

АРМИРОВАНИЕ ГИПСА БАЗАЛЬТОВЫМ И СТЕКЛОВОЛОКНОМ

Медведев А.Ю., Медведева А.М., Косенко Н.Ф., Филатова Н.В.

Анна Михайловна Медведева, Алексей Юрьевич Медведев, Надежда Федоровна Косенко (ORCID 0000-0001-8806-7530), Наталья Владимировна Филатова (ORCID 0000-0001-7552-3496)*

Ивановский государственный химико-технологический университет, кафедра технологии керамики и электрохимических производств, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: anna.medvedeva-iv@yandex, medvedevleha@yandex.ru, nfkosenko@gmail.com, zyanata@mail.ru*

Получены гипсовые композиционные материалы, содержащие армирующие стеклянные (ровинг ARC 2400) и базальтовые (БНВ) волокна, которые предварительно нарезали на отрезки длиной 35-40 мм. Для затворения использовали воду с добавкой поливинилацетата для замедления схватывания затворитель. Проанализированы дифрактограмма и кривые термического анализа исходного гипса. Определены механические характеристики (прочность при сжатии и изгибе) фиброкомпозиатов в зависимости от количества вводимых волокон. Установлена их оптимальная концентрация – 1 % для обоих видов волокон. Прочность при сжатии по сравнению с эталоном увеличивалась на 12-16 % у образцов со стекловолокном и на 51-75 % – с базальтовым волокном; прочности при изгибе – на 10-23 % и 7-28 % соответственно. Для оптимального содержания (1 об. %) волокон была изучена кинетика набора прочности. Отмечался существенно замедленный рост прочности композиатов по сравнению с чистым гипсом. По-видимому, элементы волокон препятствовали быстрому срастанию кристалликов новообразований в виде двуводного гипса в единый прочный конгломерат. Кроме того, замедляющий эффект мог быть также вызван присутствием поверхностно-активной добавки ПВА. Для всех видов композиатов наблюдалось типичный для гипсовых материалов временный спад прочности, связанный с растворением наименее прочных контактов срастания, который впоследствии сменялся значительным упрочнением материала. Интерес представлял тот факт, что на начальном этапе твердения прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) и изгибе ($\sigma_{изг}$) имели близкие значения и лишь по мере приближения к максимумам их величины расходились. Соотношения между пределами прочности $\sigma_{сж}/\sigma_{изг}$ для композиатов были существенно ниже, чем для чистого гипса, за счет большего положительного влияния волокон на $\sigma_{изг}$.

Ключевые слова: армированный гипс, фиброгипс, стекловолокно, базальтовое волокно, прочность при сжатии, прочность при изгибе, кинетика твердения

REINFORCEMENT OF GYPSUM WITH BASALT AND GLASS FIBER

Medvedev A. Yu., Medvedeva A.M., Kosenko N.F., Filatova N.V.

Aleksey Yu. Medvedev, Anna M. Medvedeva, Nadezhda F. Kosenko, Natalya V. Filatova*

Department of Ceramics Technology and Electrochemical Production, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetev av., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: medvedevleha@yandex.ru, anna.medvedeva-iv@yandex, nfkosenko@gmail.com, zyanata@mail.ru*

Gypsum composite materials containing reinforcing glass (roving ARC 2400) and basalt (BCF) fibers, which were preliminarily cut into segments 35-40 mm long, were obtained. For mixing, water with the addition of polyvinyl acetate was used to slow down the setting of the closure. The diffractogram and thermal analysis curves of the initial gypsum are analyzed. The mechanical characteristics (compressive and bending strength) of fiber composites depending on the number of injected fibers have been determined. Their optimal concentration has been established - 1% for both types of fibers. Compressive strength compared to the standard increased by 12-16% for samples with glass fiber and by 51-75% with basalt fiber; bending strength – by 10-23% and 7-28%, respectively. For the optimal content (1 vol %) of fibers, the kinetics of strength growth was studied. There was a signifi-

cantly slower growth in the strength of composites compared to pure gypsum. Apparently, the elements of fibers prevented the rapid intergrowth of new crystals in the form of gypsum dihydrate into an integrated strong conglomerate. In addition, the slowing effect could also be caused by the presence of a PVA surfactant. For all types of composites, a temporary strength decline which is typical of gypsum materials was observed. It was associated with the dissolution of the least strong joints of the intergrowth, which was subsequently replaced by the significant strengthening of the material. Of interest was the fact that at the initial stage of hardening, the compressive strength (σ_c) and bending strength (σ_b) had similar values and only as they approached the maxima, their values diverged. The σ_c/σ_b ratios for composites were significantly lower than for pure gypsum due to the greater positive fiber effect on σ_b .

Keywords: reinforced gypsum, fibrogypsum, glass fibre, basalt fibre, compressive strength, bending strength, hardening kinetics

ВВЕДЕНИЕ

Гипсовые вяжущие находят широкое применение в производстве различных строительных конструкций и элементов благодаря отработанной и сравнительно несложной технологии их изготовления, формования изделий, высокой скорости схватывания и твердения, невысокой плотности при достаточной прочности [1-4]. В настоящее время выпуск гипса в развитых странах достигает 20–27 % от общего объема производства минеральных вяжущих веществ, а в России – только 5 %, и это преимущественно строительный гипс [5]. В то же время новейшие технологии ориентированы на широкую линейку гипсовых вяжущих, в том числе композиционных, на основе высокопрочного гипса [6,7]. Существенным недостатком гипса является значительная хрупкость, особенно в тонкостенных изделиях типа гипсовой сухой штукатурки. Для преодоления данного недостатка в массу вводят волокна в качестве армирующего (упрочняющего) компонента или же заключают гипсовый сердечник в защитную оболочку, как, например, в гипсокартонных изделиях [8,9].

Вводимые в гипсовую матрицу волокна должны обладать достаточной прочностью, хорошо с ней сцепляться, быть инертными и иметь более высокий модуль упругости. Технологический процесс приготовления гипсовой массы должен обеспечивать сохранность волокон при перемешивании и формовании, равномерное их распределение, отсутствие комкования. При оптималь-

ных условиях изготовления матрица обеспечивает монолитность материала, передавая внешние нагрузки на волокна. В результате улучшаются физико-механические и эксплуатационные характеристики изделий [10-15].

Отечественная промышленность располагает технологиями производства плит и панелей из гипсоволокнистых масс, в состав которых входят растительные волокна (древесные, бумажные) [16-21]. Однако их использование создает проблемы с биологической коррозией и образованием плесени на поверхности изделий в процессе эксплуатации при повышенной влажности.

Установлено, что прочность гипсового материала повышается за счет добавления волокон из стекла, базальта, полимеров [22-28]. Возможно также использование волокон (фибр) в виде коротких отрезков тонкой стальной проволоки.

Однако стальные волокна интенсивно подвергаются коррозии во влажной гипсовой среде в процессе твердения. Перспективно применение стекловолокна, имеющего модуль упругости, существенно превышающий данный показатель для гипса (табл. 1).

Отмечена возможность ввода в гипс арамидных и углеродных волокон, однако они имеют высокую стоимость и вряд ли перспективны для широкого использования в строительных целях. Количество армирующих волокон определяют экспериментально.

Таблица 1.

Механические свойства некоторых волокон
Table 1. Mechanical properties of some fibers

Волокно	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Сила сцепления (прочность при разрыве), ГПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропилен	910	6	0.4	80–140
Базальт	2750	91	4	1,8
Стекло	2680	72	1.7	4,3
Древесное	589	12	7 (в параллельном направлении к волокну)	30–50

Для создания облегченных гипсовых материалов с улучшенными тепловыми характеристиками в их состав вводят дополнительно легкие заполнители, например диатомит [29], гранулы пенополистирола [7,30], вспученный перлит [31] и т.п. Такие материалы легко наносить на поверхность при выполнении ремонтных работ. Целью представленного исследования было определение прочностных показателей композиционного материала на основе гипсовой матрицы, армированной базальтовыми и стекловолокнами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использован гипс марки Г₄. Для характеристики исходного вяжущего применили термический (NETZSCH STA 449F5 Jupiter: ско-



Рис. 1. Стекловолокно ARC 2400
Fig. 1. Glass roving ARC 2400

рость нагрева 5°C/мин в атмосфере проточного воздуха (50 мл/мин) с $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в качестве стандартного вещества) и рентгенофазовый анализ (ДРОН-6 с медным анодом; $\lambda=1.54 \text{ \AA}$, 40 кВ, 100 мА). Для армирования гипсовой массы использовали щелочестойкое стекловолокно в виде ровинга ARC 2400 (рис. 1), в состав которого входит диоксид циркония ZrO_2 , придающий устойчивость волокна к щелочам.

Для сравнения применяли также базальтовое волокно марки БНВ (рис. 2) с объемной массой 30 кг/м³ (плотностью 2740 кг/м³) с диаметром элементарных фибр 5 мкм и удельной прочностью на разрыв 210 МПа (кгс/мм²).



Рис. 2. Базальтовое волокно БНВ
Fig. 2. Basalt fibre BCF

Волокно рубили на отрезки 35-40 мм. Володогипсовое отношение в гипсовом тесте поддерживали равным 0,66. В массу, содержащую 1 кг гипса, вводили 1,25; 2,5; 3,75 г волокна, что соответствовало 0,5; 1; 1,5 об. %. Волокна тщательно разделяли для равномерного их распределения по объему материала. Схватывание фиброгипсового теста начиналось через 11-12 мин, поэтому для замедления потери текучести теста в воду добавляли поливинилацетат (ПВА) в количестве 70 г;

при этом начало схватывания отодвигалось до 21-24 мин. Пределы прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) и изгибе ($\sigma_{изг}$) затвердевших образцов определяли на стандартных образцах 40x40x160 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дифрактограмма (рис. 3) показала, что исходное гипсовое вяжущее представляло собой в основном полуводный сульфат кальция.

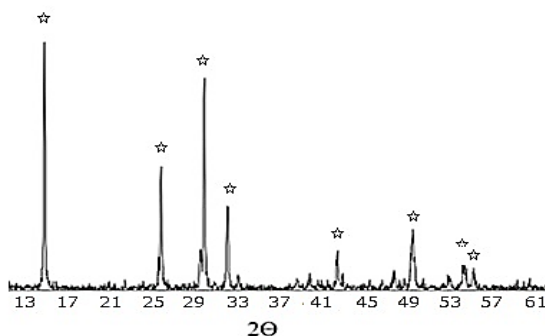


Рис. 3. Дифрактограмма исходного гипса (отмеченные пики соответствуют полугидрату сульфата кальция)
Fig. 3. Diffractogram of the original gypsum (marked peaks correspond to calcium sulfate hemihydrate)

Был выполнен комплексный термический анализ гипсового вяжущего (рис. 4). Потеря массы ~1 % соответствовала удалению физической влаги. Далее (80-170°C) наблюдался эндотермический пик, отвечавший дегидратации полугидрата до растворимого ангидрита. Экзотермический эффект (345°C), который не сопровождался измене-

нием массы вещества, можно было отнести к кристаллизации ангидрита, т.е. переходу растворимого ангидрита в нерастворимый. Небольшая потеря массы в области повышенных температур (650-690°C) соответствовала разложению присутствующих примесей.

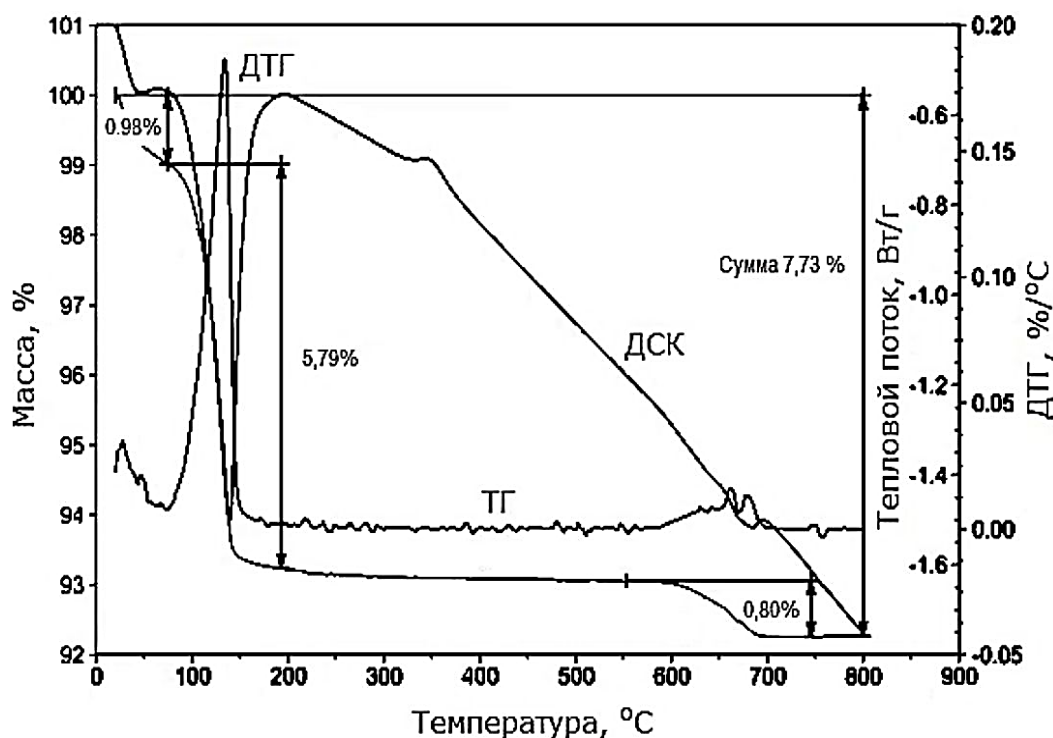


Рис. 4. Термический анализ исходного гипса
Fig. 4. TG/DSC curves of the original gypsum

Было изучено влияние содержания волокон из стекла и базальта на прочностные показатели при сжатии и изгибе затвердевших гипсовых композиций (рис. 5).

Отчетливо видно, что использование как стеклянного, так и базальтового волокна приводило к заметному улучшению механических свойств по сравнению с эталоном: прочности при сжатии на 12-16 % у образцов со стекловолокном и на 51-75 % – с базальтовым волокном; прочности при изгибе – на 10-23 % и 7-28 % соответственно.

Оптимальное содержание в обоих случаях составляло 1 об. % армирующих элементов. Улучшение показателей связано с тем, что волокна, равномерно распределенные в гипсовой матрице, в значительной степени воспринимали внешнюю нагрузку, отодвигая разрушение композита.

Как меньшее, так и большее количество волокон формировало менее прочные композиты. Для оптимального содержания (1 об. %) волокон изучена кинетика набора прочности (рис. 6).

Отмечался существенно замедленный рост прочности композитов по сравнению с чистым гипсом. По-видимому, элементы волокон препятствовали быстрому объединению кристалликов новообразований в виде двухводного гипса в единый прочный конгломерат.

Кроме того, замедляющий эффект мог быть также вызван присутствием поверхностно-активной добавки ПВА. Во всех случаях наблюдалось типичный для гипсовых материалов временный спад прочности, связанный с растворением наименее прочных контактов срастания, который впоследствии сменялся существенным упрочнением материала. Интерес представляет тот факт, что на начальном этапе твердения прочности при сжатии и изгибе имели близкие значения и лишь приближаясь к максимумам их величины расходились. Соотношения между пределами прочности $\sigma_{сж}/\sigma_{изг}$ для композитов были существенно ниже, чем для чистого гипса за счет большего положительного влияния армирующих волокон на прочность при изгибе.

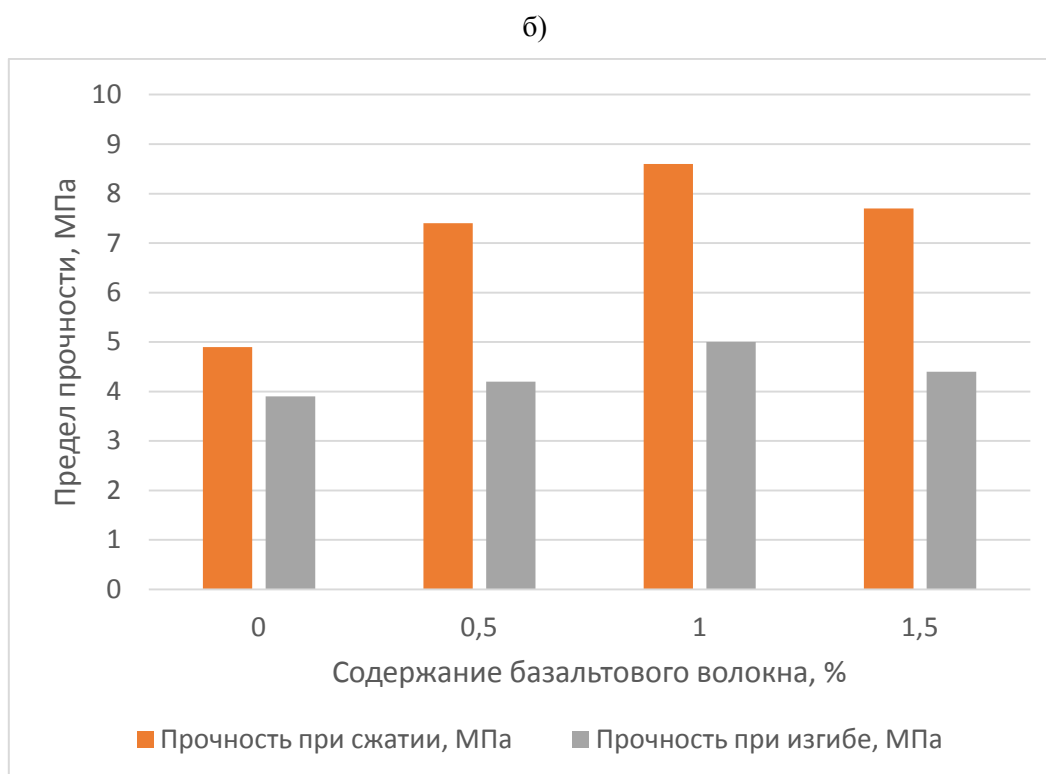
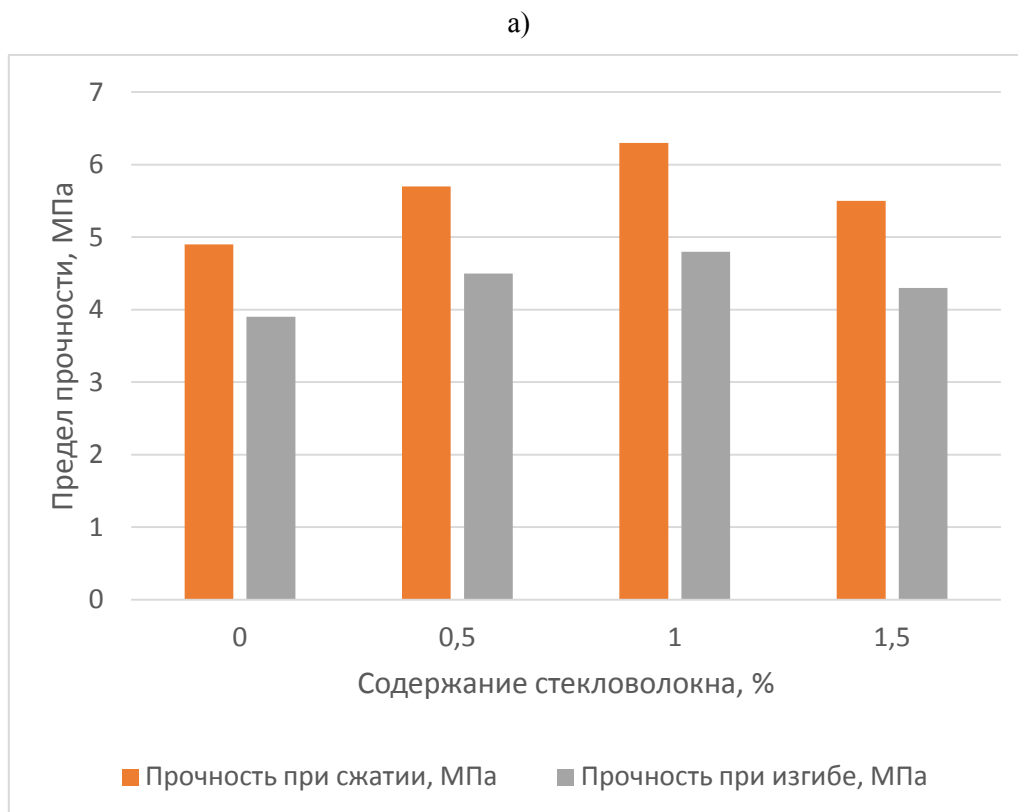


Рис. 5. Механические характеристики затвердевших гипсовых композиционных материалов с различным содержанием стеклянных (а) и базальтовых (б) волокон
Fig. 5 Mechanical characteristics of hardened gypsum composite materials with different content of glass (a) and basalt (б) fiber

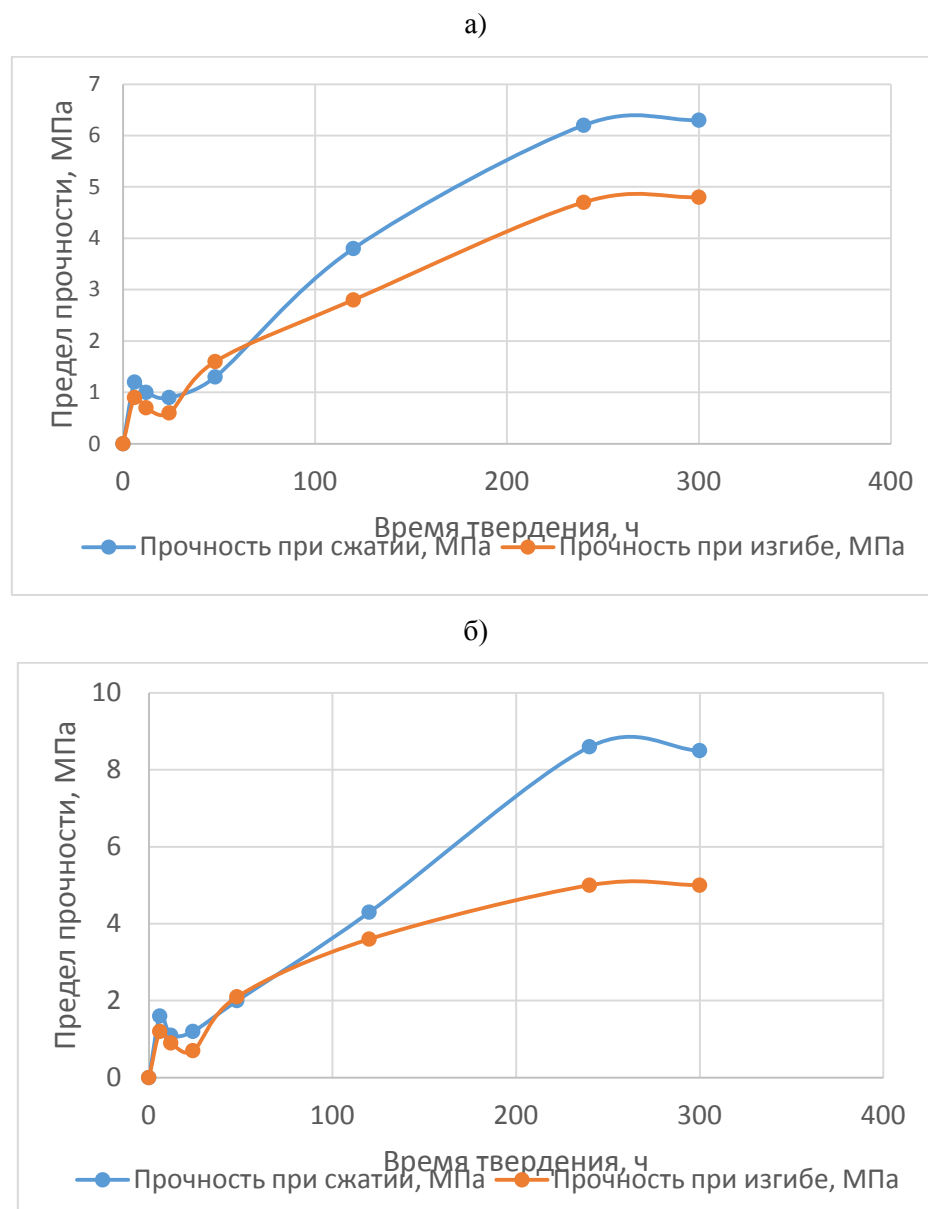


Рис. 6. Кинетика набора прочности затвердевших гипсовых композиционных материалов со стеклянными (а) и базальтовыми (б) волокнами (содержание волокон 1 %) / Fig. 6. Kinetics of the strength growth of hardened gypsum composite materials with glass (a) and basalt (б) fiber (fiber content 1 %)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что введение волокон из стекла и базальта повышает прочностные характеристики армированного затвердевшего гипсового материала. Прочность при сжатии и изгибе увеличивалась в ряду: композиционный гипсовый материал, содержащий стекловолокно (1 об. %) > композиционный гипсовый материал, содержащий базальтовое волокно (1 об. %) > эталон без волокна. Кинетические зависимости прочностных показателей характеризовались наличием минимумов на начальном этапе твердения, по-видимому, связанных с рекристаллизацией дигидрата сульфата кальция.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Revuelta M.B.** Gypsum Products. In: Construction Materials. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer, Cham. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-65207-4
2. **Wei S, Wang C, Yang Y, Wang M.** Physical and mechanical properties of gypsum-like rock materials // Adv Civ Eng. 2020. N. 1. P. 1–17. DOI: 10.1155/2020/3703706

3. **Arroyo F.N., Christoforo A.L., Salvini V.R., Pelissari P.I.G.B.**, Development of plaster foam for thermal and acoustic applications // *Constr. Build Mater.* 2020. V. 262. Art. 120800. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120800
4. **Kondratieva N., Barre M., Goutenoire F., Sanytsky M.** Study of modified gypsum binder // *Constr. Build Mater.* 2017. V. 149. P. 535–542. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140
5. **Батова М.Д., Мальцев И.В., Шаранов А.А., Гордина А.Ф.** Гипсовые композиции с дисперсными модификаторами // Матер. Межд. научно-практической конф. "Наука сегодня: задачи и пути их решения". Вологда. 2018. В 2-х частях. Ч. 1. С. 7–12.
Batova M.D., Maltsev I.V., Sharanov A.A., Gordina A.F. Gypsum compositions with dispersed modifiers // *Mater. International Sci. and Pract. Conf. "Science of this day: tasks and ways to solve them"*. Vologda. 2018. Part 1. P. 7-12.
6. **Krejsova J., Dolezelova M., Pernicova R., Svora P., Vimmrova A.** The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars // *Cem. Concr. Compos.* 2018. V. 92. P. 188–197. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.06.007
7. **De Oliveira KA, Barbosa J.C., Christoforo A.L., Molina J.C., Oliveira C.** Sound absorption of recycled gypsum matrix composites with residual cellulosic pulp and expanded polystyrene // *BioResources.* 2019. V. 14. N. 2. P. 4806–4813. DOI: 10.15376/biores.14.2.4806-4813
8. **Elkhessaimi Y., Tessier-Doyen N., Smith A.** Effects of microstructure on acoustical insulation of gypsum boards // *J. Build Eng.* 2017. V. 14. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.09.011
9. **Srinivasaraonik B., Singh L.P., Shina S., Tyagi L., Rawat A.** Studies on the mechanical properties and thermal behavior of microencapsulated eutectic mixture in gypsum composite board for thermal regulation in the buildings // *J. Build. Eng.* 2020. V. 31. Art. 101400. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101400
10. **Esan M.T.** Review of gypsum reinforced composites as building materials. Review // *Discover Civil Engineering.* 2024. V. 1. Art. 5. DOI: 10.1007/s44290-024-00005-x
11. **Boccarusso L., Durante M., Iucolano F., Mocerino D., Langella A.** Production of hemp-gypsum composites with enhanced flexural and impact resistance // *Constr. Build Mater.* 2020. V. 260. Art. 120476. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120476
12. **Dima C., Badanoiu, A., Cirstea, S., Nicoara, A.I., Stoleriu, S.** Lightweight Gypsum Materials with Potential Use for Thermal Insulations // *Materials.* 2020. V. 13. N. 23. Art. 5454. DOI: 10.3390/ma13235454
13. **Doleželová M., Scheinherrová L., Krejsová J., Keppert M., Černý R., Vimmrová A.** Investigation of Gypsum Composites with Different Lightweight Fillers // *Constr. Build. Mater.* 2021. V. 297. Art. 123791. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123791
14. **Bumanis G., Sapata A., Sinka M., Spurina E., Bajare D.** Manufacturing of Lightweight Gypsum and Expanded Polystyrene Granulate Composite // *J. Compos. Sci.* 2023. V. 7. N. 10. Art. 425. DOI: 10.3390/jcs7100425
15. **Swolfs Y., Verpoest I., Gorbatiikh L.** Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications // *Int. Mater. Rev.* 2019. V. 64. N. 4/ P. 181–215. DOI: 10.1080/09506608.2018.1467365
16. **Shiroma L., Camarini G., Beraldo A.L.** Effect of wood particle treatment on the properties of gypsum plaster pastes and composites // *Rev. Mater.* 2016. V. 21. N. 4. P. 1032–1044. DOI: 10.1590/S1517-707620160004.0095
17. **Quintana A., Alba J., del Rey R., Guillén I.** Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers // *J. Clean. Prod.* 2018. V. 185. P. 408–420. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.042
18. **Sair S., Mandili B., Taqi M., El Bouari A.** Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation // *Compos. Commun.* 2019. V. 16. P. 20–24. DOI: 10.1016/j.coco.2019.08.010
19. **Boumaaza M., Belaadi A., Bouchak M.** Systematic review on reinforcing mortars with natural fibers: challenges of environment-friendly option // *J. Nat. Fibers.* 2022. V. 19. N. 16. P. 14262–14286. DOI: 10.1080/15440478.2022.2060408
20. **Pedreño-Rojas M.A., Morales-Conde M.J., Pérez-Galvéz F., Rodríguez-Linan C.** Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste // *J. Clean. Prod.* 2017. V. 166. Art. 3. P. 690–705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.077
21. **Haba B., Benali F., Jawaid M., Leao A.L.** A Review on gypsum-based composites reinforced with palm fibers in construction applications // *Int. J. Thermophys.* 2022. V. 43. N. 11. Art. 164. DOI: 10.1007/s10765-022-03086-x
22. **Jia R., Wang Q., Feng P.** A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field // *Compos. Part B Eng.* 2021. V. 205. N. 30. Art. 108540. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108540
23. **Iucolano F., Boccarusso L., Langella A.** Hemp as eco-friendly substitute of glass fibres for gypsum reinforcement: Impact and flexural behaviour // *Compos. Part B Eng.* 2019. V. 175. Art. 107073. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107073
24. **Dharmasastha K., Samuel D.L., Nagendra S.S., Maiya M.** Experimental investigation of thermally activated glass fibre reinforced gypsum roof // *Energy Build.* 2020. V. 228. Art. 110424. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110424
25. **Gonçalves R.M., Martinho A., Oliveira J.P.** Evaluating the potential use of recycled glass fibers for the development of gypsum-based composites // *Construction and Building Materials.* 2022. V. 321. Art. 126320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126320
26. **Álvarez M., Ferrández D., Morón C., Atanes-Sánchez E.** Characterization of a New Lightened Gypsum-Based Material Reinforced with Fibers // *Materials.* 2021. V. 14. Art. 1203. DOI: 10.3390/ma14051203
27. **Ившин С.С., Ившина А.А., Федоров А.В., Зарипова Д.Н.** Утилизация стеклопластиков на основе фенолформальдегидной смолы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 104–109. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6707
28. **Naser M.Z., Hawileh R.A., Abdalla J.A.** Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: a critical review // *Eng. Struct.* 2019. V. 198. Art. 109542. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109542
29. **Gencel O., del Coz J.J., Sutcu M., Kokal F., Álvarez F.P., Martínez-Barrera G.** A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers // *Constr. Build. Mater.* 2016. V. 113. P. 732–740. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.125
30. **Bicer A., Kar F.** Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth // *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2017. N. 1. P. 59–65. DOI: 10.1016/j.tsep.2017.02.008
31. **Binici H., Aksogan O.** Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum // *Mater. Today Commun.* 2017. N. 10. P. 14–24. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2016.09.004

Поступила в редакцию (Received) 10.05.2024
Принята к опубликованию (Accepted) 10.07.2024