

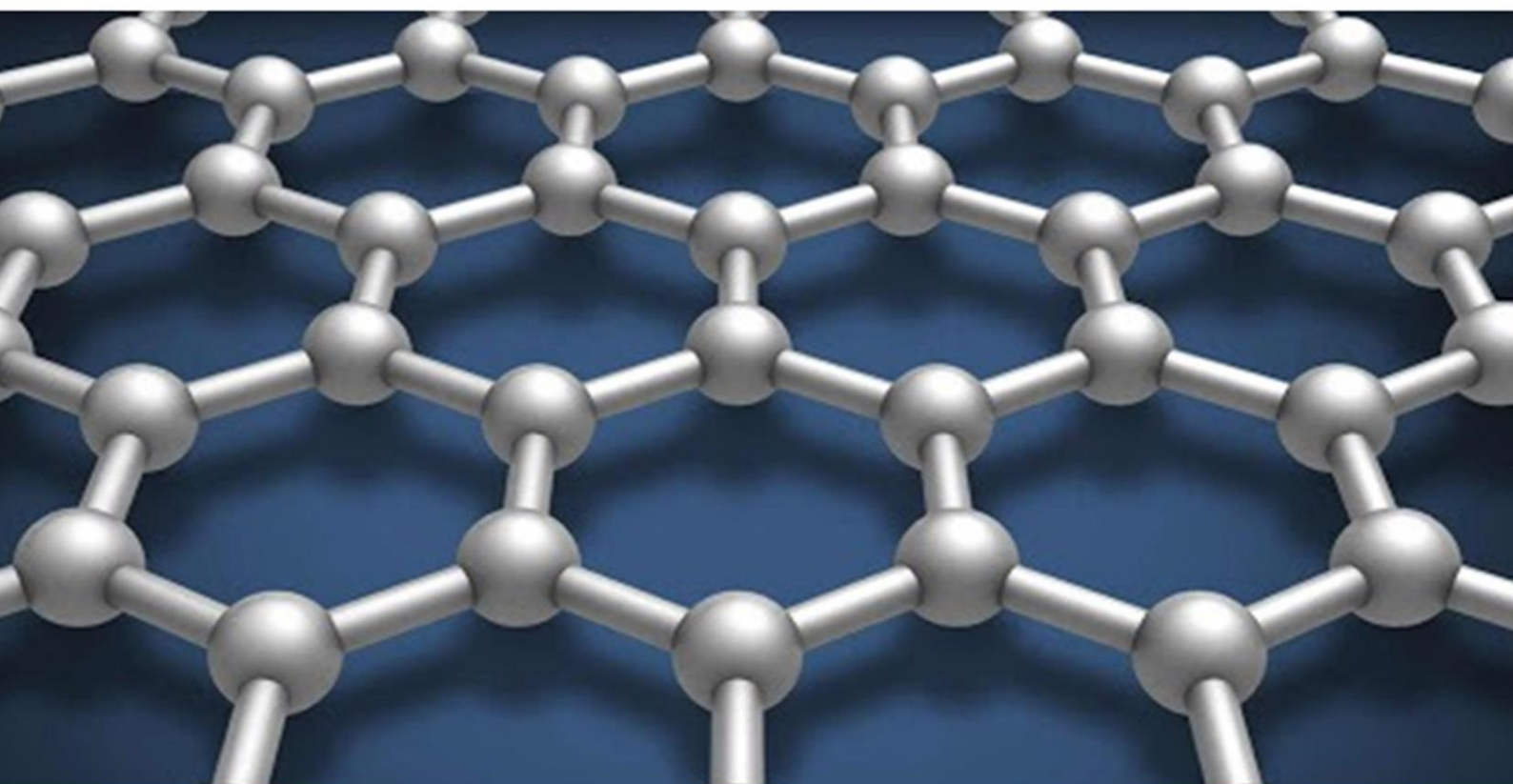
ISSN 2091-5527

№ 3/2026

O'zbekiston

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Узбекский научно-технический и производственный журнал
Композиционные материалы

УДК 661.846:549.623

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРПЕНТИНИТА СУЛТАНУИЗДАГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Джандуллаева Мунавара Сапарбаевна¹, Бекчанов Бегзод Бахтиярович¹,
Эркаев Ақтам Улашович¹, Кучаров Бархом Хайриевич²

¹ Ташкентский химико-технологический институт

² Институт общей неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Исследовано влияние температуры (415–800 °С) и продолжительности (15–90 мин) обжига на потерю массы, насыпную плотность и элементный состав серпентинита Султануиздагского месторождения. При 761,56–800 °С потеря массы возрастает до 9,25–10,90 % вследствие дегидроксилирования серпентина, а плотность при 800 °С снижается на 15,8 % относительно исходной. Увеличение выдержки при 800 °С с 30 до 90 мин повышает отношение Si/Mg с 1,11 до 1,28.

Ключевые слова: серпентинит, термическая обработка, дегидроксилирование, потеря массы, плотность, элементный состав, ICP-анализ.

Введение. Серпентинит – горная порода, сложенная преимущественно минералами группы серпентина $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, – является перспективным сырьём для получения соединений магния. Прямое кислотное разложение природного серпентинита протекает недостаточно полно, поэтому для повышения его реакционной способности применяют предварительную термическую активацию [1, 2]. При нагревании серпентин теряет структурную воду: дегидроксилирование протекает преимущественно в интервале 600–800 °С и сопровождается образованием аморфизированной фазы, а при более высоких температурах – кристаллизацией форстерита [3, 4]. Степень аморфизации и, соответственно, растворимость материала в кислотах существенно зависят от температуры и продолжительности обжига [4, 5].

Султануиздагское месторождение (Республика Каракалпакстан) располагает значительными запасами серпентинитов.

Целью работы являлось установление влияния температуры и продолжительности термической обработки на потерю массы, плотность и элементный состав серпентинита

этого месторождения для обоснования режима его подготовки к сернокислотному разложению.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования служил серпентинит Султануиздагского месторождения. Навески исходного материала массой $100 \pm 0,2$ г (при 761,56 °С – около 50 г) обжигали в лабораторной муфельной печи при температурах 415, 586, 761,56 и 800 °С с продолжительностью изотермической выдержки 30, 60 и 90 мин; для 761,56 °С дополнительно исследовали выдержку 15 мин. Потерю массы Δm (%) рассчитывали как отношение разности масс навески до (m_0) и после обжига к исходной массе. Насыпную плотность определяли весовым методом с использованием мерного цилиндра.

Элементный состав образцов фракции 0,315 мм, обожжённых при режимах 415 °С – 90 мин, 586 °С – 90 мин и 800 °С – 30, 60 и 90 мин, определяли методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP).

Результаты и обсуждение. Результаты определения потери массы и плотности приведены в таблице 1 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

Потеря массы и плотность серпентинита после термической обработки

№	Температура, °С	Время, мин	Масса, m_0 , г	Δm , %	Насыпная плотность, ρ , г/см ³
1	Исходный серпентинит				1,407
2	415	30	100,21	0,39	1,495
3		60	100,08	0,58	1,353
4		90	100,06	0,66	1,342
5	586	30	100,44	0,49	1,503
6		60	100,15	0,47	1,465
7		90	100,44	0,54	1,313
8	761,56	15	50,32	4,57	1,582
9		30	50,29	6,01	1,553
10		60	50,21	7,05	1,523
11		90	50,39	9,25	1,483
12	800	30	100,23	9,75	1,225
13		60	100,02	10,87	1,198
14		90	100,14	10,90	1,185

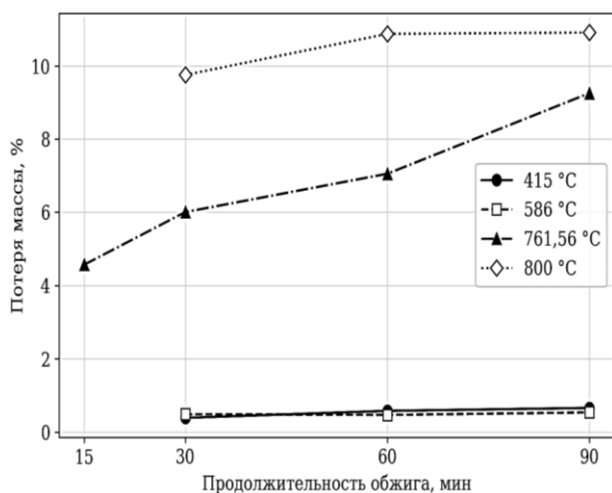


Рис. 1. Зависимость потери массы серпентинита от продолжительности обжига

Как следует из таблицы 1 и рисунка 1, при 415 и 586 °C потеря массы невелика (0,39–0,66 %) и слабо зависит от продолжительности выдержки. Она обусловлена удалением адсорбированной и слабосвязанной воды. Между 586 и 761,56 °C потеря массы возрастает более чем на порядок, что указывает на температурный порог дегидроксилирования серпентина и согласуется с литературными данными [3, 4]. При 761,56 °C потеря массы последовательно увеличивается с 4,57 % (15 мин) до 9,25 % (90 мин), то есть процесс ещё не завершён и определяется продолжительностью выдержки. При 800 °C потеря массы составляет 9,75 % после 30 мин и 10,87–10,90 % после 60–90 мин; следовательно, основная часть структурной воды удаляется в течение первых 60 мин, после чего масса практически стабилизируется. Полученные значения близки к теоретическому содержанию структурной воды в серпентине (около 13 %) [4].

Изменение плотности носит более сложный характер (рис. 2). После кратковременной обработки при 415–761,56 °C плотность превышает исходное значение (1,407 г/см³) и

составляет 1,495–1,582 г/см³, что может быть связано с удалением адсорбированной влаги и уплотнением упаковки частиц. С увеличением продолжительности выдержки плотность снижается: при 415 и 586 °C после 90 мин она становится ниже исходной (1,342 и 1,313 г/см³), а при 761,56 °C уменьшается с 1,582 до 1,483 г/см³. Наиболее существенное снижение плотности наблюдается при 800 °C: 1,225; 1,198 и 1,185 г/см³ после 30, 60 и 90 мин соответственно; после 90 мин плотность на 15,8 % ниже исходной. Снижение плотности при 800 °C, по-видимому, обусловлено разрушением кристаллической структуры серпентина при дегидроксилировании и формированием более пористого материала. Изменение плотности не пропорционально потере массы, поскольку определяется не только удалением воды, но и структурной перестройкой образца.

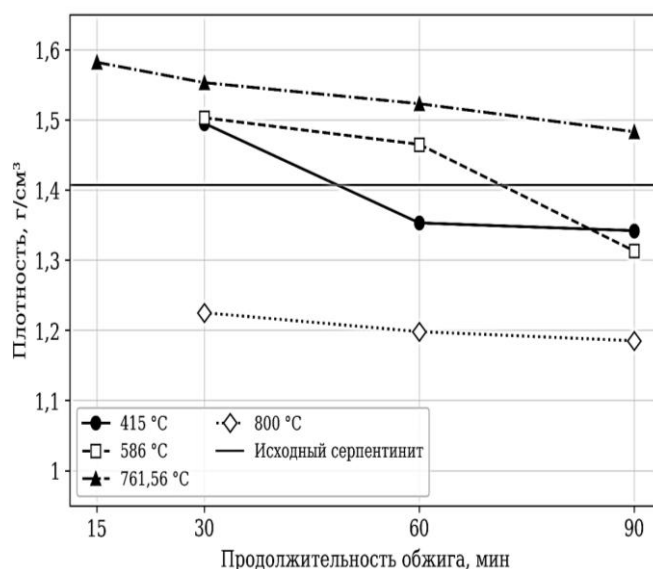


Рис. 2. Зависимость плотности серпентинита от продолжительности обжига

Результаты ИСП-анализа основных элементов приведены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Содержание основных оксидов в серпентините после термической обработки, мас. %

T, °C	τ, мин	MgO	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO	NiO	Si/Mg
415	90	37,89	43,95	4,77	0,56	0,47	0,29	0,16	1,16
586	90	40,12	42,92	4,55	0,59	0,46	0,29	0,16	1,07
800	30	39,63	43,85	5,22	0,79	0,58	0,38	0,20	1,11
800	60	37,71	43,62	4,95	0,79	0,51	0,37	0,19	1,16
800	90	34,60	44,30	4,74	0,72	0,47	0,34	0,19	1,28

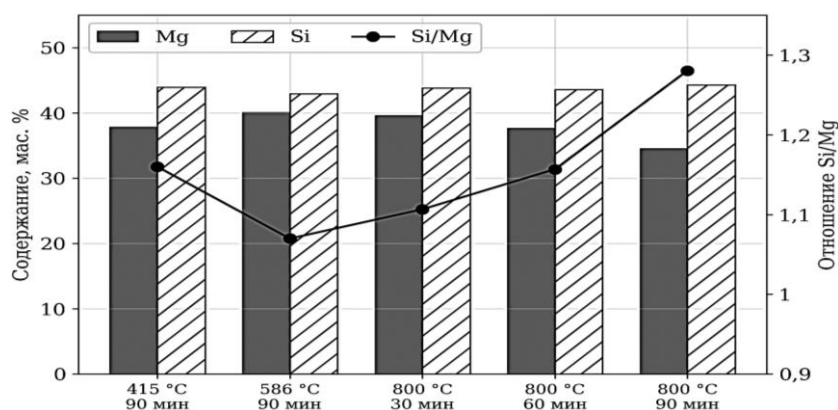


Рис. 3. Содержание MgO, SiO₂ и отношение Si/Mg в серпентините после термической обработки

При повышении температуры от 415 до 586 °C (выдержка 90 мин) элементный состав изменяется незначительно. После обжига при 800 °C в течение 30 мин по сравнению с образцом, обожженным при 586 °C, содержание FeO возрастает примерно на 15 %, Cr₂O₃ — примерно на 25 %, что может быть связано с термическим преобразованием железо- и хромсодержащих минералов. Увеличение продолжительности выдержки при 800 °C с 30 до 90 мин сопровождается последовательным снижением содержания MgO с 39,63 до 34,60 % (на 12,7 %), тогда как содержание Si изменяется мало и достигает максимума (44,30 %) после 90 мин. Вследствие противоположной динамики Mg и Si отношение Si/Mg возрастает с 1,11 до 1,28 (рис. 3). Содержание Fe, Cr и Ni после 30 мин выдержки проходит через максимум и затем снижается, а содержание Al и Ca изменяется в узких пределах. Таким образом, при 800 °C продолжительность выдержки влияет на элементный состав сильнее, чем повышение температуры в интервале 415–586 °C.

Полученные результаты важны для последующего сернокислотного разложения,

при котором магний является целевым компонентом. Режим 800 °C обеспечивает наиболее глубокое преобразование исходной минеральной структуры, а выдержка 60 мин достаточна для практически полного удаления структурной воды; увеличение выдержки до 90 мин почти не влияет на потерю массы, но снижает содержание Mg. Для установления фазового состава продуктов обжига необходимы дополнительные рентгенофазовые исследования.

Выводы. Установлено, что температурный порог интенсивного дегидроксилирования серпентинита Султануиздагского месторождения находится между 586 и 761,56 °C: потеря массы возрастает с 0,54–0,66 % до 9,25–10,90 %. При 800 °C основная часть структурной воды удаляется за 60 мин, а плотность материала снижается на 15,8 % относительно исходной. Увеличение продолжительности выдержки при 800 °C с 30 до 90 мин снижает содержание Mg на 12,7 % и повышает отношение Si/Mg с 1,11 до 1,28. Режим 800 °C, 60 мин может быть рекомендован для термической активации серпентинита перед сернокислотным разложением.

ЛИТЕРАТУРА

- McKelvy M.J., Chizmeshya A.V.G., Diefenbacher J., Béarat H., Wolf G. Exploration of the role of heat activation in enhancing serpentine carbon sequestration reactions // *Environmental Science & Technology*. – 2004. – Vol. 38, No. 24. – P. 6897–6903.
- Maroto-Valer M.M., Fauth D.J., Kuchta M.E., Zhang Y., Andrésen J.M. Activation of magnesium rich minerals as carbonation feedstock materials for CO₂ sequestration // *Fuel Processing Technology*. – 2005. – Vol. 86, No. 14–15. – P. 1627–1645.
- Viti C. Serpentine minerals discrimination by thermal analysis // *American Mineralogist*. – 2010. – Vol. 95, No. 4. – P. 631–638.
- Długogorski B.Z., Balucan R.D. Dehydroxylation of serpentine minerals: implications for mineral carbonation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 31. – P. 353–367.
- Teir S., Revitzer H., Eloneva S., Fogelholm C.-J., Zevenhoven R. Dissolution of natural serpentine in mineral and organic acids // *International Journal of Mineral Processing*. – 2007. – Vol. 83, No. 1–2. – P. 36–46.
- Сапарова Г.Д., Джандуллаева М.С., Эркаев А.У., Кучаров Б.Х., Абдуримов А.С., Бауатдинов С. Исследование термического разложения серпентинита Каракалпакского месторождения // *Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан*. – Нукус, 2022. – № 2. – С. 74–78.
- Бекчанов Б.Б., Джандуллаева М.С., Эркаев А.У., Кошанова Б.Т. Разработка технологии получения солей магния расщеплением серпентинита серной кислотой // *Universum: технические науки*. – 2024. – № 10 (127). – DOI: 10.32743/UniTech.2024.127.10.18416.

Джандуллаева М.С., Бекчанов Б.Б., Эркаев А.У., Кучаров Б.Х. Влияние режима термической обработки на физико-химические свойства серпентинита Султануиздагского месторождения	137
Бобокулова О.С., Зулярова Н.Ш., Самадий М.А., Тожиев Р.Р., Усманов И.И., Кенжаев М.Э. Кинетические характеристики процесса разложения доломита азотной кислотой	140
5. Методы исследования, приборов и оборудования композиционных материалов	
Утемуратов Б.М., Тўраев Т.Б., Алламбергенов А.Дж. Табиий газни қувур орқали ташишда иссиқлик алмашинув жараёنларини интенсивлаштириш ва қурилмани танлаш	144
Radjabov O.I., Muinova N.B., Azimova L.B., Filatova A.V., Turaev A.S. Kollagen va inulin kompozitsiyasini molekulyar modellashirilishda strukturaviy xususiyatlar	147
Alimov A.F., Qurbanova L.M., Eshmamatova N.B., Akbarov X.I., Kuronboyev D.P., Norqobilova Sh.D., Ismoilova D.F. Po'lat korroziyasida mahalliy xom ashyolar asosida olingan yashil ingibitorlarning fizik-kimyoviy xususiyatlari	150
Orzikulov B.T., Xaydarova S.R. Poliakrilonitril asosida tarkibida sulfo guruh tutgan ion almashinuvchi materiallar sintezi	154
Алимджанова Дж.И., Бабаханова З.А. Оптимизация процесса измельчения керамической массы в шаровых мельницах	157
Axmedova M.F., Ubaydullayeva D.H. Trikotaj matolarining ko'p davrli cho'zilish deformatsiyasini aniqlashda sinov ko'rsatkichlarini optimallashtirish	160
Ergashev M.A., Qulmatov R.B. Markazdan qochma konsentratorda oltin va kumushni ajratib olishda yuvuvchi suv bosimi, pulpa qattiqligi va oziq sarfining ta'siri	162
Тажиева Г.Р., Сафаров А.Р. Спектроскопическое исследование комплексов Co(II) и Cu(II) с семикарбазидом	165
Djumayeva M.S., Amonov M.R. Modifikatsiyalangan va bo'yalgan matolarning mikroskopik tahlili	169
Abdullayeva G.A. Kobalt(II) ning 2-merkaptobenzotiazol bilan kompleks birikmasining sintezi va tadqiqoti	171
6. Проблемные обзоры	
Холмуродова Д.К., Негматова К.С., Иброхимова Д.М. Анализ состояние технологии и применения хлопкового линта и основание требование к хлопковой целлюлозы на их основе для ацетилования (Краткий обзор)	175
Каримов Ш.А., Шакиров Ш.М., Мирзарахимова З.Б. Отходы резиновых производств – перспективный материал для создания новых изделий	179
Кабулова Л.Б., Оразимбетова Г.Ж. Фазовые превращения в портландцементе при введении механоактивированного глинистого сланца	182
Razzoqov H.Q., Amonov M.R., Askarova G.A. Shofirkon bentoniti va sapropel asosidagi kompozitsion sorbentlarni shakllantirish hamda ularning koagulyant va polimer flokulyantlar ishtirokida sanoat oqova suvlarini tozalash samaradorligini tadqiq etish	185
Suyarova D.A., Erbo'tayev D.Sh., Djurayev T.A., Usmonov F.D. Indol-3-sirka kislotasi va aminokislotalar asosida sintez qilingan yangi amid hosilalarining arpa (Hordeum Vulgare L.) o'sishi va rivojlanishiga biologik ta'siri	188
Холмуродова Д.К., Негматова К.С. Изучение и анализ влияния органоминеральных ингредиентов и технологических фаторов на процесс ацетилования. <i>Краткий обзор</i>	192
Файзиев М.М., Каршиев М. Газ ва суюқликларни чуқур тозалашга мўлжалланган анизотроп структурали фильтрлар олишнинг илғор технологиялари тахлили	195
Panjiyev A.X. Kalsiy siyanamidini olish jarayonining kinetik tahlili	199
Gulova M., Bo'rixonov B., Sapayev F. Monoxlorsirka kislotasining butil efirining uchlamchi aminlar bilan kvaternizatsiya reaksiyalarini o'rganish	201
Kasimova A.B., Yoqubjonova O'F. Antibakterial materiallar asosida erkaklar uchun zamonaviy sport kostyumini ishlab chiqish (tennis sporti misolida)	205