

*Yu, Q. L., PhD, Assistant Prof.; **Brouwers, H. J. H., Prof. Dr. Ir.,
Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands

DESIGN OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES COMPOSITES: AN INSIGHT INTO CALCIUM SULPHATE AND CEMENT AS BINDERS (PART I)



*Ю. К. Л., канд. наук, доцент; **Брауэрс Х. Дж. Х., д-р, проф.,
кафедра антропогенной среды, Технологический университет Эйндховена, Эйндховен, Нидерланды

ПОДБОР СОСТАВА КОМПОЗИТОВ НА ЛЕГКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ: АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ И ЦЕМЕНТА В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩИХ (ЧАСТЬ I)

Abstract

This article addresses the design of lightweight aggregates composites applying different materials (calcium sulphate hemihydrate and cement) as binder. A moderate strength and an excellent thermal conductivity of the lightweight composites are set as the design targets. The designed lightweight aggregates composites are targeted to be used in monolithic facade structure, performing as both load bearing element and thermal insulator. The mixtures are designed based on the insight that superior properties of a granular mix are achieved when a so-called geometric grading line is designed and obtained, applying a model known as the modified Andreasen and Andersen model. The properties of the obtained composites in both fresh and hardened states are investigated. Subsequently, a comparative study on calcium sulphate system and cement as binders is performed.

Key words: *lightweight aggregates composites; CaSO₄-H₂O system; cement; porosity; density; mechanical properties; thermal physical properties.*

Introduction

The history of lightweight aggregates concrete dates back over 3,000 years ago. Because of its many advantages such as low density, good thermal insulation and fire resistance, lightweight concrete has been widely applied as both structural and nonstructural material. Nevertheless, the available literature shows a great variation regarding both mechanical and thermal properties, indicating the effect of the used materials and mix design method. In addition, the majority of the research focused on either to obtain a lightweight concrete as structural material with only good strength or as nonstructural material with only low thermal conductivity. Hence, extra insulation materials or load bearing elements are needed. On the other hand, cement is a highly energy-intensive material and great amounts of CO₂ are emitted during its production process. Nevertheless, it is very difficult to reduce this

Аннотация

В статье рассматривается подбор состава композитов на легких заполнителях с использованием в качестве вяжущих двух материалов (полугидрата сульфата кальция и цемента). Разработанные композиты на легких заполнителях с умеренной прочностью и отличной теплопроводностью предназначены для использования в монолитных фасадных конструкциях в качестве несущих элементов, одновременно выполняющих теплоизоляционные функции. Методика подбора состава смесей основывается на понимании того, что наилучшие показатели зернистой смеси обеспечиваются, когда проектируется и реализуется так называемое геометрическое распределение по размерам частиц всех твердых компонентов смеси с применением модели, известной как модифицированная модель Андреасена и Андерсена. Исследованы свойства полученных композитов в виде растворной смеси и раствора. Приводится сравнительное исследование систем с использованием сульфата кальция и цемента в качестве вяжущих.

Ключевые слова: *композиты на легких заполнителях; система CaSO₄-H₂O; цемент; пористость; плотность; механические свойства; теплофизические свойства.*

Введение

История бетона на легких заполнителях насчитывает более 3000 лет. Благодаря своим многочисленным преимуществам, в том числе низкой плотности, хорошей теплоизоляции и огнестойкости, легкий бетон широко применяется в несущих и самонесущих конструкциях. Тем не менее в литературе отмечают значительные различия в механических и тепловых свойствах, а также их зависимость от используемых материалов и метода приготовления смеси. Кроме того, большинство исследований посвящено

negative impact since about 90% of the energy needed for concrete production is spent in the cement production [1].

Hence, the question arises whether it is possible to use other materials to replace cement as binders, and the answer is positive, for instance the $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (calcium sulphate) system. Most calcium sulphate systems are characterized by three solid phases, depending on the stoichiometric amount of the crystallized water: calcium sulphate dihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (also called gypsum), calcium sulphate hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (including the α - and β -types) and calcium sulphate anhydrite CaSO_4 [2]. Gypsum plaster (calcium sulphate hemihydrate in β -type) was already used in Egyptian pyramids at least 4,000 years ago [3], and is still extensively applied in buildings along with other cementitious materials such as cement and lime. Gypsum plasterboard, produced from hemihydrate, is widely used for interior walls or ceilings because of its easy fabrication feature, environmental friendliness, good fire resistance, aesthetics, and low price, etc.

The present research aims at the development of a sustainable lightweight composite with a good balance between the mechanical properties and the thermal properties. This design concept indicates that a monolithic structure will be in reach. The monolithic composite structure concept leads to the following advantages: 1) cost saving, due to the exemption of extra insulation installations; 2) provides architects and structural engineers with more flexibility for the building design; 3) sustainability, as waste materials or industrial by-products are used as raw materials and the monolithic structure will ensure a relatively easy maintenance requirement and it is much easier to recycle. Calcium sulphate hemihydrate and cement are separately used as binders in the designed composites to study their effect. The properties of the developed composites under both fresh and hardened states are investigated and compared. A comparison on calcium sulphate hemihydrate and cement as binders is performed.

Mix design methodology

The lightweight aggregates composites (LWAC) are designed applying an innovative mix design method presented in [4]. This mix design tool is based on the insight that superior properties of a granular mix are achieved when a so-called geometric grading line is designed and obtained, i. e. the ratios of particle sizes and the ratios of pertaining quantities are constants. In case of continuous distributions, the cumulative finer fraction of the entire mix, also known as the modified Andreasen and Andersen model [5], reads:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

where $P(D)$ is a fraction of the total solids being smaller than size D , D is the particle size (μm), D_{\max} and D_{\min} are the largest and smallest particle size (μm), respectively, in the mix, and q is the distribution modulus.

This particle packing principle insight has been transformed into a numerical mix design, in which all

производству легкого бетона в качестве материала для несущих конструкций, обладающего лишь хорошей прочностью, либо материала для самонесущих конструкций, обладающего только низкой теплопроводностью. По этой причине существует потребность в создании новых материалов, которые могут использоваться для изоляции в несущих элементах конструкций. С другой стороны, цемент имеет высокую энергоемкость, а кроме того, при его производстве выделяется большое количество CO_2 . Снизить этот отрицательный эффект очень сложно, так как около 90% энергоресурсов, необходимых для производства бетона, идет на производство цемента [1].

В связи с этим возникает вопрос: можно ли вместо цемента использовать в качестве вяжущего вещества другие материалы? Ответ положительный: это система $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (сульфат кальция). Большинство систем сульфата кальция характеризуется тремя твердыми фазами в зависимости от стехиометрического количества кристаллической воды: дигидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (также известный как гипс), полугидрат сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (включая α - и β -типы) и безводный сульфат кальция CaSO_4 [2]. Гипсовый раствор (полугидрат сульфата кальция β -типа) применялся уже при строительстве египетских пирамид около 4000 лет назад [3] и продолжает интенсивно использоваться в строительстве зданий вместе с другими вяжущими материалами, такими как цемент и известь. Гипсокартон, изготавливаемый из полугидрата, широко применяется для внутренних стен и потолков благодаря простоте производства, экологической безопасности, огнестойкости, эстетике, низкой стоимости и т. п.

Целью настоящего исследования является разработка стабильного легкого композитного материала с хорошим балансом механических и теплоизоляционных свойств. Такая концепция предусматривает возможность использования материала в монолитной конструкции. Концепция монолитной композитной структуры имеет следующие преимущества: 1) экономия материала благодаря отсутствию дополнительной изоляции; 2) разнообразие проектных решений для архитекторов и конструкторов при планировке здания; 3) экологичность, так как в качестве сырья применяются отходы или побочные продукты промышленности, а монолитная конструкция относительно проста в обслуживании и может быть легко переработана после использования. Для изучения индивидуального влияния полугидрат сульфата кальция и цемент применялись в разработанных композитах в качестве вяжущих по отдельности. Проведено исследование и сравнение свойств разработанных композитов в виде растворной смеси и раствора. Выполнено сравнение полугидрата сульфата кальция и цемента в качестве вяжущих.

Методология подбора состава смеси

Разработка композитов на легких заполнителях (LWAC) осуществляется с применением

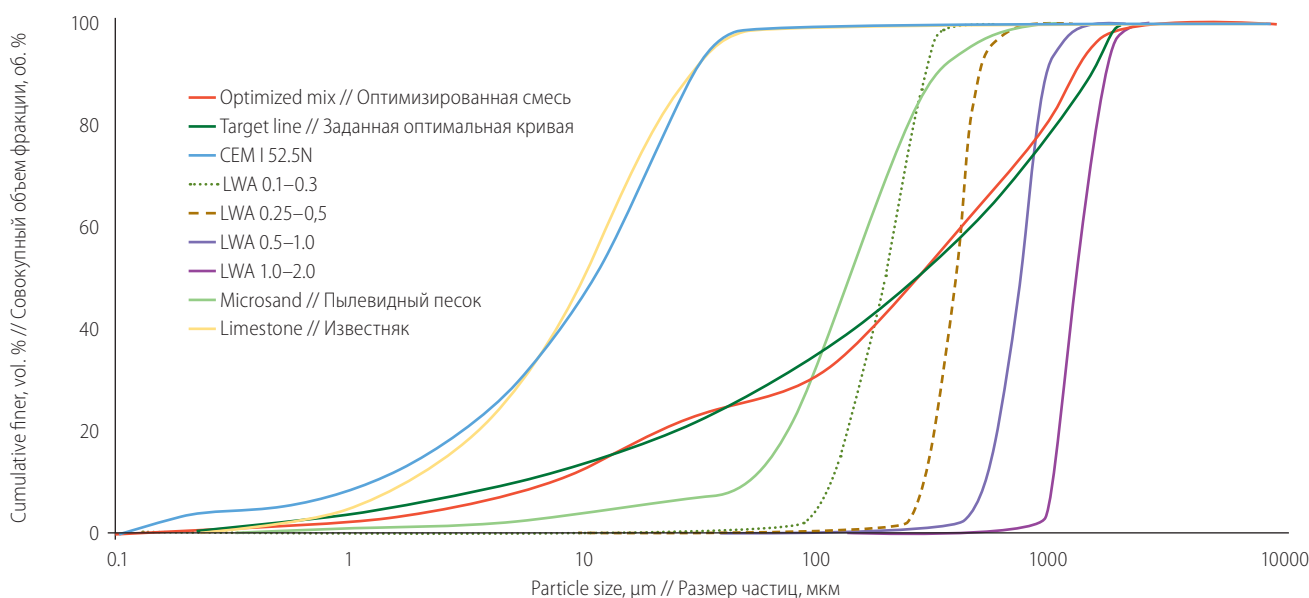


Fig. 1. PSDs of the involved ingredients, the target line and the resulting integral grading line of the mix
 Рис. 1. Гранулометрические кривые компонентов, заданная оптимальная кривая и итоговая геометрическая линия гранулометрии смеси

mix ingredients, which all have their own particle size distributions (PSD), are combined via a mathematical optimization routine, i. e. the “target line” is approached best. This results in improved hardened state properties as well as an improved workability, since more water is available to act as lubricant between the particles [4]. The concept is to include all the solid particles in the mixture grading, i. e. binder and other solids. It was reported that a value of 0.37 for q in **Equation 1** is for an optimal packing of continuous particle distribution [6], which was confirmed by [7]. Then it was further demonstrated that theoretically a q value in the range of 0–0.28 would result in an optimal packing [8]. **Fig. 1** shows an example of the mix design methodology. This mix design methodology has been already successfully applied for the design of self-compacting concrete [9, 10], zero-slump concrete [1, 11] and gypsum-based composites [12].

Density is nevertheless strongly related with the thermo-physical properties such as the thermal conductivity [12, 13]. Hence, the new composites developed applying this design concept will have an opposite effect, i. e. the resulting thermal conductivity will increase as the void content is minimized. However, a low thermal conductivity is one desired objective here, which hence will be achieved by applying a lightweight material as aggregates (LWA).

The water absorption of LWA is an influential factor in the lightweight aggregates composite design and production, as the LWAs normally absorb a certain amount of free water from the mixture before in its fresh state. It is shown that the water absorption of LWAs has a negative influence on the workability, if mixing them with other materials under dry conditions prior to adding water [12, 14–16]. However, this negative effect depends not only on the amount of the lightweight aggregates used, but also significantly on their type and production process.

инновационного метода подбора состава смеси, представленного в [4]. Данный инструмент основан на предположении, что наилучшие показатели зернистой смеси обеспечиваются, когда проектируется и реализуется так называемое геометрическое распределение по размерам частиц всех твердых компонентов смеси. При непрерывном гранулометрическом составе совокупная доля в смеси фракции с размером меньше D , описываемая модифицированной моделью Андреасена и Андерсена [5], равняется:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

где $P(D)$ — совокупная доля твердого вещества с частицами размером меньше D , D — размер частиц (мкм), D_{\max} и D_{\min} — соответственно наибольший и наименьший размер частиц (мкм) в смеси, q — модуль распределения.

Такое принцип упаковки частиц позволяет рассчитать состав смеси, все компоненты которой описываются собственными гранулометрическими кривыми и объединяются посредством математической оптимизации, достигая наилучшего приближения к заданной оптимальной кривой. Подобные расчеты позволяют кроме показателей материала в затвердевшем состоянии, также улучшать его удобоукладываемость, так как в качестве смазки способно выступить большее количество воды [4]. Идея состоит в том, чтобы учитывать размеры всех твердых частиц, входящих в состав смеси, т. е. вяжущего и других твердых веществ. Для оптимальной упаковки частиц при их непрерывном распределении по размерам в **уравнении 1** было определено [6], а затем и подтверждено [7] значение $q = 0,37$. Далее было доказано, что теоретически оптимальную укладку обеспечива-ет значение q в диапазоне от 0 до 0,28 [8]. На **рис. 1**

2–4 декабря 2014 г., Москва, Экспоцентр
December 2–4, 2014, Moscow, Expocentre

MixBuild

XVI международная научно-техническая конференция
«Современные технологии сухих смесей в строительстве»

XVI International Scientific Conference
“Modern Technologies of Dry Mixtures in Construction”



ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА:

- › Область применения сухих смесей
- › Техничко-экономические показатели
- › Сырье для производства сухих смесей
- › Оборудование и заводы для производства сухих смесей
- › Нормативная база и сертификация сухих смесей
- › Оборудование и технологии для переработки
- › Санитарно-гигиенические и экологические аспекты производства и применения
- › Современные тенденции на рынке сухих смесей

MAIN SUBJECTS

- › Application areas of dry building mixtures
- › Technical and economic indices
- › Raw materials for dry mixtures production
- › Equipment and plants for production of dry building mixtures
- › Standards and certificates for dry building mixtures
- › Equipment and technologies for processing
- › Ecological and sanitary aspects of production and using
- › Modern trends in dry building mixtures market



В 2014 году в рамках конференции «MixBuild» состоится секция по современным добавкам для сухих строительных смесей под председательством Йоханна Планка, доктора тех. наук, профессора, Мюнхенского технического университета, Германия

In the framework of Conference “MixBuild-2014” Dr. Johan Plank, a renowned Professor at the Technische Universitat Munchen (Germany) chaired a section on modern additives for dry construction mixtures

ЗАПЛАНИРУЙТЕ СВОЕ УЧАСТИЕ УЖЕ СЕЙЧАС! // PLAN YOUR CONFERENCE PARTICIPATION RIGHT NOW!

Организатор
Organizer



При поддержке:

Государственная дума РФ
Правительство Москвы
Правительство Московской области
Российский союз строителей
Союз производителей цемента России

With support:

The State Duma of the Russian Federation
The Moscow City Government
The Moscow Regional Government
The Russian Union of Builders
The Union of Cement Producers of Russia

www.dry-mix.ru

There are two mixing methods that are widely used to address this issue, i. e. either to presoak the LWA in water for a certain period, usually 30 mins to 1 hr [14, 17], or to add a certain amount of extra water which is calculated normally based on 1-hour water absorption [16].

Both methods have disadvantages especially with regard to the LWA used in the present study. The presoaked LWA should be surface dried before mixing with other materials for the concrete production. However, for the lightweight aggregates used here, this could cause considerable technical problems and errors due to their very small particle size. On the other hand, adding extra water from the beginning of the mixing process could easily cause segregation or bleeding in the mixture, especially in the case of self-compacting lightweight mortar or concrete.

However, as already investigated in [4], the water absorption of the LWA used in this study is quite low, especially in the first hour (approximately 1.0 wt. %), due to their rather closed external surfaces (Fig. 2). Hence, the applied LWA will not affect the workability significantly, and on the other hand, the absorbed free water will contribute to the hydration process due to the so called internal curing effect [14, 17]. Therefore, in the present study, the LWA are applied in dry conditions directly to the mixture and no extra water is added. The properties of the used LWAs are summarized in Table 1 and the microstructure is shown in Fig. 2.

Therefore, by using cement or calcium sulphate hemihydrate as binder, lightweight material as aggregates and applying this mix design concept, the obtained LWAC will have a compact matrix with a large amount of non-interconnected pores. Theoretically this will lead to obtaining sufficient mechanical properties as well as good thermal insulation.

Results analysis: Calcium sulphate hemihydrate as binder

Using the self-compacting concrete mix design requirements given by [18] concerning the specification, production and use, and [12] as references, a mix design procedure for self-compacting gypsum light-weight

показан пример методологии подбора состава смеси. Данная методика уже успешно применяется для разработки самоуплотняющегося бетона [9, 10], жесткого бетона с нулевой осадкой конуса [1, 11] и композитов на основе гипса [12].

Между тем плотность материала в значительной степени связана с его теплофизическими свойствами, например с теплопроводностью [12, 13]. Поэтому новые композиты, разработанные с применением концепции оптимального гранулометрического состава, будут обладать обратным эффектом, т. е. по мере уменьшения в них объема пустот общая теплопроводность системы будет увеличиваться. В то же время одним из желаемых результатов данного исследования является низкая теплопроводность, которая будет достигнута за счет применения легких заполнителей (LWA).

Водопоглощение LWA — важный фактор, который необходимо учитывать при подборе их состава и производстве, так как при смешивании с водой LWA обычно поглощают некоторое ее количество. Доказано, что водопоглощение LWA оказывает отрицательное влияние на удобоукладываемость, если смешивать их с другими компонентами в сухом виде, до затворения водой [12, 14–16]. Однако этот негативный эффект зависит не только от количества используемых LWA, но и в значительной степени от их типа и процесса изготовления. Для решения этого вопроса широко используются два метода — предварительное увлажнение LWA, обычно в течение 30–60 мин [14, 17], или добавление некоторого избыточного количества воды, которое, как правило, рассчитывается исходя из адсорбции в течение одного часа [16].

Оба метода имеют свои недостатки, особенно в отношении LWA, рассматриваемых в настоящем исследовании. При изготовлении бетона перед смешиванием с другими материалами поверхность предварительно увлажненных LWA должна быть высушена. В случае LWA это может вызвать значительные технические проблемы и ошибки по причине крайне малого размера их частиц. В свою очередь, добавление избыточной воды в начале процесса смешивания может легко вызвать расслоение или водоотделение

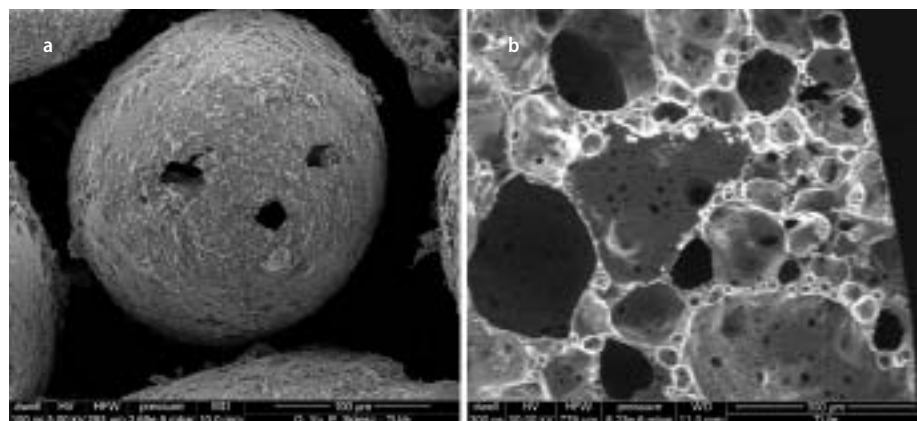


Fig. 2. SEM pictures of LWA: a) open pores seen from outside; b) interconnected pores

Рис. 2. Изображение LWA на СЭМ: а) открытые поры (вид снаружи); б) взаимосвязанные поры

Table 1. Physical properties of the used LWAs

Таблица 1. Физические свойства исследуемых LWA

| Materials / size range, mm // Материалы, диапазон размеров, мм | Bulk density, kg/m ³ // Насыпная плотность, кг/м ³ | Specific density, kg/m ³ // Удельная плотность, кг/м ³ | Crushing resistance, N/mm ² // Прочность при раздавливании, Н/мм ² |
|---|---|---|---|
| LWA 0.25–0.5 | 300 | 540 | > 2.9 |
| LWA 0.5–1.0 | 350 | 450 | > 2.6 |
| LWA 1.0–2.0 | 220 | 350 | > 2.4 |
| LWA 2.0–4.0 | 190 | 310 | > 2.2 |
| LWA 4.0–8.0 | 170 | 300 | > 2.0 |

composite (SGLC) is made [19]. A calcium sulphate hemihydrate produced from the flue gas desulfurization (FGD) gypsum is used as the raw material, taking sustainability into account, since FGD gypsum is a by-product of the process of desulfurization of combustion gases of fossil fuels (coal, lignite, oil) in power stations [2]. Here, the water demand of the solid ingredients of the designed composite is determined by the mini-slump flow test employing a Hägermann cone [20]. The dosage of superplasticizer [21] is determined based on the desired slump flow value [19]. Several mixes developed using different moduli q are presented in **Table 2**.

Fresh state behaviour analysis

The mini-slump flow test is used to investigate the water demand on both powder and mortar level, i. e. the water content at the onset of the flowing of the spread samples. According to the standard EN 13454-2 (2004), a flowable mortar and a highly plastic mortar based on hemihydrate should have a slump flow not less than 190 mm and 130 mm, respectively, while from [18] the slump flow of cement mortar should be between 240 and 260 mm. Here, using these two standards as references, the slump flow value is set as 200–250 mm, which is shown as a fair target value from the tests.

As discussed before, this design methodology tries to minimize the water content in the mix due to the significant effect it has on the properties of the designed composite. The idea is to start from a water amount determined by the mini-slump flow test, and then to modify it by incorporating the superplasticizer (SP) and by adjusting the water content until the desired flow value is achieved.

A new polycarboxylate (PCE) — based superplasticizer specially designed for gypsum plasterboard production is used here (GPV12, Sika). PCE-based dispersants are commonly used in concrete production, but less for gypsum based materials. PCE has an effect of retarding the setting, which has a significant effect on gypsum board production, since compared to cement slurry, gypsum setting occurs in a very short period [20]. The new SP used here (GPV12) is developed by Sika [21] to tackle this problem. The GPV12 is a transparent solution

смеси, особенно в случае самоуплотняющегося легкого раствора или бетона.

Однако исследования показали, что водопоглощение LWA является достаточно низким, особенно в течение первого часа (около 1,0% от собственного веса) по причине их относительно невысокой открытой пористости (**рис. 2**) [4]. Поэтому применяемые LWA не оказывают значительного влияния на удобоукладываемость. С другой стороны, поглощаемая свободная вода вносит свой вклад в процесс гидратации по причине так называемого эффекта внутреннего выдерживания [14, 17]. Таким образом, в настоящем исследовании LWA вводятся непосредственно в смесь в сухом виде, без добавления избыточной воды. Свойства LWA кратко описаны в **табл. 1**, а микроструктура показана на **рис. 2**.

Таким образом, при использовании цемента или полугидрата сульфата кальция в качестве вяжущего и легкого материала в качестве заполнителя, а также при применении описанной выше методики подбора состава смеси, полученные LWAC будут иметь плотную структуру с большим количеством несообщающихся пор. Теоретически это обеспечит необходимые механические показатели и хорошую теплоизоляцию.

Анализ результатов: полугидрат сульфата кальция в качестве вяжущего

Процедура изготовления самоуплотняющегося легкого гипсового композита (SGLC) была разработана на основании требований EFNARC [18] к созданию самоуплотняющейся бетонной смеси относительно показателей, условий производства и применения, а также с использованием [10] в качестве справочной информации [19]. С учетом соображений экологии, в качестве сырья применялся полугидрат сульфата кальция, полученный из сульфогипса, произведенного в результате очистки отходящих газов (FGD-гипс), так как он является побочным продуктом десульфуризации газов природного топлива (черный и бурый уголь, нефть) на электростанциях [2]. В данном случае водопотребность твердых компонентов разрабатываемого композита определялась с помощью мини-теста

with a specific density of 1.08 g/cm³ and a solids content of 30–40% depending on batches.

The effect of GPV12 on the flowability is investigated. The spread flow experiment is performed using a Hägermann cone by applying the superplasticizer with different dosages. Fig. 3a shows the spread flow of the β -hemihydrate slurry with a fixed water/hemihydrate ratio of 0.7 but with different SP dosages. It is shown that, until the dosage of 0.2% by mass of the β -hemihydrate, the slump flow increases linearly, and then the increase rate reduces fast and finally the slump flow reaches a constant value at the dosage amount 0.5% by mass of the β -hemihydrate. Fig. 3b shows the water demand determined by the mini-slump flow test at different SP dosages. It is indicated from Fig. 3 that the SP has an optimal dosage amount of 0.5% by mass of β -hemihydrate from the point of view of flowability.

A further study on the effect of the SP is carried out by comparing the spread flow of the β -hemihydrate slurry with different water contents but with a fixed SP dosage of 0.2% by mass of hemihydrate. The results are shown in Fig. 4. It can be seen that the relation between the spread flow and the water content follows the same law with and without dosing SP under the investigated water content range. It was reported that a water reduction up to 20% is possible while getting the same flow performance by applying the GPV12 with an amount of 0.2% by mass of β -hemihydrate, which is in line with the current results [21].

Porosity and density

All the samples are cured at ambient conditions for 7 days after demolding, and then dried in a ventilated oven at 40 °C until mass is constant.

Fig. 5 shows the relation between the measured void fraction and density. The density decreases linearly with the increase of the void fraction, while the void fraction increases linearly with the distribution modulus. Fig. 5 shows another interesting finding, i. e. that the relation between the density and the void fraction of the new composite is in line with the gypsum board, which is investigated in detail [20].

The density of the SGLC is compared to the traditional gypsum board [20]. The comparison is carried out based on the initial water content, as shown in Fig. 6. It is shown that, under all the water content conditions, the density of the new composite is clearly lower than that of the traditional gypsum board, for instance, a reduction of 20% is obtained at a w_0/h_0 of 0.60. This provides a possibility to produce a lighter building material using the employed mix design concept.

Strength

Strength of the cementitious based materials such as cement or gypsum is linked with its density. The

на расплыв с применением конуса Хегерманна [20]. Количество суперпластификатора [21] определялось исходя из заданного значения расплыва [19]. Несколько смесей, разработанных с использованием различных модулей q , представлены в табл. 2.

Анализ поведения гипсового раствора

Мини-тест на расплыв применялся для исследования водопотребности как в сухом, так и в растворном виде, т. е. для определения содержания воды в начале растекания образцов смеси. В соответствии со стандартом EN 13454–2–2004, подвижный и высокопластичный растворы на основе полугидрата должны иметь расплыв не менее 190 и 130 мм соответственно, в то же время расплыв цементного раствора, согласно [18], должен находиться в диапазоне значений от 240 до 260 мм. В нашем случае на основании этих двух стандартов было установлено значение расплыва 200–250 мм, что, как показали тесты, являлось надежным оптимальным значением.

Как уже говорилось, данная методология подбора состава стремится свести к минимуму содержание воды в смеси по причине ее существенного влияния на свойства разрабатываемого композита. Идея состояла в том, чтобы, начав с количества воды, определенного по результатам мини-теста на расплыв, затем менять его при одновременном введении суперпластификатора (СП) и в итоге добиться необходимого значения расплыва смеси.






В данном случае применялся новый СП на основе поликарбоксилата (PCE), специально разработанный для производства гипсокартона (GPV12, Sika). Диспергирующие добавки на основе PCE широко применяются в производстве бетона, но в производстве материалов на основе гипса они используются

Table 2. Compositions of four designed mixes (per 1 m³)
Таблица 2. Состав четырех подобранных смесей (в расчете на 1 м³)

| Material // Материал | Mix 1 // Смесь 1 | Mix 2 // Смесь 2 | Mix 3 // Смесь 3 | Mix 4 // Смесь 4 |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| β -hemihydrate, kg // β -полугидрат, кг | 665.8 | 593.8 | 532.6 | 474.0 |
| LWA 0.1–0.3, kg // кг | 65.8 | 102.9 | 97.5 | 94.8 |
| LWA 0.25–0.5, kg // кг | 16.4 | 15.8 | 52.5 | 42.1 |
| LWA 0.5–1.0, kg // кг | 57.5 | 39.6 | 26.3 | 35.1 |
| LWA 1.0–2.0, kg // кг | 16.4 | 39.6 | 41.3 | 56.2 |
| water // вода, kg // кг | 429.4 | 385.9 | 372.8 | 355.5 |
| SP, wt. % // СП, вес. % | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.30 |
| w/b // В/В | 0.60 | 0.65 | 0.70 | 0.75 |
| q | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 |

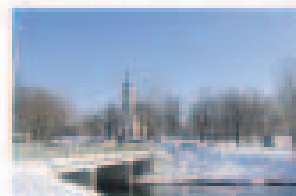
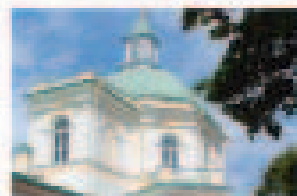
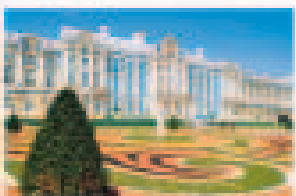
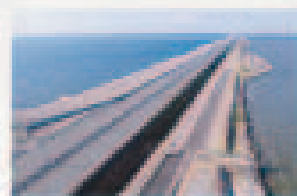
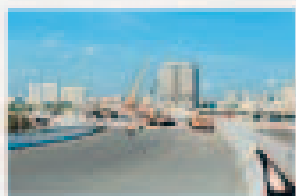
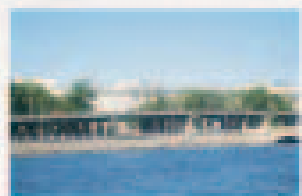
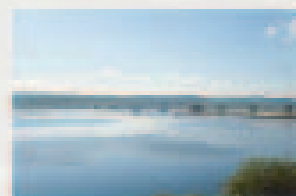
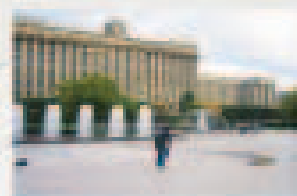
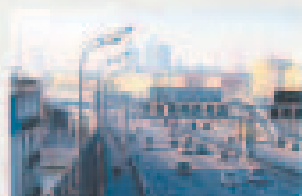


СУХИЕ СМЕСИ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

-  ЗАЩИТНЫЕ
-  РЕМОНТНЫЕ
-  ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ
-  КОНСТРУКЦИОННЫЕ
-  МОНТАЖНЫЕ

Мы помогли строить:

Третье транспортное кольцо, Москва · Ушаковская развязка, Санкт-Петербург · Здание Сената и Синода, Санкт-Петербург
Ладожский вокзал, Санкт-Петербург · Московская кольцевая автодорога · Екатерининский дворец, Пушкин
Фонтанная группа у Финляндского вокзала · Кольцевая автодорога, Санкт-Петербург · Меншиковский дворец, Ораниенбаум
Мост через Кальский залив, Мурманск · Петербургский метрополитен · 1-й железобетонный мост в России через р. Охта и др.



Заказ смесей на сайте: www.alitmix.ru


Возрождая традиции

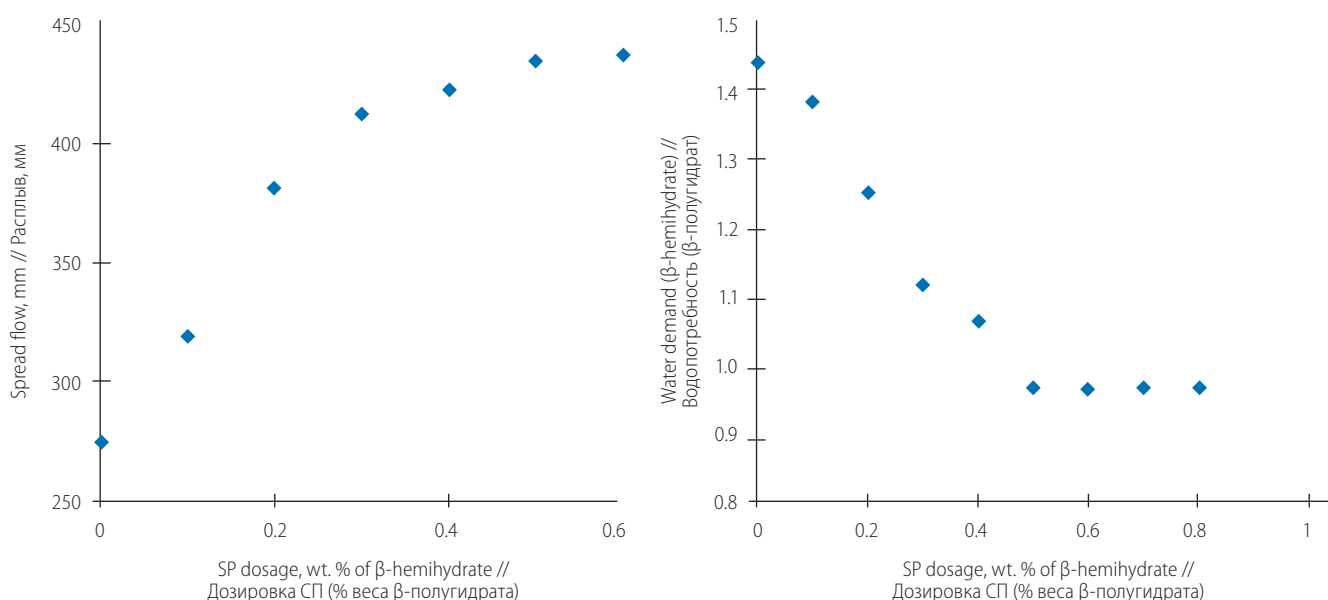


Fig. 3. Effect of the SP on the flowability of β -hemihydrate slurry: a) the spread flow versus the SP dosage with fixed water content; b) the determined water demand versus the SP dosage

Рис. 3. Влияние СП на текучесть шлама β -полуводрата: а) зависимость величины расплыва от дозировки СП при постоянном уровне содержания воды; б) зависимость рассчитываемой водопотребности от дозировки СП

objective here is to achieve a sufficient strength while keeping a low density. In this section, the mechanical properties of the new developed composite are investigated, including the compressive and flexural strengths. The effect of the distribution modulus is investigated as well.

The measured compressive and flexural strength are shown in Fig. 7. Both the compressive and the flexural strength decreases as the increase of the distribution modulus. But the strength is influenced more significantly at a bigger distribution modulus range.

The compressive strength decreases only 3.6% when the distribution modulus increases from 0.20 to 0.25, but it decreases another 18.5% when the distribution modulus increased to 0.30, while the related flexural strength decrease is 8.8% and 32.2%, respectively. This finding indicates from the point of strength that a smaller distribution modulus is more suitable and recommended.

The effect of the void fraction of gypsum on its strength was investigated and a power relation between them was found in [20]. It is indicated that the effect of the void fraction on the developed composite is also significant. The results are plotted in Fig. 8. It is shown that the strength (both the compressive and flexural strength) has a power law relation with the total void fraction (i. e. of gypsum paste and of light-weight aggregates). This is in line with the finding of the void fraction and the strength of gypsum [20].

The strength of the developed composite and gypsum board is compared, and the results are also shown in Fig. 8. Here the strength value for gypsum board is taken from the power model derived from [20]. It can be seen, for instance with a void fraction of 0.60, the developed composite (designed with the distribution modulus

в меньшей степени. РСЕ замедляют процесс схватывания, что критично в производстве гипсокартона, так как по сравнению с цементным тестом схватывание гипса происходит очень быстро [20]. Применяемый в данном случае новый СП (GPV12) разработан Sika [21] для решения этой проблемы. GPV12 представляет собой прозрачный раствор удельной плотностью $1,08 \text{ г/см}^3$ с содержанием твердой фазы 30–40% в зависимости от партии выпуска.

Для исследования влияния GPV12 на подвижность смеси выполнялся опыт с использованием конуса Хегерманна, с помощью которого измерялась величина расплыва при различных дозировках СП. На рис. 3а показан расплыв шлама β -полуводрата с постоянным соотношением вода/полуводрат, равным 0,7, и переменным количеством СП. Показано, что при дозировке менее 0,2% от массы β -полуводрата величина расплыва растет линейно, после чего темп роста быстро уменьшается и в итоге постоянное значение расплыва достигается при дозировке 0,5% от массы β -полуводрата. На рис. 3б показана водопотребность смеси при разных дозировках СП, определенная путем мини-теста на расплыв. Из рис. 3 следует, что с точки зрения подвижности смеси оптимальная дозировка СП составляет около 0,5% от массы β -полуводрата.

Кроме того, было проведено дополнительное исследование влияния СП путем сравнения величины расплыва шлама β -полуводрата при разном содержании воды, но постоянной дозировке СП — 0,2% от массы полуводрата. Результаты показаны на рис. 4. Можно видеть, что зависимость величины расплыва от количества воды подчиняется одному и тому же закону как при наличии, так и в отсутствие СП в исследуемом диапазоне содержания

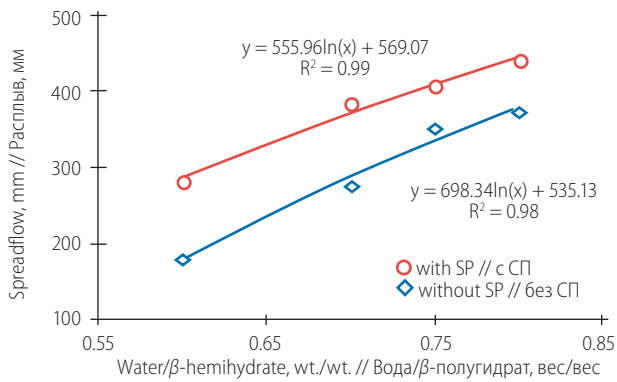


Fig. 4. Comparison of the spread flow with and without superplasticizer (dosage of 0.2 wt. % of β -hemihydrate) versus the water content

Рис. 4. Сравнение величины распыла при наличии и в отсутствие суперпластификатора (0,2% от веса β -полугидрата) в зависимости от количества воды

of 0.25, which has a similar density as the traditional gypsum board of 0.93 g/cm^3 , that an improvement of 73.3% and 70.0% in compressive and flexural strength, respectively, is obtained.

Hence it is demonstrated here that although the strength of the new composite has the same rule, i. e. the relation of the strength and the void fraction is a power law, a much higher strength can be reached while keeping a similar density/porosity in this newly developed composite.

Thermal properties

A low thermal conductivity of the applied building structure significantly contributes to a good thermal comfort due to the low heat transfer through it between the indoor and outdoor conditions. The thermal conductivity of one material is related with its density and composition, which is already extensively studied [13, 22–24]. Here, the thermal conductivities of the newly developed SGLC are investigated.

The commercial heat transfer analyzer (ISOMET Model 2104) is again deployed here. For the measurement, a sample is produced with a unified size of $200 \times 100 \times 30 \text{ mm}$, and the sample is always first cured at ambient conditions for 7 days after demolding, and then dried in a ventilated oven at $40 \text{ }^\circ\text{C}$ until the mass is constant.

The measured thermal conductivity versus the applied distribution modulus is shown in Fig. 9a. The thermal conductivity first decreases and then remains stable with the increase of the distribution modulus, whereas a minimum value of $0.19 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ is reached at a distribution modulus of 0.30. Fig. 9b shows the relation between the density of the composite and the relevant thermal conductivity. It is clear that the thermal conductivity remains stable at a lower density and then increases quickly with the increase of the density. This is in line with [22, 24], who reported that the thermal conductivity is related not only with the density, but also strongly with the composition.

воды. Ранее сообщалось, что благодаря применению GPV12 в количестве 0,2% от массы β -полугидрата возможно сохранение величины распыла при снижении содержания воды до 20% [21], что соответствует результатам данного исследования.

Пористость и плотность

Все образцы выдерживались в естественных условиях в течение 7 сут. после извлечения из формы, а затем высушивались в вентилируемой печи при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ до достижения постоянства массы.

На рис. 5 показано соотношение между вычисленной пористостью и плотностью. Плотность линейно уменьшается с увеличением пористости, которая в свою очередь линейно увеличивается с ростом модуля распределения. На рис. 5 показан еще один интересный факт: зависимость между плотностью и пористостью в новом композите соответствует данным по гипсокартону, который подробно исследовался ранее [20].

Плотность SGLC сравнивалась с обычным гипсокартоном [20]. Сравнение осуществлялось при фиксированном значении начального количества воды, как видно на рис. 6. Показано, что при любом количестве содержащейся воды плотность нового композита заметно ниже плотности традиционного гипсокартона — например, снижение на 20% достигается при $w_0/h_0 = 0,60$. Это дает возможность изготавливать более легкий строительный материал, применяя данную концепцию подбора состава смеси.

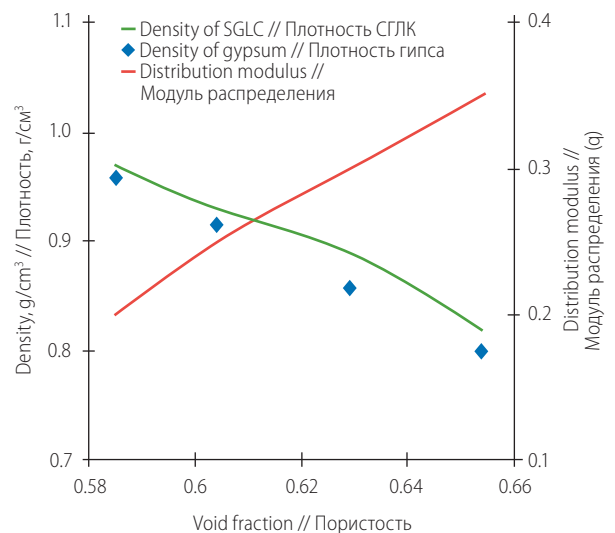


Fig. 5. The comparison of the density, void fraction and the used distribution modulus of SGLC and gypsum board [20]

Рис. 5. Сравнение плотности, пористости и модуля распределения SGLC и гипсокартона [20]

It should also be pointed out that to reach a lower thermal conductivity, it is not enough only to consider the reduction of the density. Here, a thermal conductivity of 0.21 W/(m·K) is obtained at a void fraction of 0.604 (with the density of 0.93 g/cm³), while in the previous section a thermal conductivity of 0.30 W/(m·K) is obtained at the same void fraction for normal gypsum board [14]. Hence, it can be seen that a 30% reduction of the thermal conductivity is reached with the new developed SGLC. ◀

To be continued in the issue No. 2 (34) 2014

References // Литература

1. *Hüsken, G.* A multifunctional design approach for sustainable concrete, with application to concrete mass products. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2010.
2. *Wirsching, F.* Calcium Sulfate. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
3. *Ryan, J.V.* Study of gypsum plasters exposed to fire. Journal of Research of the National Bureau of Standards — C. Engineering and Instrumentation, vol. 66c, 1962. P. 373–387.
4. *Yu, Q.L.* Design of environmentally friendly calcium sulfate-based building materials. Towards and improved indoor air quality. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 2012.
5. *Andreasen, A.H.M., Andersen, J.* Ueber die Beziehungen zwischen Kornabstufungen und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten) // Kolloid-Zeitschrift, 1930, No. 50. P. 217–228.
6. *Funk, J.E., Dinger, D.R.* Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing, Kluwer Academic Publishers, USA, 1994.
7. *Villar, J., Baret, J.F.* Cementing slurry and method of designing a formulation // U. S. Patent, 2002. No. 6153562.

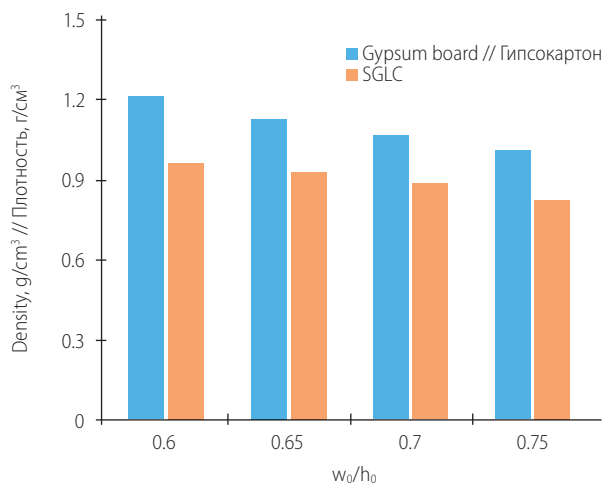


Fig. 6. The density comparison between the SGLC and gypsum board [20]

Рис. 6. Сравнение плотности SGLC и гипсокартона [20]

Прочность

Прочность материалов на основе вяжущих типа цемента или гипса обычно связана с их плотностью. В нашем случае ставилась задача обеспечить достаточную прочность, сохраняя низкую плотность. Были исследованы показатели новых композитов, в том числе прочность при сжатии и изгибе, а также влияние модуля распределения.

Результаты измерений прочности при сжатии и изгибе показаны на **рис. 7**. С ростом значения модуля распределения уменьшается как прочность при сжатии, так и прочность при изгибе. Кроме того, при более высоких значениях модуль распределения оказывает более значительное влияние на снижение прочности.

При увеличении модуля распределения с 0,20 до 0,25 прочность при сжатии уменьшается лишь на 3,6%, однако при увеличении модуля распределения до 0,30 она снижается еще на 18,5%, при этом уменьшение прочности при изгибе составляет 8,8 и 32,2% соответственно. Этот вывод показывает,

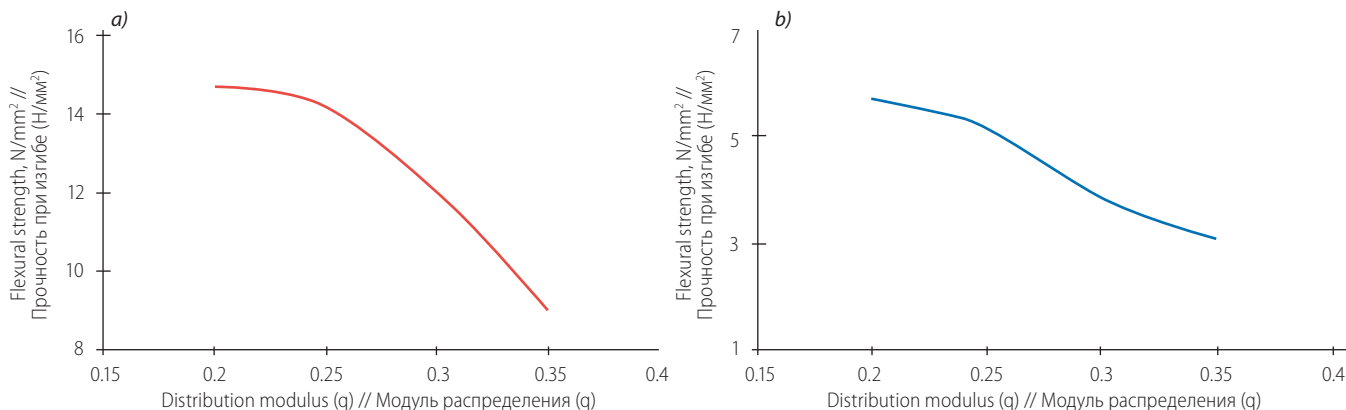


Fig. 7. The strength versus the distribution modulus: a) compressive strength; b) flexural strength

Рис. 7. Зависимость прочности от модуля распределения: a) прочность при сжатии; b) прочность при изгибе

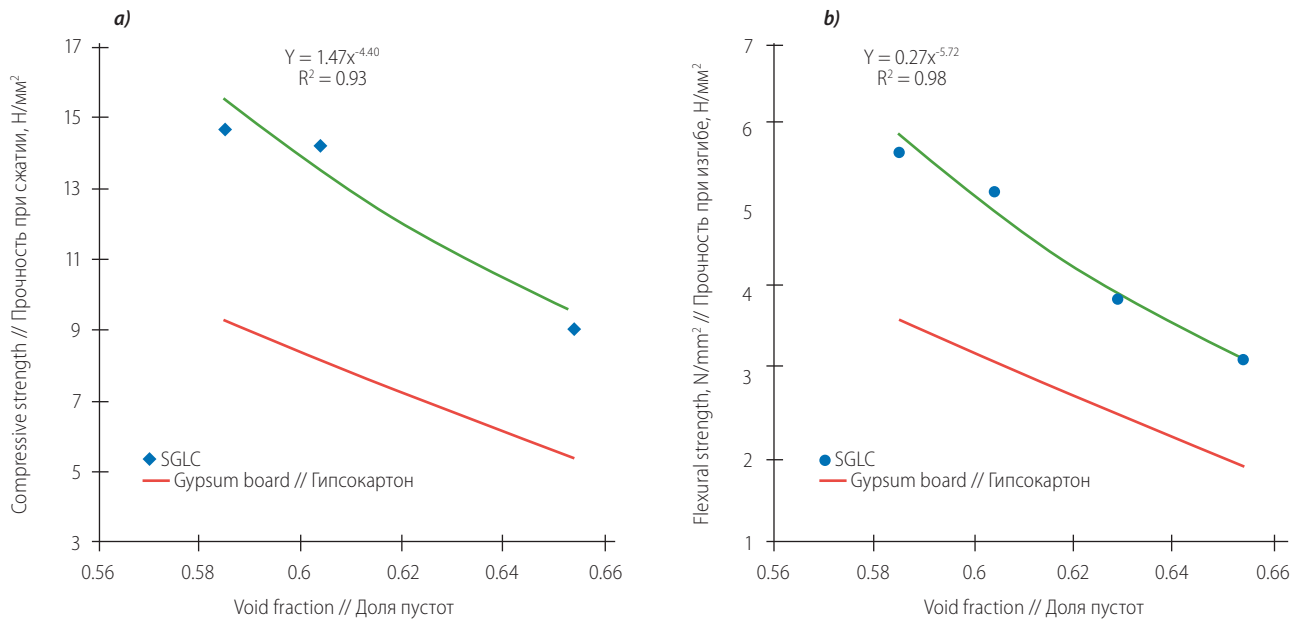


Fig. 8. The strength comparison of the new composite and gypsum board versus the computed void fraction: a) compressive strength; b) flexural strength

Рис. 8. Сравнение прочности нового композита и гипсокартона в зависимости от расчетной доли пустот: a) прочность при сжатии; b) прочность при изгибе

8. *Brouwers, H.J.H.* Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings // *Physical review E.*, 2006., vol. 74.
9. *Brouwers, H.J.H., Radix, H.J.* Self-compacting concrete: theoretical and experimental study// *Cement and Concrete Research.* 2005, vol. 35. P. 2116–2136.
10. *Hunger, M.* An integral design concept for ecological self-compacting concrete. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, 2010.
11. *Hüsken, G., Brouwers, H.J.H.* A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study // *Cement and Concrete Research.* 2008, vol. 38. P. 1246–1259.
12. *Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H.* The development of self-compacting gypsum based light-weight composite: a theoretical and experimental investigation // *Cement and Concrete Composite.* 2012, vol. 34. P. 1033–1043.
13. *Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H.* Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: a theoretical and experimental investigation // *Fire and Materials.* 2012, vol. 36. P. 575–589.
14. *Chandra, S., Berntsson, L.* Lightweight aggregate concrete science, technology and applications, Standard publishers distributors. Delhi, India, 2003.
15. EuroLightCon. LWAC material properties state-of-the-art // *Economic design and construction with lightweight aggregate concrete.* 1998.

что с точки зрения прочности более приемлемыми и рекомендуемыми являются небольшие значения модуля распределения.

Ранее было обнаружено влияние пористости гипса на его прочность и найдено экспоненциальное соотношение между ними [20]. Определено также значительное влияние величины пористости на разработанный композит. Результаты представлены на **рис. 8**. Показано, что прочности при сжатии и изгибе находятся в степенной зависимости от общей пористости (т. е. гипсового теста и заполнителей). Это соответствует выводам о пористости и прочности гипса [20].

Выполнено сравнение прочности разработанного композита и гипсокартона; результаты также показаны на **рис. 8**. Здесь значения прочности для гипсокартона взяты из экспоненциальной модели, полученной на основе [20]. Например, можно видеть, что при пористости 0,60 в разработанном композите (заданный модуль распределения — 0,25, плотность близка к плотности традиционного гипсокартона — 0,93 г/см³) достигается улучшение прочности при сжатии и изгибе на 73,3 и 70,0% соответственно.

Таким образом, показано, что несмотря на то что прочность нового композита имеет ту же зависимость, т. е. соотношение прочности и пористости является экспоненциальным, в данном случае возможно получение гораздо более высокой прочности при сохранении аналогичной плотности/пористости.

Теплофизические свойства

Низкая теплопроводность существующих строительных конструкций заметно влияет

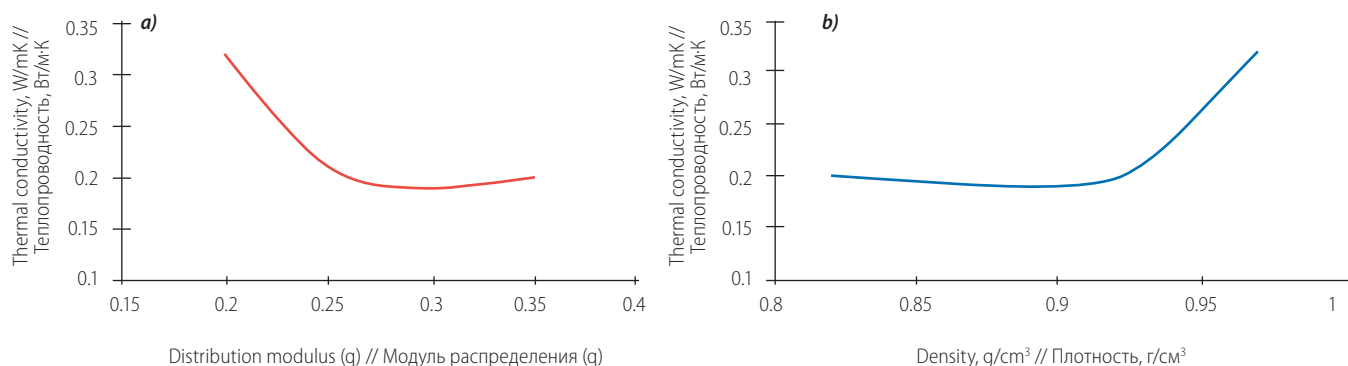


Fig. 9. The thermal conductivity versus: a) the used distribution modulus; b) the density
Рис. 9. Теплопроводность в зависимости от: a) применяемого модуля распределения; b) плотности

16. Liu, X., Chia, K.S., Zhang, M.H. Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration // *Cement & Concrete Composites*, 2010, vol. 32, P. 757–766.
17. Zhang, M.H., Gjørsv, O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete // *ACI Mater. J.*, 1991, vol. 88. P. 240–247.
18. EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC, 2002.
19. Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. Self-compacting gypsum based lightweight composite: theoretical and experimental study. *Proceedings 1st Weimarer Gipstagung / Eds. H. B. Fischer, Chr. Mattes and C. Beuthan, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Weimar, Germany, 1, 2011. P. 251–259.*
20. Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. Microstructure and mechanical properties of β -hemihydrate produced gypsum: an insight from its hydration process. *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011. P. 3149–3157.
21. Hampel, C. Polymer 1* or 2* produced in full production scale (about 3 tons) for extended production tests of gypsum plasterboards. EU Project I-SSB report, 2010.
22. Zehner, P., Schlunder, E.U. Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures // *Chemie Ingenieur Technik*, 1970, vol. 42 (14). P. 933–941.
23. Somerton, W.H., Chu, S.L., Keese, J.A. Thermal behavior of unconsolidated oil sands // *Society of Petroleum Engineers of AIME Journal*, 1974, vol. 14. P. 513–521.
24. De Korte, A.C.J., Brouwers, H.J.H. Calculation of thermal conductivity of gypsum plasterboards at ambient and elevated temperature // *Fire and Materials*, 2010, vol. 34. P. 55–75.

на температуру помещений из-за низкой теплопередачи между внутренней и наружной средой. Теплопроводность материала связана с его плотностью и составом, что уже подробно изучено в [13, 22–24]. В данном исследовании рассматривается проводимость разработанного SGLC.

Снова был применен промышленный анализатор теплопередачи ISOMET, модель 2104. Для измерений использовались образцы одного размера $200 \times 100 \times 30$ мм, каждый из которых сначала выдерживался в естественных условиях в течение 7 сут. после извлечения из формы, а затем высушивался в вентилируемой печи при 40°C до достижения постоянной массы.

На рис. 9а показаны результаты измерений зависимости теплопроводности от величины применяемого модуля распределения. С ростом модуля распределения теплопроводность сначала уменьшается, а затем сохраняется постоянной, при этом минимальное значение $0,19$ Вт/м·К достигается при значении модуля распределения $0,30$. На рис. 9б показана зависимость теплопроводности от плотности композита. Видно, что при низкой плотности теплопроводность остается постоянной, а затем быстро увеличивается с ее ростом. Это соответствует полученным прежде данным [22, 24], которые показывают, что теплопроводность зависит не только от плотности, но в значительной степени и от состава.

Следует также указать, что для достижения более низкой теплопроводности рассматривать исключительно снижение плотности недостаточно. В нашем случае получена теплопроводность $0,21$ Вт/м·К при пористости $0,604$ (или плотности $0,93$ г/см³), в то время как в предыдущих работах для обычного гипскартона получена теплопроводность $0,30$ Вт/м·К при таком же значении пористости [13]. Таким образом, благодаря разработанному SGLC достигается снижение теплопроводности на 30%. ◀

Окончание в №2 (34) 2014