

Научная статья
УДК 666.9-1
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.042

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ВЯЖУЩЕЕ НА ОСНОВЕ СЕРПЕНТИНИТА СОКОЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ АМФИБОЛИТОВ

**Ирина Петровна Кременецкая¹, Вера Владимировна Тюкавкина²,
Светлана Николаевна Ивашевская³, Кирилл Андреевич Яковлев⁴**

^{1, 2, 4}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

³Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

¹i.kremenetskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3531-8273>

²v.tiukavkina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1593-8782>

³ivashevskaja@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5836-3889>

⁴k.iakovlev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3338-1802>

Аннотация

Исследовано влияние температуры обжига измельченной серпентиновой породы Соколовского месторождения амфиболитов (Сахалинская обл.) на прочность магнезиально-силикатного вяжущего. Установлено, что оптимальными условиями получения термоактивированного серпентинита является температура обжига 675–725 °С, выдержка 25 мин. Прочность на сжатие образцов гидравлического вяжущего после 28 сут твердения составляет 5,91–6,15 МПа. Активирующие добавки позволяют увеличить прочность серпентинового вяжущего до 46,7 МПа.

Ключевые слова:

серпентинит, минеральный состав, термоактивация, магнезиально-силикатное вяжущее, прочность

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук № FMEZ-2025-0059.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0059.

Для цитирования:

Гидравлическое вяжущее на основе серпентинита Соколовского месторождения амфиболитов / И. П. Кременецкая [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 248–252. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.042.

Original article

HYDRAULIC BINDING AGENT BASED ON SERPENTINITE FROM AMPHIBOLITE DEPOSIT SOKOLOVSKOE

Irina P. Kremenetskaia¹, Vera V. Tiukavkina², Svetlana N. Ivashevskaya³, Kirill A. Yakovlev⁴

^{1, 2, 4}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre

“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

³Institute of Geology, Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

¹i.kremenetskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3531-8273>

²v.tiukavkina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1593-8782>

³ivashevskaja@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5836-3889>

⁴k.iakovlev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3338-1802>

Abstract

The effect of firing temperature of crushed serpentine rock from the Sokolovskoye amphibolite deposit (Sakhalin Region) on the strength of magnesia-silicate binder was studied. It was found that the optimal conditions for obtaining thermally activated serpentinite are firing temperature of 675–725 °C, holding for 25 minutes. Compressive strength of hydraulic binder samples after 28 days of hardening is 5,91–6,15 MPa. Activating additives increase the strength of serpentine binder to 46,7 MPa.

Keywords:

serpentinite, mineral composition, thermal activation, magnesia-silicate binder, strength

Acknowledgments:

The article was supported by the federal budget on the topic of the state assignment of the Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No. FMEZ-2025-0059.

Funding:

State task on the topic of research No-2025-0059.

For citation:

Hydraulic binding agent based on serpentinite from amphibolite deposit Sokolovskoe / I. P. Kremenetskaia [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 248–252. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.042.

Введение

Серпентинит представляет собой широко распространенную на территории России горную породу. Основными минералами породы являются лизардит, антигорит, хризотил с общей формулой $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Гидросиликаты магния при термообработке переходят в метастабильное состояние, в котором они проявляют вяжущие свойства, что предопределяет возможность их использования в производстве строительных материалов. Несмотря на огромные запасы, магнезиально-силикатное сырье не получило широкого применения и используется в небольшом объеме в качестве декоративного и поделочного камня, щебня и для производства огнеупоров [1; 2]. В работе [3] показано, что серпентинит может быть использован для получения вяжущих композиций различного функционального назначения. Использование в производстве строительных материалов серпентинитовых отходов может быть перспективным направлением, позволяющим получить экологически чистые материалы с улучшенными свойствами и снизить затраты на производство.

Целью работы являлась оценка возможности получения вяжущего гидравлического твердения на основе серпентиновой породы Соколовского месторождения амфиболитов (Сахалинская обл., Россия).

Материалы и методы

В исходной серпентиновой породе выделено три разновидности, которые отличаются по минеральному составу (табл. 1). Методами физико-химического анализа установлено, что серпентинит состоит преимущественно из хризотила, лизардита, содержит также антигорит. Помимо серпентиновых минералов идентифицируются амфиболит, магнетит, форстерит. Породу дробили на щековой дробилке и затем рассеивали на грохоте. Вяжущее получали из серпентинита фракции <0,5 мм (материал СМ) и 0,5–1,0 мм (материал СК).

Таблица 1

Характеристика разновидностей серпентиновой породы

Образец	Описание разновидности породы	Минеральный состав	А, %	В, %
ВП1	Рыхлая расслаивающаяся выветрелая порода оливкового цвета	Хризотил, лизардит, магнетит, амфибол, форстерит	80	60
ВП2	Плотный серо-коричневый материал, серпентин желтовато-зеленого цвета с пятнистой, слоистой текстурой	Антигорит, магнетит, амфибол, форстерит	5	75
ВП3	Плотный, цвет темно-зеленый почти черный	Хризотил, магнетит	15	90

Примечание. А — содержание разновидности в породе; В — содержание серпентиновых минералов в разновидности породы.

Термообработку серпентиновых порошков проводили в муфельной печи, температура обжига изменялась от 600 до 800 °С. Доизмельчение обожженного серпентинита проводили в вибрационном истирателе. Степень измельчения контролировали по удельной поверхности ($S_{уд}$), которую определяли на приборе ПСХ-8А методом Козени — Кармана по воздухопроницаемости и пористости уплотненного слоя порошка.

В качестве активаторов твердения использовали суперпластификатор (СП) на основе поликарбоксилатного эфира Glenium 51 компании ООО «БАСФ Строительные системы» с плотностью $1,10 \pm 0,02$ г/см³ и два вида кремнезема: пирогенный кремнезем с $S_{уд.}$ 19,4 м²/г (г. Новокузнецк) и нанопористый SiO₂ с $S_{уд.}$ 600 м²/г, полученный в лабораторных условиях при выщелачивании магнезиально-железистых шлаков комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК» [4].

Для определения прочности серпентинового вяжущего формовали образцы размером $2 \times 2 \times 2$ см. При приготовлении цементного теста пирогенный кремнезем тщательно перемешивали с термоактивированным серпентинитом, нанопористый SiO₂ вводили в цементное тесто в виде суспензии после ультразвукового диспергирования (УЗД) в течение 10 мин в водной среде, СП вводили на последней стадии перемешивания. УЗД проводили при помощи ультразвукового диспергатора УЗД 2-0,1/22, генерирующего ультразвуковое поле с частотой 22 кГц и мощностью 0,2 Квт. Цементное тесто перемешивали при помощи лабораторного автоматического растворосмесителя E093 (BeraTest AG, Швейцария).

Прочность образцов определяли через 3, 7, 28 сут твердения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 90–95 %. Прочность при сжатии и изгибе определяли при помощи пресса гидравлического малогабаритного ПГМ-100МГ4А (ООО «Специальное конструкторское бюро “Стройприбор”», Челябинск, Россия, 2012).

Результаты

На первом этапе работы были определены оптимальные технологические параметры получения термоактивированного серпентинита: температура обжига, время изотермической выдержки. Согласно данным дифференциально-термического анализа (ДТА), максимум основного эндотермического эффекта дегидратации исходного серпентинита соответствует температуре 680–700 °С, полное удаление воды наблюдается при температуре 750–780 °С. Интервалы температур указаны для СМ и СК — меньшее и большее значение соответственно.

Определение оптимальной температуры обжига выполнено с применением серпентинита СМ, измельченного после термоактивации до $S_{уд.}$ 5 500–6 000 см²/г, образцы вяжущего формовали из теста нормальной густоты (36,0 %). Температурный интервал 650–800 °С (шаг 25 °С) выбран исходя из результатов ДТА, продолжительность выдержки 20 мин. В качестве основного критерия оценки эффективности термоактивации была выбрана прочность вяжущего (рис. 1).

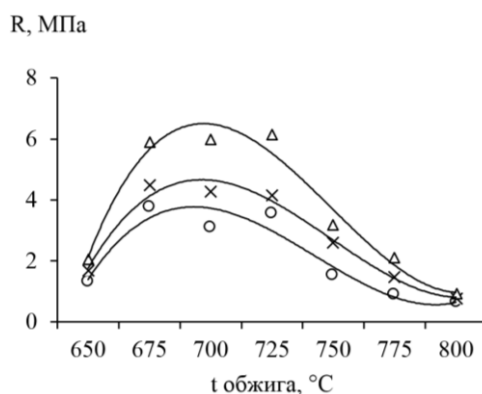


Рис. 1. Влияние температуры обжига на прочность при сжатии серпентинитового вяжущего

На основании полученных экспериментальных данных (см. рис. 1) установлено, что оптимальная температура обжига серпентинита составляет 675–725 °С, в указанном диапазоне температур серпентинитовый цемент обладает наибольшей прочностью, которая через 28 сут твердения образцов составляет 5,91–6,15 МПа. При дальнейшем повышении температуры обжига прочность образцов резко снижается и для серпентинита, полученного при температуре 800 °С, составляет лишь 0,92 МПа.

Снижение прочности материала связано с трансформацией активной магнезиально-силикатной фазы в кристаллические форстерит и энстатит. Как известно, после полной дегидратации и выше прочность структуры не восстанавливается. Фактически активность материала обеспечивается за счет восстановления прочности волокон [5].

Помимо температуры обжига была установлена оптимальная продолжительность изотермической выдержки. Серпентинит выдерживали в печи от 10 до 30 мин с интервалом 5 мин при 700 °С, далее измельчали до $S_{уд.}$ 5 150–5 700 см²/г и из теста нормальной густоты (33,0 %) готовили образцы. Максимальная прочность серпентинитового цемента фиксируется при изотермической выдержке в течение 25 мин (рис. 2). Серпентиновое вяжущее на основе термоактивированного СМ превосходит по прочности цементные образцы, приготовленные с использованием серпентинита СК, в 3,0–4,5 раза. Данный факт обусловлен фазовым составом серпентинита. По сравнению с СМ в материале СК больше магнетита и антигорита, которые обуславливают снижение прочности серпентинитового вяжущего.

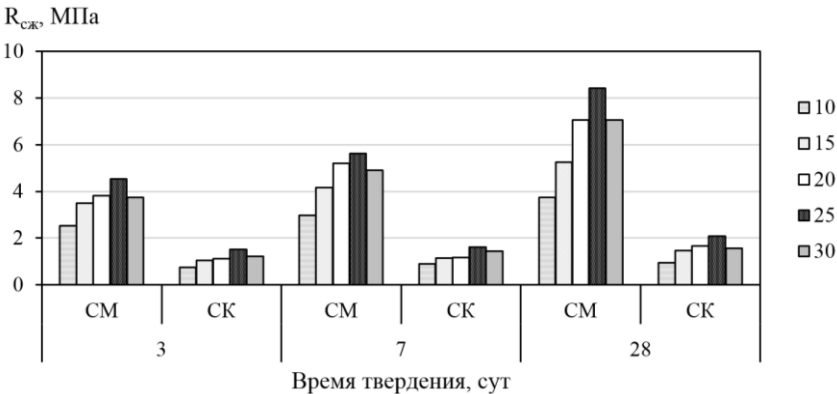


Рис. 2. Влияние продолжительности изотермической выдержки (минуты, указаны в легенде) и фракционного состава (варианты СМ и СК) на прочность образцов

Более высокие показатели прочности серпентинитового цемента были достигнуты при использовании активирующих добавок. Для исследования использовали термоактивированный серпентинит, полученный при оптимальных условиях (температура обжига 700 °С, время изотермической выдержки 25 мин) и размолотый до удельной поверхности 4 500 см²/г. Введение в состав цементного теста суперпластификатора на основе поликарбоксилатного эфира Glenium 51 в количестве 1,0 мас. % способствовало повышению прочности в 1,8–2,1 раза (в зависимости от времени твердения) по сравнению с образцами без добавки (табл. 2).

Таблица 2

Влияние активирующих добавок на прочность серпентинитового цемента

Состав	Добавка			В/Ц	Предел прочности при сжатии, МПа через ... сут твердения		
	СП, мас. %	пиро-SiO ₂ , мас. %	нано-SiO ₂ , мас. %		3	7	28
С-54		—		0,300	6,2	8,9	12,2
С-48	1,0	—		0,255	13,1	16,3	23,7
С-51	1,0	9,0	1,0	0,285	25,3	25,9	46,7

Активирование серпентинитового цемента пирогенным SiO₂ (9 мас. %) и нанопористым кремнеземом (1 мас. %) совместно с СП (1 мас. %) позволило увеличить прочность образцов в 3,0–4,1 раза относительно состава без добавок (см. табл. 2). Прочность вяжущего, активированного SiO₂ совместно с СП, в 28-суточном возрасте достигла 46,7 МПа.

Выводы

Проведенными исследованиями установлено, что серпентинитовые отходы могут служить сырьем для получения магнезиально-силикатного вяжущего. На основе термоактивированного серпентинита, а также добавок аморфного кремнезема и суперпластификатора на основе поликарбоксилатного эфира получено композиционное вяжущее гидравлического твердения с прочностью 46,7 МПа.

Список источников

1. Пустовгар А. П., Лукутцова Н. П., Устинов А. Г. Изучение свойств мелкозернистого бетона модифицированного нанодисперсной добавкой серпентинита // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 155–162.
2. Худяков Л. И. Войлошников О. В., Нархинова В. П. Перспективы использования магнезисиликатных горных пород в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2006. № 12. С. 44–46.
3. Новые функциональные вяжущие материалы на основе серпентинита / Н. Ф. Федоров, А. С. Князев, Г. К. Ивахнюк, Н. В. Майданова, А. С. Дринберг, Т. Э. Маметнабиев // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). 2022. № 62 (88). С. 45–49.
4. Получение аморфного кремнезема из шлаков цветной металлургии и его использование для магнезиальных вяжущих / В. В. Тюкавкина, А. Г. Касиков, Б. И. Гуревич, Е. А. Майорова // Химическая технология. 2014. № 3. С. 167–172.
5. Зырянова В. Н., Лыткина Е. В., Очур-оол А. П., Манзырыкчы Х. Б. Серпентинитовый цемент и вяжущие композиции на его основе // Качество. Технологии. Инновации. Материалы V Международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2022. С. 70–79.

References

1. Pustovgar A. P., Lukutcova N. P., Ustinov A. G. Izuchenie svojstv melkozernistogo betona modifitsirovannogo nanodispersnoj dobavkoj serpentinita [Study of the properties of fine-grained concrete modified with nanodisperse serpentinite additive]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2013, No. 3, pp. 155–162. (In Russ.).
2. Hudjakov L. I. Vojloshnikov O. V., Narhinova V. P. Perspektivy ispol'zovaniya magnijsilikatnyh gornyh porod v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Prospects of using magnesium silicate rocks in the production of building materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2006, No. 12, pp. 44–46. (In Russ.).
3. Fedorov N. F., Knjazev A. S., Ivahnjuk G. K., Majdanova N. V., Drinberg A. S., Mametnabiev T. E. Novye funkcional'nye vjazhushchie materialy na osnove serpentinita [New functional binding materials based on serpentinite]. *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo instituta (Tehnicheskogo universiteta)* [Proceedings of the St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)], 2022, No. 62 (88), pp. 45–49. (In Russ.).
4. Tjukavkina V. V., Kasikov A. G., Gurevich B. I., Majorova E. A. Poluchenie amorfnogo kremnezema iz shlakov cvetnoj metallurgii i ego ispol'zovanie dlja magnezial'nyh vjazhushchih [Production of amorphous silica from non-ferrous metallurgy slags and its use for magnesia binders]. *Himicheskaja tehnologija* [Chemical technology], 2014, No. 3, pp. 167–172. (In Russ.).
5. Zyrjanova V. N., Lytkina E. V., Manzyrykchy H. B. Serpentinитovyy cement i vjazhushchie kompozicii na ego osnove [Serpentinite cement and binding compositions based on it]. *Kachestvo. Tehnologii. Innovacii. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (g. Novosibirsk, 2022)* [Quality. Technologies. Innovation. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, 2022, pp. 70–79. (In Russ.).

Информация об авторах

И. П. Кременецкая — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
В. В. Тюкавкина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
В. Н. Ивашевская — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник;
К. А. Яковлев — инженер.

Information about the authors

I. P. Kremenetskaia — PhD (Engineering), Senior Researcher;
V. V. Tiukavkina — PhD (Engineering), Senior Researcher;
S. N. Ivashetskaya — PhD (Physics & Mathematics), Researcher;
K. A. Yakovlev — Engineer.

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.
The article was submitted 26.05.2025; approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.