

УДК 691.54

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.31

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN wittok

DOI 10.62980/2076-0655-2024-395-402

## АКТИВАЦИОННОЕ ТВЕРДЕНИЕ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Кривобородов Ю. Р.<sup>1</sup>, Лежебоков Д. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

### АННОТАЦИЯ

*В цементной отрасли накоплен большой положительный опыт применения металлургических шлаков при производстве вяжущих материалов. Тем не менее объем использования шлаков в стройиндустрии остается незначительным – около 5...8% ежегодного их выхода. Это предопределяет необходимость эффективного использования их в строительстве, что требует разработки новых способов и приемов повышения качества шлакосодержащих цементов и бетонов на их основе. Проведены исследования по повышению активности доменных гранулированных шлаков и шлакопортландцементов путем отдельной и совместной активации в водной среде непосредственно перед приготовлением бетона на строительной площадке. Активация осуществлялась в аппаратах, где обрабатываемая среда подвергалась ударному гидродинамическому и кавитационному воздействию. Активация шлакопортландцемента, а также совместная активация цемента и шлака значительно повышает прочность образцов из цементного камня и бетона. Цементный камень, полученный на основе активированного цемента, обладает повышенной ранней прочностью за счет повышения пуццолановой активности шлаков и интенсивной гидратации клинкерных минералов, а поздней – за счет активного участия доменного гранулированного шлака в формировании структуры цементного камня. Полученные результаты позволяют более эффективно использовать отходы металлургической промышленности при получении цементов и бетонов на их основе.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** шлакопортландцемент, активация, гидратация, твердение, прочность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кривобородов Ю. Р., Лежебоков Д. А. Активационное твердение шлакопортландцемента // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, №4. – С. 395-402, DOI 10.62980/2076-0655-2024-395-402, EDN wittok

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN wittok

DOI 10.62980/2076-0655-2024-395-402

## ACTIVATION HARDENING OF PORTLAND CEMENT WITH ADDITION OF GRANULATED BLAST FURNACE SLAG

Krivoborodov Y. R.<sup>1</sup>, Lezhebokov D. A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering

### ABSTRACT

*The cement industry has accumulated a great positive experience in the use of metallurgical slags in the production of binding materials. The volume of slag utilization in the construction industry is 5...8% of their annual output. This predetermines the necessity of effective utilization of slags in construction. It is necessary to develop new methods and techniques to improve the quality of Portland blast furnace slag cement and concrete on their basis. The researches on increase of activity of blast furnace granulated slags and Portland blast furnace slag cement by their separate and joint activation in aqueous medium have been carried out. The activation was carried out immediately before the preparation of concrete at the construction site. The activation was carried out in apparatuses under hydrodynamic and cavitation impact. The activation of Portland blast furnace slag cement, as well as the joint activation of cement and granulated blast furnace slag significantly increases the strength of concrete samples. The specimens obtained on the basis of activated Portland blast furnace slag cement have increased early strength. This is due to increased pozzolanic activity of slag and intensive hydration of clinker minerals. The increased late strength of the samples is due to the active participation of blast furnace granulated slag in the formation of the structure of the hardened cement matrix. The obtained results allow more efficient use of metallurgical industry wastes in the production of cements and concretes.*

**KEY WORDS** Portland blast furnace slag cement, activation, hydration, hardening, durability

**FOR CITATION:** Krivoborodov Y. R., Lezhebokov D. A. Activation hardening of Portland cement with addition of granulated blast furnace slag // Technique and technology of silicates. – 2024. – Vol. 31, No 4. – Pp. 395-402, DOI 10.62980/2076-0655-2024-395-402, EDN wittok

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее важных направлений развития строительного материаловедения является снижение материало- и энергоёмкости производства вяжущих материалов и бетонов [1]. Наиболее перспективным является использование доменных гранулированных шлаков в составе цемента, снижающих клинкерный фактор и, соответственно выбросы углекислого газа при производстве цемента [2].

При использовании цемента с добавками топливо экономится и при изготовлении бетонных изделий. Полная топливоекмость готовых железобетонных изделий на основе цемента с добавками ниже, чем таких же изделий на основе бездобавочных клинкерных цемента. Малининой Л.А. [3] была очень четко показана энергоёмкость производства бетона на основе портландцемента и шлакопортландцемента. Преимущества шлакопортландцемента совершенно очевидны, так как при производстве этого вяжущего экономятся клинкер и энергия. Использование доменных гранулированных шлаков улучшает экологические условия окружающей среды.

Использование в производстве цемента доменного гранулированного шлака не только обеспечивает экономно клинкера и увеличение объема производства, но и существенно улучшает основные строительные-технические свойства цемента, повышая долговечность сооружений. При гидратации и твердении цемента образуется гидроксид кальция – наиболее растворимый и уязвимый компонент цементного камня, поэтому весьма важным является связывание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в труднорастворимые соединения, что достигается за счет введения в цемент шлака [4].

Портландцементы с доменным гранулированным шлаком имеют серьезные недостатки. Они характеризуются замедленной скоростью гидратации в начальный период твердения. Для повышения их активности необходимо учитывать их дисперсность [5-7].

Для повышения начальной прочности шлакопортландцемента предлагаются различные варианты его модифицирования ультрадисперсным компонентом [8]. Эффективным является использование в качестве ультрадисперсного компонента доменный гранулированный шлак с размером частиц до 1 мкм. Такой компонент вводится в шлакопортландцемент в виде суспензии вместо воды затворения [9].

Для улучшения характеристик цементных бетонов и снижение выбросов  $\text{CO}_2$  необходимо совершенствование существующих технологий. Предлагается повысить скорость твердения цемента с добавкой шлака путем двухстадийного помола и активацией их в роторно-пульсационном аппарате ударного действия.

Многими научными изысканиями [10-17] установлено активирование многокомпонентных цемента гидродинамическим воздействием. Такое активирование вызывает изменение фазового состава гидратных новообразований. Активирование гидродинамическим воздействием увеличивает количество гидросиликатов кальция и эттрингита [18-20].

Активирование предварительно гидратированных цемента гидродинамическим воздействием позволяет получать ультрадисперсные добавки. Применение таких добавок позволяет управлять свойствами цементной пасты и влиять на ее свойства [18,19]. При этом снижается

## INTRODUCTION

Currently, one of the most important directions of development of building materials science is the reduction of material and energy intensity of production of binders and concrete [1]. The most promising is the use of granulated blast-furnace slags in cement composition, reducing clinker factor and, accordingly, carbon dioxide emissions in cement production [2].

When using cement with additives, fuel is also saved in the production of concrete products. The total fuel intensity of ready-made reinforced concrete products based on cement with additives is lower than the same products based on additive-free clinker cements. Malinina L.A. [3] showed very clearly the energy intensity of concrete production on the basis of Portland cement and Portland blast furnace slag cement. The advantages of Portland blast furnace slag cement are quite obvious, as clinker and energy are saved in the production of this binder. The use of blast furnace granulated slag improves the ecological conditions of the environment.

The use of blast furnace granulated slag in cement production provides clinker saving and increase in production volume. Introduction of granulated blast furnace slag into the composition of Portland cement and significantly improves the basic construction and technical properties of cement, increasing the durability of structures. During hydration and hardening of cement, calcium hydroxide is formed. It is the most soluble and vulnerable component of cement stone. It is important to bind  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  into insoluble compounds. This is achieved by introducing slag into the cement [4].

Portland cements with granulated blast furnace slag have serious disadvantages. They are characterized by a slow rate of hydration in the initial period of curing. To increase their activity it is necessary to take into account their dispersibility [5-7].

To increase the initial strength of Portland blast furnace slag cement, various variants of its modification with ultradisperse component are proposed [8]. The use of blast-furnace granulated slag with particle size up to 1 micron as an ultradisperse component is effective. This component is introduced into Portland blast furnace slag cement as a slurry instead of mixing water [9].

In order to improve the performance of cement concrete and reduce  $\text{CO}_2$  emissions, it is necessary to improve the existing technologies. It is proposed to increase the curing rate of slag-added cements by two-stage grinding and activation in a rotary-pulsation impact apparatus.

The activation of multicomponent cements by hydrodynamic influence have shown Many scientific researches [10-17]. This activation causes a change in the phase composition of hydrate neoplasms. The activation by hydrodynamic influence increases the amount of calcium hydrosilicates and ettringite [18-20].

The activation of pre-hydrated cements by hydrodynamic influence makes it possible to obtain ultradisperse additives. The use of such additives makes it possible to control the properties of cement paste and influence its properties [18,19]. In this case, the porosity decreases and

пористость и повышается прочность цементного камня. Активирование многокомпонентных цементов гидродинамическим воздействием позволяет реализовывать технологии рециклинга бетонных смесей [20].

Двухстадийный помол и активация клинкера, гипса и доменного гранулированного шлака в роторно-пульсационном аппарате ударного действия позволяет повысить начальную прочность образцов бетона. Благодаря этому процессу прочность образцов бетона в поздние сроки твердения не только выравнивается по прочности с бездобавочным портландцементом, но и превышает его прочность [21, 22].

Целью данного исследования являлось повышение гидратационной активности шлакопортландцемента в ранний период твердения путем его двухстадийного помола и активацией в роторно-пульсационном аппарате ударного действия

#### Материалы и методы исследования

Для исследования были взяты портландцементный клинкер, доменный гранулированный шлак и природный гипс, химический состав которых представлен в табл. 1.

**ТАБЛИЦА 1 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**Table 1 Chemical composition of the materials used**

Материал Materials	Содержание оксидов, масс.% Oxide content, wt. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
Портландцементный клинкер Portland cement clinker	19,63	5,58	4,54	65,50	3,48	0,20	0,80
природный гипсовый камень natural gypsum	4,17	0,62	-	40,89	3,03	50,69	0,41
доменный гранулированный шлак granulated blast furnace slag	33,6	13,0	2,36	41,60	8,8	0,10	0,26

Минералогический состав портландцементного клинкера характеризовался следующим содержанием минералов (%): алит – 58; белит – 17; трехкальциевый алюминат – 7; четырехкальциевый алюмоферрит – 15.

Доменный гранулированный шлак характеризовался модулем основности  $M_0 = 1,08$  и модулем активности  $M_a = 0,38$ .

Активацию цементов проводили в лабораторной мешалке турбулентного типа, сочетающей в себе принципы работы центробежных насосов, дезинтеграторов и роторных аппаратов, отличающихся высокими рабочими характеристиками.

Определение физико-механических свойств цементов производили в соответствии с действующими стандартами.

Степень и кинетику гидратации, состав гидратных фаз, структуру цементного камня изучали с применением известных методов физико-химического анализа: дифференциально-термического анализа (ДТА), рентгено-фазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и оптической микроскопии.

#### Результаты и их обсуждение

Исследуемый шлакопортландцемент состоит из трех различных по физическим свойствам компонентов. Поэтому на первом этапе изучали размалываемость каждого компонента. Для оценки размалываемости использовали методику [23], согласно которой

the strength of cement stone increases. The activation of multicomponent cements by hydrodynamic influence allows to realize the recycling technologies of concrete mixtures [20].

Two-stage grinding and the activation of clinker, gypsum and blast furnace granulated slag in a rotary-pulsation impact apparatus allows to increase the initial strength of concrete samples. Due to this process, the strength of concrete specimens in late curing time not only equalizes in strength with unblended Portland cement, but also exceeds its strength [21, 22].

The purpose of this study was to increase the hydration activity of Portland blast furnace slag cement in the early period of hardening by its two-stage grinding and activation in a rotary-pulsation impact apparatus

#### Materials and methods of research

Portland cement clinker, granulated blast furnace slag and natural gypsum were taken for the study, the chemical composition of which is presented in Table 1.

The mineralogical composition of Portland cement clinker was characterized by the following mineral content (%): alite - 58; belite - 17; three-calcium aluminate - 7; four-calcium alumoferrite - 15.

The granulated blast furnace slag was characterized by basicity modulus  $M_0 = 1.08$  and activity modulus  $M_a = 0.38$ .

The cement activation was carried out in a laboratory stirrer of turbulent type, combining the principles of centrifugal pumps, disintegrators and rotary apparatuses characterized by high performance.

The physical and mechanical properties of cements were determined in accordance with the current standards.

The degree and kinetics of hydration, the composition of hydrate phases, and the structure of cement stone were studied using well-known methods of physical and chemical analysis: differential thermal analysis (DTA), X-ray phase analysis (XRF), scanning electron microscopy (SEM), and optical microscopy.

#### Results and discussion

The investigated Portland blast furnace slag cement consists of three different components in terms of physical properties. Therefore, at the first stage the grindability of each component was studied. To assess the grindability we used the method [23], according to which the grindability of the material is characterized by the functional dependence of the

размалываемость материала характеризуется функциональной зависимостью тонкости измельчения от величины удельного расхода энергии, затрачиваемой на процесс помола. Измельчение производили в лабораторной мельнице МБЛ по стандартной методике.

Размалываемость компонентов и шлакопортландцемента на их основе приведена в табл. 2.

fineness of grinding on the value of specific energy consumption spent on the grinding process. Grinding was carried out in a laboratory mill MBL according to standard methods.

The grindability of the components and Portland blast furnace slag cement based on them is given in Table 2.

**ТАБЛИЦА 2 РАЗМАЛЫВАЕМОСТЬ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**  
**Table 2 The grindability of the initial components and Portland blast furnace slag cement**

Материал Materials	Время помола, мин Grinding time, min	Остаток на сите, % Residue on the sieve, %		S <sub>уд</sub> , см <sup>2</sup> /г	Э <sub>уд</sub> , кВт.ч/т
		R <sub>02</sub>	R <sub>08</sub>		
Портландцементный клинкер Portland cement clinker	10	59	73,2	-	4,7
	30	7,5	44,6	1390	9,3
	60	3,6	5,2	2500	26,0
	90	0,0	4,5	2900	37,3
	100	0,0	3,5	3500	46,6
доменный гранулированный шлак granulated blast furnace slag	10	67,5	82,3	-	5,0
	30	23,0	54,5	1000	14,0
	60	5,6	20,0	1500	32,7
	90	1,5	6,0	2500	46,6
	120	0,5	3,6	3500	56,0
природный гипсовый камень natural gypsum	10	33,0	58	1700	4,7
	30	21,8	54	1000	11,7
	60	9,0	47	980	21
	80	14,5	56	820	35
Шлакопортландцемент Portland blast furnace slag cement	10	60	75	1000	4,7
	30	6,7	36,7	1800	11,7
	60	0,5	8,8	2600	23,5
	90	0,5	7,0	3100	28,0
	120	0,4	6,0	3500	45,0

Из представленных данных видно, что наиболее энергоемким является процесс измельчения шлака. Для получения цемента с удельной поверхностью 3500 см<sup>2</sup>/г требуется расход электроэнергии в количестве 56 кВт.ч/т. Для клинкера эта величина равна 46 кВт.ч/т.

Помол гипса вначале характеризуется резким снижением остатков на ситах, но затем он повышается в связи с процессами агломерации материала. Частицы его слипаются и остаток на ситах увеличивается. При этом его удельная поверхность остается выше, чем у других исследуемых материалов. Шлак, обладая высокой твердостью, способствует размалываемости клинкера. При достижении S<sub>уд</sub>=3500 см<sup>2</sup>/г удельный расход электроэнергии близок к величине, достигаемой при помоле портландцемента без добавки шлака. Анализ экспериментальных данных показывает, что шлак является наиболее трудно размалываемым компонентом шлакопортландцемента, предопределяющим удельную производительность мельницы и затраты электроэнергии на помол цемента.

С целью изучения влияния степени измельчения отдельных компонентов шлакопортландцемента на его свойства на следующем этапе исследований портландцементный клинкер и шлак раздельно размалывали до удельной поверхности S<sub>уд</sub> = 2500, 3500 и 4500 см<sup>2</sup>/г, а гипс – до S<sub>уд</sub>= 10000 см<sup>2</sup>/г. Затем измельченные материалы смешивали в различных пропорциях и определяли прочность образцов через 28 сут.. Результаты испытаний полученных проб цементов представлены на рис. 1.

From the presented data we can see that the most energy-intensive is the process of slag grinding. To obtain cement with a specific surface area of 3500 cm<sup>2</sup>/g requires electricity consumption of 56 kWh/t. For clinker this value is equal to 46 kWh/t.

The grinding of gypsum is initially characterized by a sharp decrease in the residues on the sieves. Then the residues on the sieves increase. This is due to the agglomeration processes of the material. The gypsum particles stick together and the residue on the sieves increases. The specific surface of the ground gypsum is higher than that of other materials under study. The slag, having high hardness, contributes to clinker grindability. When reaching S<sub>уд</sub>=3500 cm<sup>2</sup>/g specific power consumption is close to the value achieved when grinding Portland cement without the addition of slag. The analysis of experimental data shows that slag is the most difficult to grind component of Portland slag cement. This situation predetermines the specific mill productivity and power consumption for cement grinding.

In order to study the influence of the degree of grinding of individual components of Portland blast furnace slag cement on its properties at the next stage of research Portland cement clinker and slag were separately milled to a specific surface S<sub>уд</sub> = 2500, 3500 and 4500 cm<sup>2</sup>/g. The gypsum was ground to S<sub>уд</sub>= 10000 cm<sup>2</sup>/g. Then the milled materials were mixed in different proportions and the strength of the samples was determined after 28 days. The test results of the obtained cement samples are presented in Fig. 1.

РИСУНОК 1

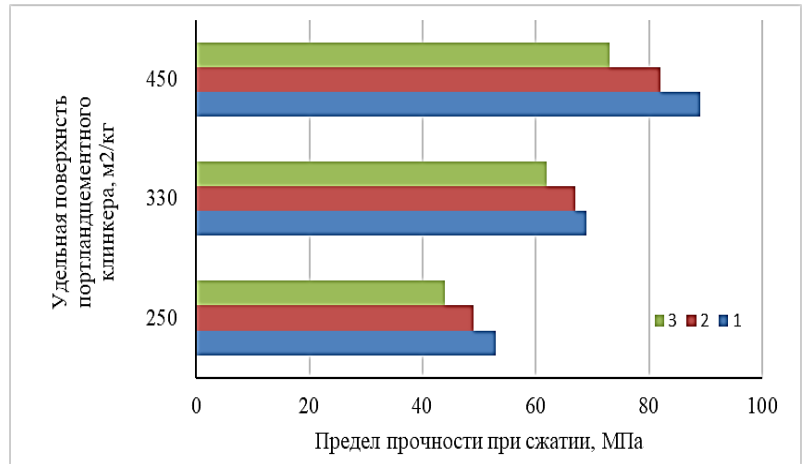
**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШЛАКОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ**

1 -  $S_{уд} = 450$ ; 2 -  $S_{уд} = 350$ ; 3 -  $S_{уд} = 250 \text{ м}^2/\text{кг}$

Figure 1

**Strength characteristics of Portland blast furnace slag cement depending on the degree of grinding of the slag component**

1 -  $S_{ud} = 450$ ; 2 -  $S_{ud} = 350$ ; 3 -  $S_{ud} = 250 \text{ м}^2/\text{кг}$



Как видно из представленных данных, грубый помол шлака ( $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) даже при высокой степени измельчения портландцементного клинкера ( $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) обуславливает меньшую прочность цементного камня. Наибольшая прочность ШПЦ обеспечивается при высокой степени измельчения обоих компонентов (портландцементного клинкера и шлака).

Полученные данные объясняют различие в прочности ШПЦ, полученного одностадийным и двухстадийным помолом (табл. 3).

As can be seen from the presented data, coarse grinding of slag ( $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) even at a high degree of grinding of Portland cement clinker ( $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) causes lower strength of cement stone. The highest strength of Portland blast furnace slag cement is provided at high degree of grinding of both components (Portland cement clinker and granulated blast furnace slag).

The obtained data explain the difference in the strength of Portland blast furnace slag cement obtained by one-stage and two-stage grinding (Table 3).

ТАБЛИЦА 3 Свойства ШПЦ, измельченного различным способом до  $S_{уд}=3500 \text{ см}^2/\text{г}$

Table 3 Properties of Portland blast furnace slag cement milled by different methods to  $S_{ud}=3500 \text{ см}^2/\text{г}$

Способ измельчения Method of grinding	В/Ц W/C	Прочность при сжатии, МПа, через сут Compressive strength, MPa, after day			Содержание фракций частиц размером в мкм, % Content of particle fractions with particle size in microns, %	
		1	3	28	более 80	менее 40
одностадийный one-stage method	0,40	8,6	21,6	38,9	28,5	38,5
двухстадийный two-stage method	0,40	12,7	31,6	46,2	16,5	54,5

Исследование состава отдельных фракций цемента после одностадийного измельчения, проведенные химическим и микроскопическим методом показало, что шлаковые частицы в основном находятся в более крупных фракциях (частицы размером более 40 мкм). В мелких фракциях (0-40 мкм) сосредоточены частицы портландцементного клинкера. При двухстадийном измельчении распределение частиц шлака в мелких фракциях (менее 40 мкм) увеличивается в 1,5 раза в сравнении с их содержанием в цементе, размолотым при одностадийном измельчении.

Анализ полученных данных по вещественному составу отдельных фракций цемента и его механических свойств, показывает, что грубое измельчение доменного шлака в ШПЦ одностадийного измельчения приводит к менее прочной структуре цементного камня в сравнении с прочностью двухстадийного измельчения шлакопортландцемента.

Для обеспечения равномерного гранулометрического состава компонентов шлакопортландцемента предложено активировать его гидродинамическим воздействием (табл. 4). Выполненные ранее исследования [16, 17] позволили разработать систему, при которой

The composition of individual cement fractions after one-stage grinding was investigated by chemical and microscopic methods. It is shown that slag particles are mainly found in larger fractions (particles larger than 40 microns). Portland cement clinker particles are concentrated in smaller fractions (0-40 microns). At two-stage grinding the amount of slag particles in the fine fractions (less than 40 microns) increases by 1.5 times in comparison with their content in cement ground at one-stage grinding.

Analysis of the obtained data on the material composition of individual fractions of cement and its mechanical properties, shows that coarse grinding of blast-furnace slag in one-stage grinding Portland blast furnace slag cement leads to a less strong structure of cement stone in comparison with the strength of two-stage grinding Portland blast furnace slag cement.

To ensure uniform particle size distribution of Portland blast furnace slag cement components, it was proposed to activate it by hydrodynamic influence (Table 4). Previous studies [16, 17] allowed to develop a system in which conventional grinding is carried out at a cement plant, and highly dispersed grinding is carried out at a reinforced concrete

обычный помол осуществляется на цементном заводе, а высокодисперсный – на заводе железобетонных изделий или строительной площадке. Активация шлакопортландцемента приводит к существенному увеличению прочности цементного камня.

Эффект механоактивации позволяет увеличить количество шлака в составе цемента, при сохранении его прочностных свойств (рис. 2).

products plant or a construction site. The activation of Portland blast furnace slag cement leads to a significant increase in the strength of cement stone.

The effect of mechanoactivation allows to increase the amount of slag in the cement composition, while maintaining its strength properties (Fig. 2).

**ТАБЛИЦА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АКТИВИРОВАННОГО ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**  
**Table 4 Test results of activated Portland blast furnace slag cement**

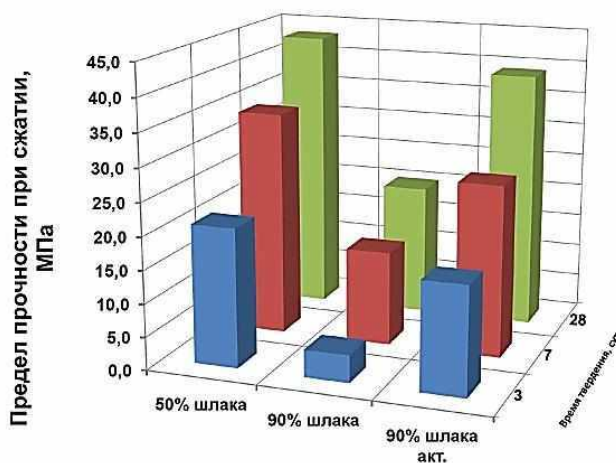
Цемент Cement	Обра- ботка Processin g	Распльв конуса, мм Cone spread, mm	Прочность, МПа, через сут Strength, MPa, after a day			
			при изгибе in bending		при сжатии in compression	
			3	28	3	28
Шлакопортландцемент Portland blast furnace slag cement	-	109	4,6	5,9	18	41
Активированный ШПЦ Activated Portland blast furnace slag cement	РПА – 3 мин	112	5,5	6,8	30	55

**РИСУНОК 2**

**ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОБЫЧНОГО И АКТИВИРОВАННОГО ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**

**Figure 2**

**The strength properties of ordinary and activated Portland blast furnace slag cement**



Резкое ускорение твердения цемента, измельченного в РПА, объясняется повышением его дисперсности и ускорением гидратации компонентов цемента. Перешедшие в раствор кристаллогидраты выполняют двоякую роль. 1. Способствуют появлению многочисленных центров кристаллизации. 2. Являются подложкой для кристаллизации гидратных новообразований. Такой эффект изменяет структуру гидратных новообразований в соответствии со структурой самой затравки.

По данным сканирующей электронной микроскопии выкристаллизовывание продуктов гидратации на подложках, расположенных в поровом пространстве, приводит к уменьшению крупных пор, повышению плотности упаковки частиц и возникновению большого числа кристаллических сростков в единице объема твердеющей системы.

**Выводы**

Тонкое измельчение доменного гранулированного шлака обеспечивает повышение прочностных характеристик шлакопортландцемента и бетонов на его основе. Гидродинамическое воздействие на шлаковую составляющую цемента обуславливает увеличение в цементном камне количество гидросиликатов кальция и этtringита.

The sharp acceleration of hardening of cement ground in RPA is explained by the increase in its dispersibility and acceleration of hydration of cement components. The crystalline hydrates transferred into the solution fulfill a twofold role. 1. They promote the appearance of numerous crystallization centers. 2. They are a substrate for crystallization of hydrate neoplasms. This effect changes the structure of hydrate neoplasms in accordance with the structure of the inoculum itself.

According to scanning electron microscopy data, crystallization of hydration products on substrates located in the pore space leads to a decrease in large pores, an increase in the packing density of particles and the emergence of a large number of crystalline aggregates per unit volume of the solidifying system.

**Conclusions**

The fine grinding of blast-furnace granulated slag provides increase of strength characteristics of Portland blast furnace slag cement and concretes on its basis. The hydrodynamic effect on the slag component of cement causes an increase in the amount of calcium hydrosilicates and ettringite in the cement stone. In this case the porosity decreases and,

При этом снижается пористость и, соответственно, повышается плотность и прочность цементного камня. Использование в строительной индустрии активированного шлакопортландцемента сопровождается меньшими затратами топлива в производстве цемента и бетона, обеспечивается снижение экологической нагрузки.

#### Литература:

1. XIII International Congress on Chemistry of Cement/ Abstracts and Proceedings. – Madrid, 2011.- 538 p.
2. Гусев Б.В., Самуил Иень-лянь, Кузнецова Т.В. Цементы и бетоны – тенденции развития /под общей редакции Б.В. Гусева. – М.: Научный мир, 2012. – 136 с.
3. Малинина Л.А. Проблемы использования в бетонах цементов с активными добавками / Цемент, 1986, № 5, С.10-14.
4. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
5. Самченко, С. В. Влияние дисперсности шлакового компонента на свойства шлакопортландцемента / С. В. Самченко, О. В. Земскова, И. В. Козлова // Техника и технология силикатов. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 19-23. – EDN WAOLWF.
6. Самченко, С. В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфалоуминатного клинкера на формирование структуры цементного камня / С. В. Самченко, Д. А. Зорин, И. В. Борисенкова // Техника и технология силикатов. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 12-14. – EDN NWEQWR.
7. Малахин С. С., Кривобородов Ю. Р. Влияние дисперсности шлака на свойства портландцемента // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXII, №2 (198). — Т. 32. — РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2018. — С. 114–116.
8. Complex Method of Stabilizing Slag Suspension / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova [et al.] // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018: Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983, Voronezh and Samara, Russia, 10–13 декабря 2018 года. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 817-827. – DOI 10.1007/978-3-030-19868-8\_80. – EDN HKNSQQ.
9. Сравнительный анализ способов модифицирования шлакопортландцемента ультрадисперсным компонентом / С. В. Самченко, И. В. Козлова, О. В. Земскова [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 113-120. – EDN HUNNTF.
10. Плотников В.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние активирующих наноструктур на синтез и качество клинкера // Сухие строительные смеси. – 2010, №6. – С. 34-37.
11. Yury R. Krivoborodov, Svetlana V. Samchenko. The increase of hydration activity of Portland cement by additives of crystalline hydrates // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 974. — P. 195–200.
12. Кривобородов Ю.Р., Еленова А.А. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента // Строительные материалы. М. – 2016, - №9. – С. 65-67.
13. Антонов Г.Л., Островский О.Л., Кривобородов Ю.Р. Безусадочный шлакопортландцемент // Стеновые доклады II Международного совещания по химии и технологии цемента. Том III. – СПб, 2000. □ с.242-244.
14. Effective ecological building materials based on activated ash-cement mixtures / E. Potapova, Y. Krivoborodov, S. Samchenko, T. Kouznetsova // 18 International Multidisciplinary scientific Geoconference SGEM 2018, 2 July – 8 July 2018, Albena, Bulgaria. — Vol. 18 of 26. SECTION GREEN BUILDINGS

accordingly, the density and strength of cement stone increases. The use of activated Portland blast furnace slag cement in the construction industry is accompanied by lower fuel consumption in the production of cement and concrete, reducing the environmental load.

#### References:

1. XIII International Congress on Chemistry of Cement/ Abstracts and Proceedings. – Madrid, 2011.- 538 p.
2. Gusev B.V., Samuil Ien'-lyan', Kuznecova T.V. Cementy i betony – tendencii razvitiya /pod obschey redakcii B.V. Guseva. – M.: Nauchnyy mir, 2012. – 136 s.
3. Malinina L.A. Problemy ispol'zovaniya v betonah cementov s aktivnymi dobavkami / Cement, 1986, № 5, S.10-14.
4. Samchenko, S. V. Formirovanie i genезis struktury cementnogo kamnya / S. V. Samchenko. – 2-e izdanie. – Moskva: Nacional'nyy issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, 2020. – 288 s. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
5. Samchenko, S. V. Vliyanie dispersnosti shlakovogo komponenta na svoystva shlakoportlandcemента / S. V. Samchenko, O. V. Zemskova, I. V. Kozlova // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2016. – Т. 23, № 2. – С. 19-23. – EDN WAOLWF.
6. Samchenko, S. V. Vliyanie dispersnosti glinozemistogo shlaka i sul'foaluminatnogo klinkera na formirovanie struktury cementnogo kamnya / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, I. V. Borisenkova // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 12-14. – EDN NWEQWR.
7. Malahin S. S., Krivoborodov Yu. R. Vliyanie dispersnosti shlaka na svoystva portlandcemента // Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii: sb. nauch. tr. Tom XXXII, №2 (198). — Т. 32. — RHTU im. D.I. Mendeleeva, Moskva, 2018. — С. 114–116.
8. Complex Method of Stabilizing Slag Suspension / S. Samchenko, I. Kozlova, O. Zemskova [et al.] // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018: Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983, Voronezh and Samara, Russia, 10–13 декабря 2018 года. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 817-827. – DOI 10.1007/978-3-030-19868-8\_80. – EDN HKNSQQ.
9. Sravnitel'nyy analiz sposobov modifitsirovaniya shlakoportlandcemента ul'tradispersnym komponentom / S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, O. V. Zemskova [i dr.] // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 113-120. – EDN HUNNTF.
10. Plotnikov V.V., Krivoborodov Yu.R. Vliyanie aktiviruyushchih nanostruktur na sintez i kachestvo klinkera // Suhie stroitel'nye smesi. – 2010, №6. – С. 34-37.
11. Yury R. Krivoborodov, Svetlana V. Samchenko. The increase of hydration activity of Portland cement by additives of crystalline hydrates // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 974. — P. 195–200.
12. Krivoborodov Yu.R., Elenova A.A. Primenenie mikrodispersnykh dobavok dlya uskoreniya tverdeniya cementa // Stroitel'nye materialy. M. – 2016, - №9. – С. 65-67.
13. Antonov G.L., Ostrovskiy O.L., Krivoborodov Yu.R. Bezusadchnyy shlakoportlandcement // Stendovye doklady II Mezhdunarodnogo soveschaniya po himii i tehnologii cementa. Tom III. – SPb, 2000.– s.242-244.
14. Effective ecological building materials based on activated ash-cement mixtures / E. Potapova, Y. Krivoborodov, S. Samchenko, T. Kouznetsova // 18 International Multidisciplinary scientific Geoconference SGEM 2018, 2 July – 8 July 2018, Albena, Bulgaria. — Vol. 18 of 26. SECTION GREEN BUILDINGS TECHNOLOGIES AND MATERIALS. — "Alexander Malinov" Sofia, Bulgaria, 2018. — P. 135–142.
15. Sulimenko L.M., Krivoborodov Yu.R., Plotnikov V.V., Shalunenko N.I. Mehanoaktivaciya vyazhushchih kompozitsiy na

TECHNOLOGIES AND MATERIALS. — "Alexander Malinov" Sofia, Bulgaria, 2018. — P. 135–142.

15. Сулименко Л.М., Кривобородов Ю.Р., Плотников В.В., Шалуенко Н.И. Механоактивация вяжущих композиций на основе техногенных продуктов / Известия высших учебных заведений. Строительство. — 1998, № 10. — С. 51–56.

16. Кривобородов Ю.Р., Плотников В.В. Эффективность домола цемента в устройстве для диспергирования смесей // Цемент. 1988. № 12. С. 16–17.

17. Gusev B.V., In Y.-I.S., Krivoborodov Y. R. Acceleration of slag cement hardening // 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015). — The Chinese Ceramic Society Beijing, China, 2015. — P. 3\_9–1–3\_9–5.

18. Самченко, С. В. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты / С. В. Самченко, Е. С. Егоров // Техника и технология силикатов. — 2019. — Т. 26, № 2. — С. 52–57. — EDN DAQXRC.

19. Самченко, С. В. Управление свойствами цементной пасты при ее модифицировании предварительно гидратированной цементной суспензией / С. В. Самченко, Е. С. Егоров // Техника и технология силикатов. — 2021. — Т. 28, № 2. — С. 54–58. — EDN IPOIXD.

20. Самченко, С. В. Особенности повторного использования цементных суспензий при реализации технологии рециклинга бетонных смесей / С. В. Самченко, Е. С. Егоров, М. А. Абрамов // Вестник МГСУ. — 2021. — Т. 16, № 12. — С. 1573–1581. — DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. — EDN MNTVKM.

21. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. — Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, 2016. — 113 с. — ISBN 978-5-7264-1230-6. — EDN XMA YRX.

22. Тихомирова И.Н., Шибакова В.С. Цемент на основе активированных доменных гранулированных шлаков // Техника и технология силикатов. — 2011. — Т. 18, № 1. — С. 19–22.

23. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельницы. — Новосибирск: ВО «Наука», 1993. — 240 с.

osnove tehnogennykh produktov / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. — 1998, № 10. — С. 51–56.

16. Krivoborodov Yu.R., Plotnikov V.V. Effektivnost' domola cementa v ustroystve dlya dispergirvaniya smesey // Cement. 1988. № 12. С. 16–17.

17. Gusev B.V., In Y.-I.S., Krivoborodov Y. R. Acceleration of slag cement hardening // 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2015). — The Chinese Ceramic Society Beijing, China, 2015. — P. 3\_9–1–3\_9–5.

18. Samchenko, S. V. Vliyanie ul'tradispersnoy dobavki iz predvaritel'no gidratirovannogo cementa na svoystva cementnoy pasty / S. V. Samchenko, E. S. Egorov // Tehnika i tehnologiya silikatov. — 2019. — Т. 26, № 2. — С. 52–57. — EDN DAQXRC.

19. Samchenko, S. V. Upravlenie svoystvami cementnoy pasty pri ee modifitsirovani predvaritel'no gidratirovannoy cementnoy suspenziy / S. V. Samchenko, E. S. Egorov // Tehnika i tehnologiya silikatov. — 2021. — Т. 28, № 2. — С. 54–58. — EDN IPOIXD.

20. Samchenko, S. V. Osobennosti povtornogo ispol'zovaniya cementnykh suspenziy pri realizatsii tehnologii reciklinga betonnykh smesey / S. V. Samchenko, E. S. Egorov, M. A. Abramov // Vestnik MGSU. — 2021. — Т. 16, № 12. — С. 1573–1581. — DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. — EDN MNTVKM.

21. Gusev, B. V. Tehnologiya portlandcementa i ego raznovidnostey: Uchebnoe posobie / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. — Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Ay Pi Er Media, 2016. — 113 s. — ISBN 978-5-7264-1230-6. — EDN XMA YRX.

22. Tihomirova I.N., Shibakova V.S. Cement na osnove aktivirovannykh domennykh granulirovannykh shlakov // Tehnika i tehnologiya silikatov. — 2011. — Т. 18, № 1. — С. 19–22.

23. Kryhtin G.S., Kuznecov L.N. Intensifikatsiya raboty mel'nicy. — Novosibirsk: VO «Наука», 1993. — 240 s.

**Работа представлена на II Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития».**

**Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».**

**The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”**

**Кривобородов Юрий Романович** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [KrivoborodovYUR@mgsu.ru](mailto:KrivoborodovYUR@mgsu.ru) (автор для связи)

**Лежебоков Дмитрий Александрович** - аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

**Вклад авторов:** Кривобородов Ю.Р. – идея, научное руководство, Лежебоков Д.А. – обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Krivoborodov Yuri Romanovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State Construction University, E-mail: [KrivoborodovYUR@mgsu.ru](mailto:KrivoborodovYUR@mgsu.ru) (author for communication)

**Lezhebokov Dmitry Alexandrovich** - Postgraduate student, National Research Moscow State Construction University.

**Contribution of the authors:** Krivoborodov Yu.R. – idea, scientific supervision, Lezhebokov D.A. – processing of material, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.