и зерно кубической формы с шестью гранями. Тогда:

$$\Delta E_n = -0,6 \frac{a^2 \Delta T^2}{bn^3} V^3 \frac{k_n^2}{(1+k_n^2)^2}. \quad (22)$$

Рост зерен сопровождается приближением квантового числа k к 1 и уменьшением числа зерен n на исследуемом отрезке материала. Тогда условие максимальных размеров зерен (20) принимает вид:

$$(1-k_n)(k_{n+1}-k_n)^2 \geq \frac{0,6}{n^3}. \quad (23)$$

Для решения неравенства (23) используем формулы (16) и (17) и перепишем условие квантования в виде:

$$L_n = \sqrt{1+k_n^2} \text{EllipticK}(k_n) = \frac{l}{M(a, \Delta T)n}. \quad (24)$$

В уравнении (24) l – длина участка исследуемого образца, содержащего 10–20 зерен; $M(a, \Delta T) = \frac{2h}{\sqrt{2Ma\Delta T}}$ – масштабный фактор материала; правая часть уравнения безразмерная и подходит для любого материала; L_n – безразмерная длина зерна. Длина зерна в материале находится умножением безразмерной длины на масштабный множитель $M(a, \Delta T)$.

Обратная к (24) функция с высокой точностью задается полиномом:

$$k_n = -3,221521615 + 2,165071851 \cdot L_n - 0,4854802094 \cdot L_n^2 + 0,06045612008 \cdot L_n^3 - 0,004377145111 \cdot L_n^4 + 0,0001735373629 \cdot L_n^5 - 0,0000022635458 \cdot L_n^6. \quad (25)$$

По второму равенству (24) выражаем приведенный размер зерна через длину образца и число зерен вдоль оси измерения n , которое и квантует квантовые числа по формуле (25). Получив таким образом таблицу квантовых чисел k_n , мы проверяем условие на максимальные размеры через сравнение энергий по формулам (21) и (22) или по упрощенной формуле (23). Так, для железа при температуре 1435°C в образце длиной $2 \cdot 10^{-3}$ м мы получаем следующие результаты, представленные в таблице.

Рассматривая в таблице баланс энергии, мы замечаем, что переход от 12 зерен на 2 мм в состояние с 11 зернами на 2 мм возможен, а переход от 11 зерен к 10 зернам на 2 мм становится невозможным. Таким

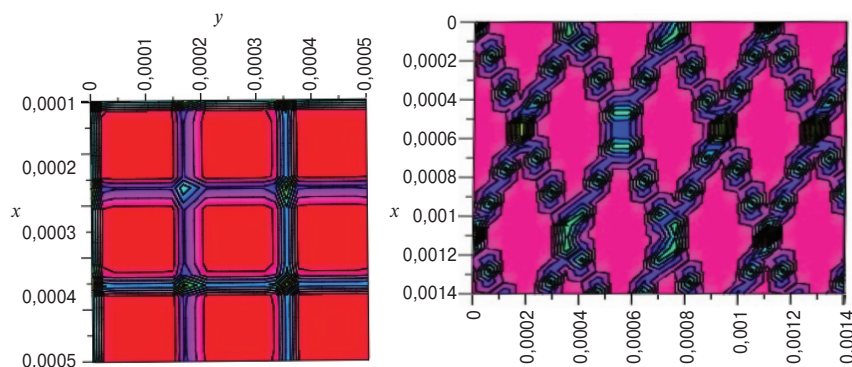


Рис. 5. Двумерная зернистая структура, предписываемая теорией
Fig. 5. Theory prescribed two-dimensional granular structure

образом, максимально возможные размеры зерен у железа при указанной температуре составляют в диаметре 0,01818 мм.

Двумерные кристаллы

Для двумерных зернистых структур теория позволяет получать картины при различных симметриях кристаллов, температурах и квантовых числах.

Важной особенностью, которую предписывает теория, является отличие от нуля энергии связи в межзернистой области. Она достигает 60% от максимальной в кристаллите при мелкозернистой структуре и малых значениях квантового числа. Но по мере роста зерен падение энергии связи в межзернистой области увеличивается и для максимальных размеров достигает критических значений, приводящих к снижению прочности материала до критических значений. Таким образом, по замерам размеров зерен можно судить об усталости материалов и их долговечности. Кроме того, в междоузлии зерен и особенно при низкой симметрии кристаллов наблюдаются каверны. На рис. 5 каверны отмечены светлой окраской.

Заключение

Теория показала свои возможности и соответствие экспериментам при описании зернистой структуры материалов. Показано, что для описания такого важного для практики свойства материалов,

Список литературы

1. Андрианов Н.Т., Лукин Е.С. Термическое старение керамики. М.: Металлургия, 1979. 100 с.
2. Бакунов В.С., Беляков А.В., Лукин Е.С., Шаяхметов У.Ш. Оксидная керамика: спекание и ползучесть. М.: Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 582 с.
3. Бакунов В.С., Лукин Е.С. Интенсификация процесса спекания поликристаллической оксидной керамики // *Новые огнеупоры*. 2015. № 6. С. 32–36.
4. Belyakov A.N., Kaybyshev R.O. Two types of grain boundaries in deformed materials // *Materials Science Forum*. 1996, pp. 207–209.
5. Kaybyshev R., Galiyev A., Sitdikov O. On the possibility of producing a nanocrystalline structure in

Изменение размеров зерен при поглощении одного из них Change in grain size upon absorption of one of them

Число зерен в образце	Квантовое число	Баланс энергии в безразмерном виде	Размер зерна в миллиметрах
9	0,9929243	-0,000166989172	0,222
10	0,9857614	-0,000038935861	0,2
11	0,9748294	0,0001489315111	0,1818
12	0,9596336	0,00044503196	0,16667

как его зернистость, нужны новые термодинамические параметры a и b , которые непосредственно проявляются в зернистой структуре и прочности материалов. Ситуация аналогична той, которая возникла, когда Ван-дер-Ваальсом было получено уравнение состояния реальных газов. С тех пор для всех газов в справочных таблицах появились постоянные Ван-дер-Ваальса a и b или критические параметры, выражающиеся через них. Предлагаемая теория показывает, как при исследовании зернистой структуры можно находить ее параметры. Так, параметр a входит в масштабный фактор и его можно вычислять по максимальным размерам зерна при заданной температуре. Формула энергии Гиббса (18) показывает, что конденсированная электронная система зернистой структуры ведет себя как система с одной или тремя степенями свободы и имеет соответствующую малую теплоемкость, которую трудно измерить. Но параметр b входит в амплитуду волновой функции и отражается на прочностных свойствах материалов. Авторы надеются, что идеи работы позволят по-новому рассматривать роль зернистой структуры и включить ее свойства в прогнозирование новых материалов и технологий, в оценку прочностных свойств и долговечности, создать простые методы неразрушающего контроля путем измерения зернистой структуры и сравнения с предсказаниями теории.

References

1. Andrianov N.T., Lukin E.S. Termicheskoe starenie keramiki [Thermal aging of ceramics] Moscow: "Metallurgy". 1979. 100 p.
2. Bakunov V.S., Belyakov A.V., Lukin Ye.S., Shayakhmetov U.Sh. Oksidnaya keramika: spekanie i polzuchest' [Oxide ceramics: sintering and creep.] Moscow: Publishing Center of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. 2007. 582 p.
3. Bakunov V.S., Lukin Ye.S. Intensification of the sintering process of polycrystalline oxide ceramics. *Noviye Ogneupory*. 2015. No. 6, pp. 32–36. (In Russian).
4. Belyakov A.N., Kaybyshev R.O. Two types of grain boundaries in deformed materials. *Materials Science Forum*. 1996, pp. 207–209.

- magnesium and magnesium alloys // *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6. Iss. 5–8, pp. 621–624 [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00135-2)
6. Belyakov A., Kaibyshev R. Structural changes of ferritic stainless steel during severe plastic deformation. *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6. Iss. 5–8, pp. 893–896. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00203-0](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00203-0)
 7. Belyakov A., Kaibyshev R. Effect of deformation mechanisms on dynamic recrystallization of ferrite stainless steel. *Key Engineering Materials*. 1995. Vol. 97–98, pp. 425–430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.97-98.425>
 8. Валиев Р.З., Кайбышев О.А., Корзников А.В., Столяров В.В. Структурные изменения при отжиге и последующей горячей деформации сплавов Fe-Cr-Co // *Известия АН СССР. Металлы*. 1988. № 2. С. 121.
 9. Андриевский Р.А. Термическая стабильность наноматериалов // *Успехи химии*. 2002. Т. 71. № 10. С. 967–981.
 10. Троснікова І.Ю., Лобода П.І., Карасевська О.П. Вплив методу отримання евтектичного сплаву системи WC–W₂C, легованого молібденом, на його структуру та властивості // *Порошкова металургія*. 2019. № 01/02. С. 48–56 <http://www.materials.kiev.ua/article/2789>
 11. Gottshain Gunter. Physical foundations of materials science. Springer Verlag. 2009. 400 p.
 12. Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Комохов П.Г. и др. Особенности структурообразования высокопрочного цементного камня в условиях длительного твердения // *Строительные материалы*. 2003. № 10. С. 42–43.
 13. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984. 604 с.
 14. Фаддеев Д.К. Лекции по алгебре: Учебное пособие для вузов. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 416 с.
 15. Горьков Л.П. Микроскопический вывод уравнений Гинзбурга–Ландау в теории сверхпроводимости // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1959. Вып. 36 (6). С. 1918–1923.
 16. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // *Физика твердого тела*. 1980. Т. 22. № 11.
 17. Боголюбов Н.Н. К вопросу о модельном гамилтониане в теории сверхпроводимости: Избранные труды. Т. 3. Киев: Наукова думка, 1971. 485 с.
 18. Боголюбов Н.Н. Сверхтекучесть и квазисредние в задачах статистической механики // *Теоретическая и математическая физика: Сборник обзорных статей 3. К 50-летию института. Тр. МИАН СССР*. 1986. С. 4–46.
 19. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. М.: Наука, 1971. 560 с.
 20. Бейтмен Г., Эрдейи А., Высшие трансцендентные функции / Пер. с англ. Н.Я. Виленкина. М.: Наука, 1967. 345 с.
 5. Kaybyshev R., Galiyev A., Sitdikov O. On the possibility of producing a nanocrystalline structure in magnesium and magnesium alloys. *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6. Iss. 5–8, pp. 621–624. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00135-2)
 6. Belyakov A., Kaibyshev R. Structural changes of ferritic stainless steel during severe plastic deformation. *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6. Iss. 5–8, pp. 893–896. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00203-0](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00203-0)
 7. Belyakov A., Kaibyshev R. Effect of deformation mechanisms on dynamic recrystallization of ferrite stainless steel. *Key Engineering Materials*. 1995. Vol. 97–98, pp. 425–430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.97-98.425>
 8. Valiyev R.Z., Kaybyshev O.A., Korznikov A.V., Stolyarov V.V. Structural changes upon annealing and subsequent hot deformation of Fe–Cr–Co alloys. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1988. No. 2, p. 121. (In Russian).
 9. Andriyevskiy R.A. Thermal stability of nanomaterials. *Uspekhi khimii*. 2002. Vol. 71. No. 10, pp. 967–981. (In Russian).
 10. Trosnikova I.Y., Loboda P.I., Karasevskaya O.P. Influence of the method of obtaining eutectic alloy of WC–W₂C system doped with molybdenum on its structure and properties. *Poroshkova Metalurhiya*. 2019. No. 01/02, pp. 48–56. (In Ukraine).
 11. Gottshain Gunter. Physical foundations of materials science. Springer Verlag. 2009. 400 p.
 12. Babkov V.V., Sakhigareyev R.R., Komokhov P.G. and other. Features of structure formation of high-strength cement stone under conditions of long-term hardening. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2003. No. 10, pp. 42–43. (In Russian).
 13. Bogolyubov N.N., Shirkov D.V. Vvedeniye v teoriyu kvantovannykh poley [Introduction to the theory of quantized fields]. Moscow: Nauka. 1984. 604 p.
 14. Faddeyev D.K. Lektsii po algebre: Uchebnoye posobiye dlya vuzov [Algebra Lectures: Textbook for High Schools] Moscow: Nauka. 1984. 416 p.
 15. Gor'kov L.P., Microscopic derivation of the Ginzburg–Landau equations in the theory of superconductivity. *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*. 1959. Vol. 36 (6), pp. 1918–1923. (In Russian).
 16. Zhurkov S.N. K voprosu o fizicheskoy osnove prochnosti. *Fizika Tverdogo Tela*. 1980. Vol. 22. No. 11. (In Russian).
 17. Bogolyubov N.N. K voprosu o model'nom gamil'toniane v teorii sverkhprovodimosti. *Izbrannyye trudy*. Vol. 3. Kiyev: Naukova dumka. 1971. 485 p.
 18. Bogolyubov N.N. Superfluidity and quasi-averages in problems of statistical mechanics. *Theoretical and mathematical physics, Collection of review articles 3. To the 50th anniversary of the institute. Proceedings of Steklov Mathematical Institute of the USSR*. 1986, pp. 4–46. (In Russian).
 19. Solov'yev V.G. Teoriya slozhnykh yader [Complex nuclei theory]. Moscow: Nauka. 1971. 560 p.
 20. Beytmen G., Erdeyi A., Vysshiey transtsendentnyye funktsii [Higher transcendental functions]. Transl. from English by Vilenkina N.Ya. Moscow: Nauka. 1967. 345 p.

100+ TECHNO BUILD

VII Международный строительный форум и выставка

20-22 октября 2020 | Екатеринбург | forum-100.ru

**Внимание строителей, проектировщиков,
специалистов сферы ЖКХ!**

18-20 ноября
Волгоград Арена



ВЫСТАВКА

СТРОЙ-ВОЛГА



Выставочный центр ЦАРИЦЫНСКАЯ ЯРМАРКА
www.zarexpo.ru, (8442) 26-50-34

10-12 НОЯБРЯ / 2020

МЕРОПРИЯТИЕ ПРИУРОЧЕНО
К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Н.А. ЦЫТОВИЧА
И 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ С.С. ВЯЛОВА

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ»

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Место проведения:

МОСКВА,
Холидей Инн Сущёвский
(Holiday Inn Suschevsky),
ул. Суцевский Вал, 74

Генеральный спонсор



Официальная поддержка



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



НИИОСП
ИМ. Н.М. ПЕРСЕВАНОВА

Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com

тел.: +7 (495) 66-55-014, моб.: +7 916 36-857-36