

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 620.22, 666.3-135

П. И. Серов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ОГНЕУПОРНОГО ВОЛОКНА

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является жаростойкий композиционный материал на основе магнезимального связующего и огнеупорного волокна. Предметом исследования является влияние химического состава и параметров технологического процесса на физико-механические свойства жаростойкого композиционного материала. Цель работы – замена выгорающих в процессе работы, дорогостоящих, токсичных органических связующих на магнезимальное вяжущее.

Материалы и методы. При проведении исследований использовали: сернокислый магний (эпсомит) ТУ 6-18-153-82, муллитокремнеземистая вата (рулонная) МКРР-130 (ГОСТ 23619-79), теплоизоляционное огнеупорное измельченное алюмосиликатное стекловолокно (ТУ 14-204-18-95 марки ТИАС), вспученный вермикулит.

Результаты. При использовании раствора сернокислого магния плотностью от 1,04 до 1,15 г/см³ композиционные волокнистые изделия имеют плотность от 150 до 350 кг/м³, прочность при изгибе до 0,2 МПа и линейную усадку после обжига не более 2 %. Введение зернистого наполнителя до 40–50 % увеличивает газопроницаемость материала в 1,5 раза, при этом скорость воздушного потока через материал увеличивается в 2–2,5 раза и уменьшается влажность после формования до 120–150 %, что позволяет спрогнозировать существенное сокращение времени и энергозатрат на сушку.

Выводы. Разработаны составы волокнистых изделий на магнезимальном связующем со средней плотностью 250–600 кг/м³ и температурой применения 1100–1200 °С, не уступающие по качеству существующим изделиям на основе огнеупорной глины и поливинилацетатной дисперсии.

Ключевые слова: жаростойкий композиционный материал магнезимальное связующее, огнеупорное волокно, заполнители, сульфатный раствор, газопроницаемость.

P. I. Serov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A HEAT-RESISTANT COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF A MAGNESIA BINDER AND A REFRACTORY FIBER

Abstract.

Background. The research objects are heat-resistant composite materials on the basis of a magnesia binder and a refractory fiber. The research subject is the influence of the chemical compound and parameters of the technological process on physical and mechanical properties of the heat-resistant material. The purpose of the present work is to replace binders that burn out during functioning, expensive and toxic organic binders with the magnesia binder.

Materials and methods. In the research the author used magnesium sulfate (ep-somite), mullite fiber in a form of rolls, heat insulating and heat-resistant dispersed aluminosilicate glass fiber, exfoliated vermiculate.

Results. When the magnesium sulfate solution has a density in range 1.04 to 1.15 g/cm³, the composite fiber widgets have a density in range 150 to 350 kg/m³, bending strength up to 2 kg/cm², and the linear shrinking not more than 2 %. Introduction of 40–50 % of a grain-formed filler increases diffusion of gases into the materials, thus, the speed of air flow through the material increases 2–2.5 times and wetness after forming decreases up to 120–150 % that allows to predict a significant decrement of time and energy spent on drying.

Conclusions. The author developed the compounds of fiber products on the basis of the magnesia binder with average density of 250–600 kg/m³ and operating temperature of 1100–1200 °C, being in no way inferior to the existing products on the basis of refractory clay and polyvinyl acetate dispersion.

Key words: heat-resistant composite material, magnesia cement, heat-resistant fiber, cement aggregates, sulfate solution, gas permeability.

Введение

В начале 1990-х гг. вновь появился интерес к композиционным материалам на основе магнезильного связующего. Преимуществами данных материалов являются высокие прочностные характеристики, быстрые темпы нарастания прочности, способность выдерживать повышенные температуры нагрева.

Анализ применения магнезильного связующего показал возможность его применения при изготовлении различных высокотемпературных и теплоизоляционных композиционных материалов [1, 2]. Однако в этих композиционных изделиях вследствие термического разложения магнийсодержащих соединений наблюдался сброс прочности после термообработки. В композиционных материалах с плотной структурой (цементы, бетоны) этот эффект может привести к полному разрушению изделия.

1. Исходные материалы и методы проведения исследований

При проведении исследований в качестве исходного компонента связующего использовался сернокислый магний (эпсомит), в качестве волокнистого армирующего компонента при изготовлении изделий использовалась муллитокремнеземистая вата (рулонная) и теплоизоляционное огнеупорное измельченное алюмосиликатное стекловолокно [3].

В качестве легкого наполнителя применялся вспученный вермикулит [4] фракции 2,5–5,0 мм следующего химического состава (% по массе): SiO₂ – 38,60; Al₂O₃ – 12,10; Fe₂O₃ – 6,30; FeO – 0,60; MgO – 27,80; CaO – 1,80; R₂O – 0,40; TiO₂ – 0,80.

Исследования проводились по стандартным методикам (ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испыта-

ний»), а также по методикам, изложенным в ГОСТах: среднюю плотность определяли по ГОСТ 2409–2014; предел прочности при изгибе – по ГОСТ Р50526–93; определение дополнительной линейной усадки и роста – по ГОСТ 5402–81. Исследование теплопроводности композиционных материалов на магниальном связующем проводили при стационарном тепловом режиме по методике, приведенной в ГОСТ 7076–99, на образцах размерами $100 \times 100 \times 20$ мм.

2. Разработка составов жаростойкого композиционного материала

В смесителе пропеллерного типа готовилось магниальное связующее путем смешивания сухого сернокислого магния и воды. Туда же подавалось муллитокремнеземистое волокно, которое в процессе перемешивания измельчалось и связывалось с раствором сульфата магния. Отношение твердой и жидкой фаз брали от 1:4 до 1:16 в зависимости от состава композиционного материала.

Из смесителя готовая масса подавалась в перфорированную форму, где с помощью пневмопресса формовали опытные образцы плит размером $100 \times 200 \times 20$ мм и $100 \times 100 \times 20$ мм. Отформованные изделия сушили при температуре 105–110 °С. В процессе исследований контролировали следующие физико-механические характеристики образцов композиционного материала: плотность, прочность при изгибе, линейную усадку при нагревании.

Исследования показали, что плотность опытных образцов зависит от изменения плотности раствора сульфатного связующего. С увеличением плотности раствора связующего с 1,04 до 1,24 г/см³ плотность изделий увеличивается от 240 до 450 кг/м³ (рис. 1).

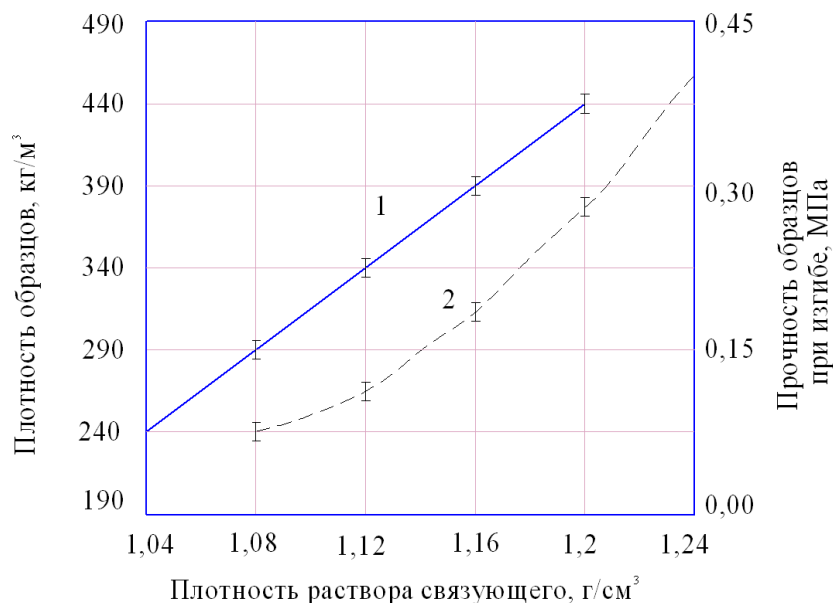


Рис. 1. Зависимость плотности и прочности опытных образцов от плотности раствора сульфатного связующего: 1 – плотность образцов кг/м³; 2 – прочность образцов при изгибе, МПа

Для определения линейной усадки при максимальной температуре применения опытные образцы изделия подвергали обжигу при температуре

1100 °С. На рис. 2 показано изменение величины усадки опытных образцов в зависимости от изменения плотности раствора. Из графика видно, что с увеличением плотности раствора связующего от 1,04 до 1,24 г/см³ линейная усадка возрастает до 4 %.

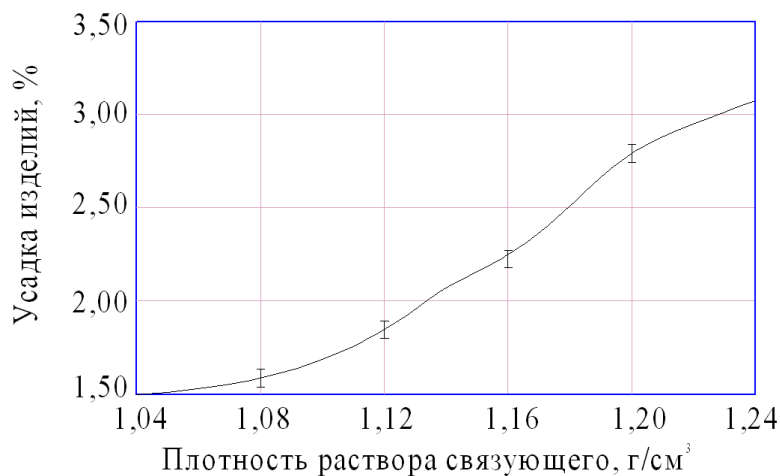


Рис. 2. Зависимость усадки опытных образцов от плотности раствора сульфатного связующего

Максимальная плотность сульфатного связующего, при которой линейная усадка готовых изделий не превышает 2 %, составляет 1,13–1,15 г/см³.

Таким образом, при использовании в качестве магнезиального связующего раствора сернокислого магния плотностью от 1,04 до 1,15 г/см³ можно получать композиционные волокнистые изделия плотностью от 150 до 350 кг/м³ с прочностью при изгибе до 2 кг/см² и линейной усадкой после обжига при температуре 1100 °С не более 2 %.

3. Исследование физико-механических и жаростойких свойств композиционных материалов

В работе были изучены такие важнейшие характеристики жаростойких композиционных материалов на основе магнезиального связующего и муллитокремнеземистого волокна, как средняя плотность, прочность при сжатии, прочность при изгибе, линейная термическая усадка, коэффициент теплопроводности. В табл. 1 приведены физико-механические и жаростойкие свойства разработанных композиционных материалов.

4. Промышленная технология изготовления жаростойких теплоизоляционных изделий на основе магнезиального связующего и муллитокремнеземистого волокна

В разрабатываемой технологии в основу была положена технология изготовления минераловатных плит повышенной жесткости на синтетическом связующем, при которой сушка волокнистого материала осуществляется путем прохождения горячих газов через его толщину, что становится возможным вследствие хорошей газопроницаемости слоя.

Таблица 1

Физико-механические и жаростойкие свойства
жаростойких композиционных материалов на основе
магнезимального связующего и муллитокремнеземистого волокна

Свойства	Составы	
	композиционного материала	
Плотность, кг/м ³	250	340
Прочность при сжатии после сушки, МПа	0,3	0,51
Прочность при изгибе после сушки, МПа	0,2	0,3
Прочность при изгибе после обжига при 1100 °С, МПа	0,07	0,10
Усадка после обжига при 1100 °С, %	1,5	1,7
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°К при 500 °С	0,1	0,13
Температура применения, °С	1100	1100

Аналогичная сушка материала из огнеупорного волокна затруднена из-за малого диаметра волокон (3–4 мкм) и их плотной укладки в процессе формирования.

Газопроницаемость такого материала мала, что обуславливает применение стендового способа при производстве плит из огнеупорного волокна и продолжительной сушки изделий (до 12–16 ч) в туннельных сушилках [5].

Коэффициент газопроницаемости рассчитывали по результатам фильтрации газа (воздуха) через слой исследуемого образца с заданным составом, влажностью при определенных технологических параметрах, близких к параметрам работающих промышленных конвейерных линий.

Исследования проводили на лабораторной установке (рис. 3), которая состоит из вентилятора 1, дифференциального манометра 2, камеры с образцом 3, ротаметра 4, воздухопроводов 5. Используются ротаметры РМ-2,5. I УЗ, РМ-40 ГУЗ по ГОСТ 13045–81. Опытные образцы имели следующие размеры: 110×100×5 мм. Исследуемый образец очищали от пыли и загрязнения и устанавливали в металлическую камеру-форму 3 на имеющиеся в ней упоры. Пространство между металлической камерой и образцом по всему периметру тщательно промазывали вакуумной замазкой на всю величину выступающей части плиты. Воздуховоды 5 соединены с нижней частью камеры ротаметром 4 и вентилятором 1. При достижении требуемой величины разряжения под образцом на шкале ротаметра фиксировалась отметка расхода воздуха. Показания шкалы ротаметра на основании паспортных данных переводятся в единицы показателя расхода воздуха Q (м³/ч).

В табл. 2 приведены экспериментальные расчетные данные коэффициента газопроницаемости для минеральной ваты, огнеупорной ваты и вспученного вермикулита фракции 2,5–5,0 мм.

Газопроницаемость слоя из огнеупорной ваты в 5–8 раз меньше газопроницаемости слоя из минеральной ваты и слоя из вспученного вермикулита, что и объясняет трудности изготовления плит из огнеупорного волокна по конвейерной технологии. Повысить газопроницаемость слоя из огнеупорного волокна можно введением в материал волокнистого или зернистого наполнителя.

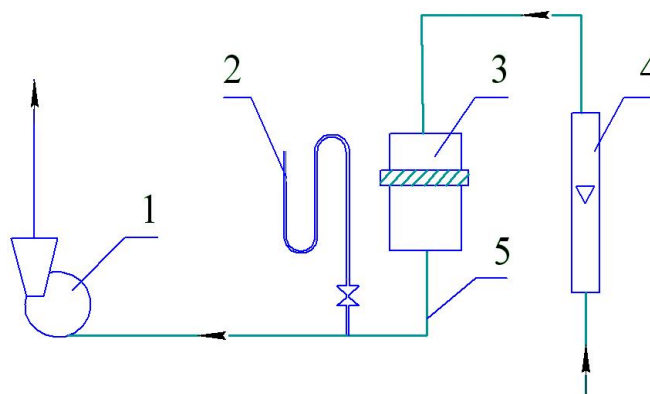


Рис. 3. Схема установки для определения газопроницаемости волокнистых композиционных плит: 1 – вентилятор; 2 – дифференциальный манометр; 3 – камера с образцом; 4 – ротаметр; 5 – воздуховоды

Таблица 2

Коэффициенты газопроницаемости для минеральной ваты, огнеупорной ваты и вспученного вермикулита

Материалы	Коэффициент газопроницаемости
Вспученный вермикулит	0,25
Минеральная вата	0,15
Муллитокремнеземистая вата (огнеупорная вата)	0,03

Для дальнейших исследований в качестве наполнителя был выбран вспученный вермикулит фракции 2,5–5,0 мм Ковдорского месторождения, так как вспученный вермикулит по своим жаростойким свойствам близок к огнеупорным волокнистым материалам [6].

Исследования по выявлению оптимального количества наполнителя проводили с помощью метода математического планирования эксперимента. В ходе работы было установлено, что с увеличением количества наполнителя скорость воздушного потока через слой образца возрастает, следовательно увеличивается коэффициент газопроницаемости.

Введение зернистого заполнителя до 40–50 % увеличивает газопроницаемость материала в 1,5 раза, при этом скорость воздушного потока через материал увеличивается в 2–2,5 раза и уменьшается влажность после формования до 120–150 %, что позволяет осуществить процесс сушки волокнистого материала в камере тепловой обработки технологической линии. На основании этого можно сделать предположение о возможности выпуска изделий на основе огнеупорного волокна по конвейерной технологии.

На рис. 4 показана зависимость величины коэффициента газопроницаемости от количества вводимого наполнителя.

На основе результатов данных методами математического планирования эксперимента провели исследование по изменению скорости воздушного потока через слой волокнистого материала на основе огнеупорного волокна и наполнителя.

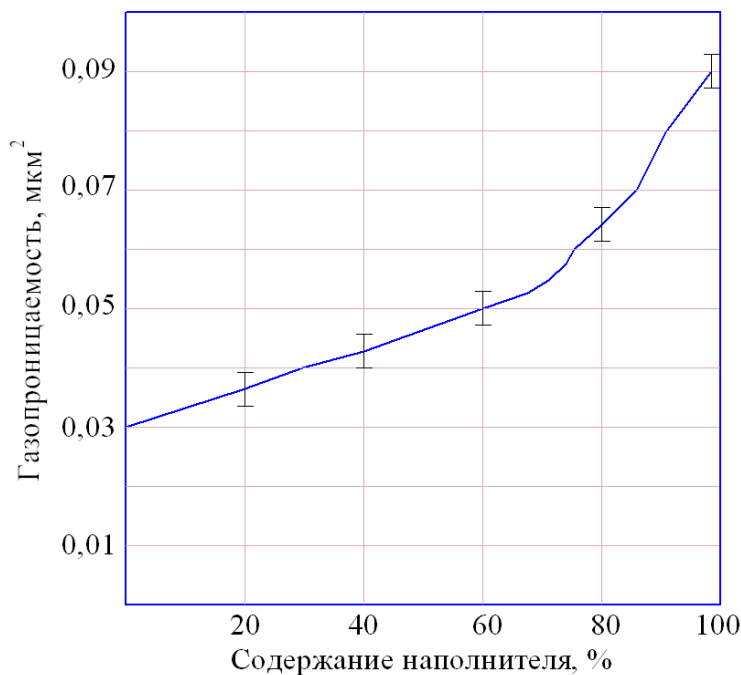


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента газопроницаемости от количества вводимого наполнителя

Основные операции конвейерной технологии производства плит повышенной жесткости из гидромассы (приготовление гидромассы, формование материала и его термообработка) осуществляется на конвейере в непрерывном потоке. Обезвоживание и сушка осуществляются за счет создаваемого разрежения методом прососа газовоздушной массы сквозь толщу материала.

Из приведенной на рис. 5 зависимости видно, что скорость воздушного потока через слой из огнеупорного волокна в 20–40 раз меньше скорости воздушного потока через слой из минеральной ваты.

Поэтому при конвейерном способе производства термообработка изделий из огнеупорного волокна требует больших энергозатрат и времени. Скорость воздушного потока через слой вспученного вермикулита в 12–25 раз выше, чем через слой из огнеупорного волокна.

Скорость воздушного потока возрастает в 1,5–2,5 раза с увеличением содержания вспученного вермикулита в составе массы и составляет при гидравлическом сопротивлении слоя 4 кПа – 0,08 м/с; 0,13 м/с, а при гидравлическом сопротивлении 8 кПа – 0,17 м/с; 0,3 м/с.

Введение вспученного вермикулита в гидромассы из огнеупорного волокна способствует увеличению скорости прососа воздушного потока через отформованный слой (рис. 6).

Основной операцией конвейерного производства волокнистых теплоизоляционных изделий является сушка, которая зависит от гидродинамики потока теплоносителя и его физических свойств. Чтобы повысить интенсивность сушки, необходимо увеличить теплообмен между теплоносителем и волокнистым материалом. Это возможно за счет увеличения скорости прососа теплоносителя.

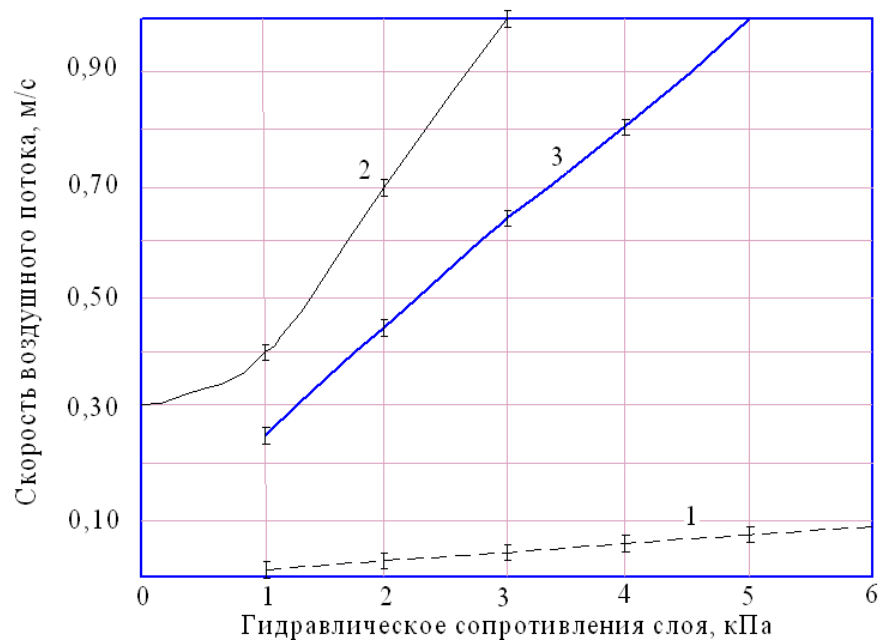


Рис. 5. Зависимость скорости прососа воздушного потока от гидравлического сопротивления слоя и его состава: 1 – огнеупорное волокно; 2 – минеральная вата шлакового состава; 3 – вспученный вермикулит

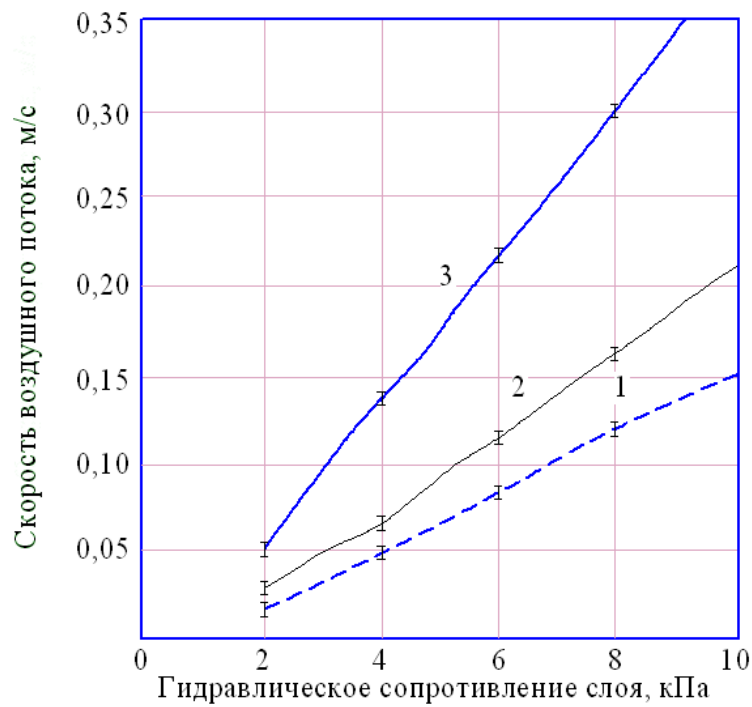


Рис. 6. Зависимость скорости прососа воздушного потока через отформованный слой от гидравлического сопротивления слоя и его состава: 1 – огнеупорное волокно 100 %; 2 – огнеупорное волокно 70 %, вспученный вермикулит 30 %; 3 – огнеупорное волокно 50 %, вспученный вермикулит 50 %

Введение вспученного вермикулита в матрицу [7] способствует увеличению скорости прососа теплоносителя, тем самым снижает время тепловой обработки.

Заключение

В результате проведенных исследований:

- определена оптимальная плотность связующего, позволяющая получать материалы с высокими прочностными показателями до 0,2 МПа и низкой линейной усадкой не более 2 %;

- установлено, что введение армирующего элемента алюмосиликатного стекловолокна предотвращает резкое уменьшение прочности после термообработки, а введение вермикулита в качестве одного из компонентов матрицы снижает энергозатраты на сушку;

- волокнистые изделия на магнезиальном связующем не уступают по качеству существующим изделиям на основе огнеупорной глины и поливинилацетатной дисперсии.

Список литературы

1. **Антонов, Г. И.** Исследования по производству и применению магнезиальных огнеупоров / Г. И. Антонов // Производство специальных огнеупоров : тематический отраслевой сборник / Минчермет СССР. – М. : Metallurgiya, 1977. – № 5. – С. 21–32.
2. **Антонов, Г. И.** Безобжиговые переклазоуглеродистые огнеупоры на фенольном связующем / Г. И. Антонов // Огнеупоры и техническая керамика. – 1988. – № 9. – С. 22–26.
3. **Абызов, А. Н.** Разработка и исследование огнеупорного волокнистого материала на магнезиальном связующем / В. А. Абызов, В. Н. Подкопаев, Ч. Г. Пак // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 1–2.
4. **Пак, Ч. Г.** Жаростойкие теплоизоляционные материалы на основе магнезиального связующего и огнеупорных волокон / Ч. Г. Пак, В. А. Абызов, П. И. Серов // Новые огнеупоры. – 2015. – № 3.
5. Эффективные жаростойкие материалы и конструкции для тепловых агрегатов промышленности строительных материалов : сб. науч. трудов. – Челябинск : УралНИИСтромпроект, 1989. – 174 с.
6. **Серов, П. И.** Жаростойкие бетоны на магнезиальном связующем, шамотных заполнителях с добавками огнеупорных волокнистых материалов и вспученного вермикулита / П. И. Серов, Ч. Г. Пак, В. М. Батрашов // Композиционные строительные материалы. Теория и практика : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2015. – 182 с.
7. **Батрашов, В. М.** Разработка и исследование высокотемпературной матрицы для жаростойкого поризованного материала / В. М. Батрашов, Ч. Г. Пак // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 112–119.

References

1. Antonov G. I. *Proizvodstvo spetsial'nykh ogneuporov: tematicheskiiy otraslevoy sbornik* [Production of special refractory materials: subject collection]. Minchermet SSSR. Moscow: Metallurgiya, 1977, no. 5, pp. 21–32.
2. Antonov G. I. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractory materials and technical ceramics]. 1988, no. 9, pp. 22–26.

3. Abyzov A. N., Podkopaev V. N., Pak Ch. G. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractory materials and technical ceramics]. 2010, no. 1–2.
4. Pak Ch. G., Abyzov V. A., Serov P. I. *Novye ogneupory* [New refractory materials]. 2015, no. 3.
5. *Effektivnye zharostoykie materialy i konstruksii dlya teplovykh agregatov promyshlennosti stroitel'nykh materialov: sb. nauch. Trudov* [Efficient refractory materials and structures for heat units of industrial construction materials: proceedings]. Chelyabinsk: UralNIIstromproekt, 1989, 174 p.
6. Serov P. I., Pak Ch. G., Batrashov V. M. *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy. Teoriya i praktika: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Composite construction materials. Theory and practice: proceedings of the International scientific and technical conference]. Penza, 2015, 182 p.
7. Batrashov V. M., Pak Ch. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 112–119.

Серов Павел Иванович
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: metal@pnzgu.ru

Serov Pavel Ivanovich
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 620.22, 666.3-135

Серов, П. И.

Разработка и исследование жаростойкого композиционного материала на основе магнезимального связующего и огнеупорного волокна / П. И. Серов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 111–120.