

**Исследование влияния методов получения полисиликатов натрия,  
силикатного модуля и концентрации связующего на адгезию  
композиционного вяжущего**

**Б.Д. Тотурбиев<sup>1</sup>, М.М. Журавлев<sup>2</sup>, А.А. Тотурбиев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Института геологии ДФИЦ РАН,

<sup>1</sup>367030, г. Махачкала, ул. М.Ярагского 75, Россия,

<sup>2</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>2</sup>367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля 70, Россия,

<sup>3</sup>Дагестанский государственный университет народного хозяйства,

<sup>3</sup>367000, г. Махачкала, ул. Д. Атаева 5, Россия

**Резюме. Цель.** Цель исследования заключается в выявлении факторов, определяющих прочность клеевых соединений в композитных материалах, содержащих полисиликаты натрия. **Метод.** Проанализировано влияние методик синтеза полисиликатов натрия на адгезионные свойства композиционных вяжущих. Рассматривались традиционные и инновационные методы, включая гидротермальные, автоклавные и золь-гель технологии. Особое внимание уделялось параметрам температуры, давления и времени реакции. Полисиликат натрия вне композиции получали взаимодействием безводного силиката натрия с раствором гидрозоля диоксида кремния при 70–90 °С и выдержкой до 0,5 часа. **Результат.** Определено влияние различных методов получения полисиликатов натрия, а также изменение силикатного модуля и концентрации связующего на адгезионные свойства материалов. Определены прочностные характеристики образцов при различных внешних воздействиях. Установлено, что прочность клеевого шва на основе полисиликатов натрия зависит от их концентрации и условий синтеза. Оптимальная концентрация полисиликатной связки составляет 0,14–0,2 г/см<sup>2</sup> для связок, полученных в композиции, и 0,2–0,28 г/см<sup>2</sup> для синтезированных вне композиции. Экспериментально установлено, что образцы, склеенные полисиликатами, синтезированными отдельно от композитной смеси, разрушаются по линии адгезива. **Вывод.** Полученные результаты можно использовать для разработки новых рецептов и методик, способствующих улучшению характеристик и долговечности строительных материалов. В последующих исследованиях планируется использовать полисиликат натрия с модулем не более 10 для оптимизации свойств и увеличения срока службы материалов при высоких температурах. Перспективным направлением является разработка жаростойких композитов с высоким силикатным модулем и уменьшенным содержанием Na<sub>2</sub>O, что способствует улучшению огнеупорности и термомеханических характеристик.

**Ключевые слова:** полисиликат натрия, адгезия, прочность, связка, жаростойких композитов, клеевое соединение, силикатный модуль

**Для цитирования:** Б.Д. Тотурбиев, М.М. Журавлев, А.А. Тотурбиев. Исследование влияния методов получения полисиликатов натрия, силикатного модуля и концентрации связующего на адгезию композиционного вяжущего. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):242-251. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-242-251.

**A Study of the Effect of Sodium Polysilicate Production Methods, Silicate Modulus,  
and Binder Concentration on Composite Binder Adhesion**

**B.D. Toturbiev<sup>1</sup>, M.M. Zhuravlev<sup>2</sup>, A.A. Toturbiev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Geology, Far Eastern Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,

<sup>1</sup> 75 M.Yaragskogo St., Makhachkala 367030, Russia,

<sup>2</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>2</sup> 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

<sup>3</sup>Daghestan State University of National Economy,

<sup>3</sup>5 D. Ataeva St., Makhachkala 367000, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to identify the factors determining the strength of adhesive joints in composite materials containing sodium polysilicates. **Method.** The influence of sodium polysilicate synthesis methods on the adhesive properties of composite binders was analyzed. Traditional and innovative methods, including hydrothermal, autoclave, and sol-gel technologies, were considered. Particular attention was paid to the parameters of temperature, pressure, and reaction time. Sodium polysilicate was obtained outside the composite by reacting anhydrous sodium silicate with a silicon dioxide hydrosol solution at 70–90 °C and holding for up to 0.5 hours. **Result.** The influence of various methods for producing sodium polysilicates, as well as changes in the silicate modulus and binder concentration on the adhesive properties of the materials, was determined. The strength characteristics of the samples under various external influences were determined. It was found that the strength of the adhesive joint based on sodium polysilicates depends on their concentration and synthesis conditions. The optimal concentration of the polysilicate binder is 0.14-0.2 g/cm<sup>2</sup> for binders obtained in the composite, and 0.2-0.28 g/cm<sup>2</sup> for those synthesized separately. Experiments have shown that samples bonded with polysilicates synthesized separately from the composite mixture fail along the adhesive line. **Conclusion.** The obtained results can be used to develop new formulations and methods for improving the performance and durability of building materials. Future research plans to use sodium polysilicate with a modulus of no more than 10 to optimize properties and extend the service life of materials at high temperatures. A promising direction is the development of heat-resistant composites with a high silicate modulus and reduced Na<sub>2</sub>O content, which contributes to improved fire resistance and thermomechanical properties.

**Keywords:** sodium polysilicate, adhesion, strength, bond, heat-resistant composites, adhesive bond, silicate modulus.

**For citation:** B.D. Toturbiev, M.M. Zhuravlev, A.A. Toturbiev. Study of the influence of sodium polysilicate production methods, silicate modulus, and binder concentration on the adhesion of composite binders. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):242-251. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-242-251.

**Введение.** Применение нанотехнологий и наноматериалов открывает перспективы для создания новых строительных материалов с улучшенными характеристиками. Это достигается благодаря возможности изменения структуры на атомарном уровне, модификации минералогического состава и разработке композитов с особыми свойствами [1-9]. В этой связи можно отметить перспективность и актуальность исследований, направленных на расширение номенклатуры наноструктурированных строительных материалов, в том числе огнеупорных из нанодисперсных высокомодульных силикатных систем (полисиликаты) с повышенными эксплуатационными свойствами. В связи с этим стоит отметить перспективность и важность исследований, направленных на расширение ассортимента наноструктурированных строительных материалов, включая огнеупорные изделия на основе нанодисперсных высокомодульных силикатных систем (полисиликатов) с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Одним из ключевых параметров силикатных систем является показатель SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O, известный как силикатный модуль (M). В современной классификации силикатных материалов этот модуль служит основой для определения их состояния. Согласно данной классификации, их можно разделить на следующие группы: высокощелочные системы (M < 2); жидкие стекла (M = 2...4); полисиликаты (M = 4...25); золи (M > 25) [10-14]. Полисиликаты, также известные как высокомодульные стекла, занимают промежуточное положение

между жидкими стеклами и кремнезольями. Их частицы имеют размер около 4-5 нанометров и классифицируются как наноматериалы. Главное отличие полисиликатов от жидких стекол и высокощелочных систем заключается в их полимерной структуре, которая составляет более 60% от общего содержания кремнезема. Это обеспечивает высокую прочность образующихся гелевых структур.

Полисиликаты обладают особыми связующими характеристиками, что позволяет их эффективно использовать в различных композициях. Применение полисиликатов в клеевых смесях повышает водостойкость материалов и улучшает термостойкость огнеупоров, что делает их незаменимыми для создания жаростойких вяжущих и бетонов [15-18].

**Постановка задачи.** Анализируя исследования по синтезу полисиликатов, можно выделить основные исходные компоненты: золи кремниевой кислоты, а также водные и безводные силикаты щелочных металлов, как указано в работах [1-18]. В наших исследованиях мы использовали безводные силикаты натрия, так как они наиболее часто применяются для получения концентрированных коллоидных щелочных растворов, кремнезоль и других силикатных систем. Это связано с их способностью не кристаллизоваться и наличием ряда других свойств, а также с их относительно низкой стоимостью.

**Методы исследования.** В рамках данного исследования были рассмотрены как традиционные, так и инновационные методы к синтезу, полисиликатов натрия. Эти методы варьируются по параметрам температуры, давления и времени реакции, что позволяет целенаправленно управлять характеристиками получаемых полисиликатов и, соответственно, адгезионными свойствами композитов. Полисиликат натрия с кремнеземистым модулем 6-6.5 ( $\text{SiO}_2\text{:Na}_2\text{O}$ ) получали путем взаимодействия безводного силиката натрия с 30%-ным водным раствором гидрозоль диоксида кремния при 70-90°C, с последующей выдержкой не более 0.5 ч [14].

Исследование проводилось с целью выявления ключевых факторов, определяющих эффективность и надежность адгезионных соединений, что имеет первостепенное значение для разработки современных строительных и промышленных материалов. Особое внимание уделялось методам получения полисиликатов натрия, поскольку они существенно влияют на физико-химические свойства конечного продукта.

Значение силикатного модуля ( $\text{SiO}_2\text{/Na}_2\text{O}$ ) также является критическим параметром, определяющим структуру и свойства полисиликатов натрия. В ходе исследования установлено, что изменение данного параметра оказывает значительное влияние на адгезию композиционных вяжущих. Оптимальное соотношение  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  способствует формированию мелкозернистой структуры, улучшающей взаимодействие между связующим и наполнителем, что, в свою очередь, повышает прочность и долговечность адгезионных соединений. Концентрация связующего является еще одним важным фактором, влияющим на адгезивные характеристики композиционных вяжущих.

Исследование показало, что увеличение концентрации связующего приводит к улучшению адгезии, однако при этом возрастает риск снижения прочностных характеристик материала. Таким образом, необходим баланс между концентрацией связующего и другими параметрами для достижения оптимальных адгезионных свойств при сохранении требуемой прочности.

**Обсуждение результатов.** В результате проведенного анализа установлено, что комплексный подход, учитывающий методы получения полисиликатов натрия, значения силикатного модуля и концентрацию связующего, позволяет значительно улучшить адгезионные свойства композиционных вяжущих материалов. Полученные данные могут быть использованы для разработки новых рецептур и технологий, направленных на повышение эффективности и надежности строительных и промышленных материалов, что имеет важное значение для развития материаловедения и строительства.

Упрочнение композиционных систем на основе жидкостного стекла - это сложный процесс, включающий множество факторов, где адгезионные и когезионные механизмы играют решающую роль. Для достижения высокой прочности таких систем необходимо

обеспечить эффективное смачивание жидким стеклом поверхности частиц заполнителя. Этот процесс способствует образованию объемной когезии, что обеспечивает монолитность и структурную целостность материала. В результате синергетического взаимодействия компонентов жидкостекольной композиции значительно улучшаются их механические характеристики, что подтверждается многочисленными исследованиями в этой области [13-21].

В ходе исследования безводных силикат-натриевых композиций (БСН), было обнаружено их свойство обеспечивать сцепление системы благодаря адгезионному взаимодействию с частицами заполнителя. Этот механизм, известный как контактное связывание, основывается на фундаментальных принципах взаимодействия двух поверхностей через тонкие клеящие слои. Исследования в области материаловедения подтверждают высокую эффективность и надежность данного механизма [13,15,17,19]. Для достижения оптимальной результативности клеящего соединения необходимо учитывать два основных параметра, их тщательный анализ и правильная оценка в обеспечении наилучших результатов. Качество клеящего соединения зависит от двух ключевых факторов: способности клея взаимодействовать с поверхностями материалов и его собственной прочности. Эти характеристики определяются адгезией клея к материалам и когезионной прочностью клеящего слоя. Эти параметры критически важны для обеспечения долговечности и надежности контакта, а также общей устойчивости конструкции при эксплуатационных нагрузках.

Долговечность клеящего соединения - это сложный показатель, который зависит от множества взаимосвязанных факторов. К ним относятся физико-химические свойства поверхностей материалов и их структурные изменения, тип взаимодействия клея с основой, скорость процесса схватывания, площадь соприкосновения, толщина клеящего слоя, а также условия окружающей среды, включая температуру и влажность, и их изменения в процессе эксплуатации. Эти факторы находятся в сложной синергетической зависимости, что требует глубокого понимания механизмов адгезии и когезии для обеспечения надежного и долговечного клеящего соединения. Особое значение имеют физико-химические свойства клеящих составов, включая их молекулярную структуру, реологические характеристики, способность к диффузии и адгезионную активность. Важно также исследовать кинетику формирования межфазных границ и механизмы химического связывания, что позволяет оптимизировать состав клеев и технологические параметры процесса для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

Всесторонний анализ этих факторов позволяет разработать научно обоснованные методы повышения прочности и долговечности клеящих соединений, что является важной задачей в области материаловедения и технологий производства композитных материалов. Современные теории адгезии, такие как адсорбционная, электрическая и диффузионная, сталкиваются с серьезными ограничениями при объяснении сложных процессов взаимодействия материалов на молекулярном уровне. Тем не менее, результаты экспериментов и эмпирические данные показывают, что для получения надежного клеящего соединения необходимо обеспечить качественное и оптимальное взаимодействие молекул адгезива с субстратом. Этот феномен универсален и не зависит от типа материалов, участвующих в процессе. Адгезивные связи представляют собой сложную систему взаимодействий, включающую разнообразные физические и химические процессы. В их основе лежат ван-дер-ваальсовы силы, водородные связи, а также комбинации ионных и ковалентных взаимодействий. Важную роль в этом контексте играют процессы хемосорбции и физической адсорбции, а также их сложные взаимодействия, обеспечивающие первоначальное связывание молекул адгезива с поверхностью субстрата. Следует также учитывать диффузионные процессы на границе раздела фаз, которые могут быть вызваны такими факторами, как тепловое воздействие, механическое давление, воздействие растворителей или их комбинации. Диффузия молекул адгезива в субстрат и молекул субстрата в адгезив способствует формированию межфазной зоны с высокой плотностью связей, что значительно увеличивает прочность и долговечность клеящего соединения.

Адгезия в вязкопластическом состоянии зависит от химической природы адгезива и характеристик поверхности, с которой он контактирует. Для достижения необходимых характеристик материала, адгезивы должны эффективно взаимодействовать с поверхностью заполнителя, что представляет собой первый этап адгезионного процесса. Этот этап определяется критическим значением поверхностного натяжения смачивания ( $\gamma_c$ ). Степень смачивания клеевой смесью контактирующих поверхностей зависит от соотношения поверхностных натяжений в трёх зонах контакта: клей-воздух ( $\gamma_{кв}$ ), твёрдая поверхность-воздух ( $\gamma_{пв}$ ) и клей-твёрдая поверхность ( $\gamma_{кп}$ ). Полное смачивание наступает, когда  $\gamma_{кв}$  превышает  $\gamma_c$ . Для регулирования смачиваемости и улучшения адгезионных характеристик в состав клеев вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ), пластификаторы, разбавители, наполнители и другие компоненты.

Адсорбция, являясь основополагающим физико-химическим процессом, оказывает значительное влияние на адгезионные свойства клеевых составов и модификацию структуры поверхностных слоев различных материалов. На этом этапе формирования клеевого соединения происходит сложное взаимодействие молекул клея с поверхностными структурами твердых тел, что приводит к возникновению адсорбционных слоев на границе раздела фаз. В результате этого процесса концентрация адсорбированных молекул в поверхностном слое увеличивается, что способствует созданию прочной когезионной связи между клеевым составом и подложкой.

Увеличение удельной поверхности адсорбента приводит к значительному усилению молекулярных взаимодействий, что, в свою очередь, повышает адсорбционную активность и улучшает межфазное взаимодействие. Это явление можно объяснить с позиций теории адсорбции. Рост удельной поверхности адсорбента увеличивает количество активных центров, что способствует более эффективному захвату молекул из газовой или жидкой среды. Увеличение удельной поверхности адсорбента играет ключевую роль в повышении эффективности адсорбционного процесса и улучшении его кинетических характеристик. В некоторых случаях адсорбционные процессы сопровождаются химическим взаимодействием между адсорбентом и адсорбатом. Это явление, известное как хемосорбция, является важным аспектом адсорбционных процессов. Хемосорбция приводит к образованию прочных химических связей между поверхностями, значительно повышая адгезионную прочность клеевого соединения. Таким образом, адсорбционные и хемосорбционные явления являются основополагающими факторами, определяющими эффективность и долговечность клеевых соединений в различных областях применения.

Прочность клеевого соединения определяется толщиной клеевого слоя, которая, в свою очередь, зависит от типа клеевого вещества и характеристик поверхности твердого тела. Повышение толщины клеевого слоя может ухудшить его прочность из-за появления структурных дефектов, таких как микропоры и микротрещины. Эти дефекты уменьшают площадь контакта между клеевым составом и поверхностью, что негативно сказывается на общей прочности соединения.

Важнейшим параметром, определяющим прочность клеевого соединения, является когезионная прочность клеевой композиции. Она обусловлена интенсивностью межмолекулярных взаимодействий, таких как водородные связи, ван-дер-ваальсовы силы и другие типы молекулярных взаимодействий, которые обеспечивают сцепление молекул клеевого вещества друг с другом. Когезионная прочность играет ключевую роль в обеспечении общей целостности и долговечности клеевого соединения, а также в определении его устойчивости к внешним воздействиям, таким как температурные колебания, механические нагрузки и химическое воздействие.

Таким образом, создание структуры в композициях, основанных на полисиликате натрия, представляет собой сложный и многогранный процесс. Ключевым этапом этого процесса является реакция мельчайших наночастиц безводного силиката натрия с кремнеземом. В результате этого взаимодействия формируются полисиликатные структуры, что приводит к улучшению адгезионных свойств. Эти свойства обеспечивают

молекулярную когезию, которая является основой для механической прочности композиционной системы. В рамках данного исследования анализируется влияние концентрации связующих веществ, изготовленных на основе полисиликатов натрия различной модульности, как и вне композиции, так и внутри композиционной матрицы, на их адгезивные свойства.

Теоретически можно предположить, что полисиликатные связки, синтезированные в композиционной среде, будут обладать более высокими клеящими свойствами по сравнению с аналогичными материалами, синтезированными вне её. Это предположение основано на научной концепции, изложенной, которая описывает синергетические эффекты, возникающие при синтезе наночастиц в условиях композиционной матрицы. В лабораторных условиях были разработаны материалы, основу которых составили тонкомолотый огнеупорный шамот и полисиликаты натрия с различной модульностью: 6, 8, 10 и 15. Полисиликаты натрия были получены методом гидролиза безводного силиката натрия. В процессе реакции он взаимодействовал с 30%-ным водным раствором гидрозоля диоксида кремния при температуре от 70 до 100°C. Выдержка смеси не превышала 0,5 часа, что обеспечило оптимальные условия для формирования полисиликатных структур.

В ходе эксперимента были разработаны композиционные смеси с использованием высокоскоростного смешивания в миксере. Основные компоненты включали тонкоизмельченный огнеупорный шамот, безводный силикат натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) и кремнезоль (золь кремниевой кислоты). Эти ингредиенты были выбраны на основе рецептуры, которая обеспечивала синтез полисиликатов натрия напрямую в композиционной среде без дополнительных этапов обработки. Для определения необходимого количества кремнезоля с концентрацией 70:30 и плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup> использовались данные из табл. 1.

**Таблица 1. Расчетные данные расхода кремнезоля (концентрации – 70:30) для получения полисиликатов натрия разного модуля из безводного силиката натрия, M=2,9.**

**Table 1. Calculated data on silica sol consumption (concentration – 70:30) for obtaining sodium polysilicates of different modulus from anhydrous sodium silicate, M=2.9.**

Компоненты поли- силиката натрия / Sodium polysilicate components	Ед. изм. / Unit	Силикатный модуль / Silicate modulus					
		2.9	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0
БСН	г	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Кремнезоль	г	-	2394.8	3592.2	4789.6	5987.0	8980.0

Экспериментальная цель заключалась в получении полисиликатов натрия с различными модульными композициями, начиная с безводного силиката натрия с модулем (M), равным 2,9. Модульная композиция полисиликатов натрия определяется как отношение кремнезема к оксиду натрия и является ключевым параметром для контроля физико-химических свойств синтезируемых материалов. Применение высокоскоростного перемешивания и тщательно подобранных компонентов позволило успешно синтезировать полисиликаты натрия непосредственно в композиционной среде. Это открывает новые перспективы для оптимизации технологических процессов в области материаловедения и высокотемпературной керамики.

В ходе исследования проанализированы связки, изготовленные из полисиликатов натрия. Эти материалы могли быть получены как самостоятельно, так и в составе композиционных смесей. Для проведения работы использовались молотый безводный силикат натрия и кремнезоль. Для оценки прочности адгезионного соединения огнеупорных связок был проведен сравнительный анализ показателей изгиба (Ризг) образцов-балочек размером 11x6,5x5,4. Образцы, изготовленные из огнеупорного кирпича, были скреплены с помощью исследуемых связующих материалов. Перед нанесением клеящей смеси торцевые поверхности образцов подвергались тщательной обработке методом сухого трения. Это выполнено для увеличения площади контакта между материалами и минимизации дефектов поверхности.

В процессе исследования было создано композиционное связующее на основе полисиликатов натрия и тонкодисперсного шамота. Это вещество эффективно заполняет поры на границе контакта между образцами, формируя прочные клеевые соединения даже в ограниченных пространствах. Концентрация связующего в клеевом шве изменялась от неполного заполнения до формирования толстого слоя, что позволило изучить, как этот параметр влияет на механические характеристики соединения.

После нанесения клеевого состава, образцы-балочки устанавливались вертикально в условия, обеспечивающие их естественную сушку. Процесс сушки проводился в строгом соответствии с заданным температурным режимом: начальная стадия включала постепенный подъем температуры до 90 °С и последующую выдержку в течение 3 часов. Для обеспечения полной гидратации и растворения мельчайших частиц безводного силиката натрия в жидком кремнезоле был выбран определенный температурный интервал. Это способствовало формированию полисиликатного соединения в шве между склеенными образцами. Затем, чтобы достичь максимальной прочности и долговечности клеевого шва, температуру повысили до 200 °С. Этот этап термообработки инициировал процессы дальнейшего структурирования и упрочнения соединения. В результате улучшились его физико-механические характеристики, такие как устойчивость к термическим и механическим воздействиям, характерным для эксплуатации в условиях высоких температур и агрессивных сред. После завершения формирования клеевого соединения образцы охлаждались в печи до комнатной температуры. Затем проводились испытания на изгиб, результаты которых были зафиксированы в табл. 2 и 3.

Полученные данные демонстрируют высокую прочность клеевых соединений, что подтверждает эффективность разработанной методики и перспективность использования полисиликатов натрия в качестве связующего вещества для формирования прочных и надежных клеевых швов в условиях стесненного пространства.

**Таблица 2. Механическая прочность на изгиб (R из, МПа) склеенных образцов с полисиликатной связкой, изготовленных вне композиции**  
**Table 2. Mechanical bending strength (R, MPa) of glued samples with a polysilicate binder, made outside the composition.**

Концентрация связки, г/см <sup>2</sup> / Binder concentration, g/cm <sup>2</sup>	Мольное отношение (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O) / Mole ratio (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)				
	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0,057	1,6	1,3	1,1	1,0	0,28
0,14	2,5	2,3	2,1	2,0	0,43
0,2	2,8	2,65	2,5	2,4	0,55
0,28	3,0	2,8	2,7	2,5	0,6
0,43	2,0	1,9	1,8	1,7	0,37

**Таблица 3. Прочность на изгиб (Rиз, МПа) образцов, изготовленных с использованием связки на основе полисиликатов натрия в составе композиции /**  
**Table 3. Bending strength (Ris, MPa) of samples manufactured using a binder based on sodium polysilicates in the composition**

Концентрация связки, г/см <sup>2</sup> / Binder concentration, g/cm <sup>2</sup>	Мольное отношение (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O) / Mole ratio (SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)				
	4,0	6,0	8,0	10,0	15,0
0,057	2,4	2,0	1,8	1,9	0,4
0,14	3,2	3,0	2,8	2,85	0,6
0,2	3,4	3,2	3,0	2,9	0,55
0,28	3,2	3,0	2,9	2,7	0,5
0,43	2,5	2,3	2,1	2,0	0,45

Анализ данных, представленных в табл.2 и 3, выявил ключевые параметры, влияющие на формирование равнопрочных клеевых соединений при использовании полисиликатов натрия в составе композиционных материалов. Прочность (Rиз, МПа) образцов, подвергшихся процессу склеивания с использованием связки на основе полисиликатов натрия, полученных в рамках композиционного синтеза, представляет собой ключевой параметр,

подлежащий тщательному анализу. Данный аспект исследования имеет фундаментальное значение для понимания физико-химических характеристик и эксплуатационных свойств получаемых материалов.

**Вывод.** В рамках данной работы было проведено комплексное изучение прочностных характеристик образцов, подвергшихся процессу склеивания, сфокусированное на оценке их способности выдерживать механические нагрузки в условиях различных внешних воздействий. Исследование выявило значительное влияние состава и структуры связующего компонента на прочностные характеристики композиционных материалов. Это открытие создает новые возможности для улучшения технологических процессов и повышения качества готовой продукции.

Установлено, что оптимальная концентрация полисиликатной связки для достижения высокой прочности клеевого шва и монолитной контактной зоны составляет 0,14–0,2 г/см<sup>2</sup> при получении полисиликатов непосредственно в композиции. В случае использования полисиликатов, синтезированных вне композиции, рекомендуемая концентрация возрастает до 0,2–0,28 г/см<sup>2</sup>, что свидетельствует о значительном влиянии условий синтеза на физико-механические свойства клеевого соединения.

Различия в концентрациях полисиликатной связки подчёркивают важность комплексного подхода к исследованию факторов, влияющих на прочность клеевого соединения. Помимо относительного содержания полисиликатной композиции, такие параметры, как плотность клеевого соединения и адсорбционные свойства, оказывают существенное влияние на прочность шва и зоны склеивания. Адгезионная способность, в свою очередь, напрямую зависит от специфических условий синтеза полисиликатов натрия, а также от метода их интеграции в композиционный материал.

Экспериментальные данные показывают, что образцы, склеенные с применением полисиликатов, синтезированных отдельно от композиционной основы, подвержены разрушению в зоне адгезива. Это свидетельствует о недостаточной адгезионной прочности при использовании полисиликатов, не интегрированных на этапе синтеза в композиционную структуру. Таким образом, подчёркивается важность строгого контроля параметров синтеза и добавления полисиликатов для достижения максимальной адгезионной прочности и долговечности клеевых соединений.

Результаты исследования показывают, что силикатный модуль оказывает значительное влияние на адгезивные свойства связки, изготовленной с использованием полисиликатов натрия. Если значение силикатного модуля превышает 10, прочность связки резко снижается, независимо от концентрации полисиликатов, методов их получения и условий эксплуатации. Этот эффект проявляется как в простых системах, так и в сложных композициях, состоящих из нескольких компонентов.

Разработка жаростойких композиционных вяжущих и бетонов на основе полисиликатов натрия с высоким модулем силикатной структуры и сниженным содержанием легкоплавкого компонента Na<sub>2</sub>O является перспективным направлением научных исследований. Эти материалы обладают улучшенными огнеупорными и термомеханическими характеристиками, что делает их важными для применения в условиях высоких температур. Для дальнейших исследований по созданию полисиликатнатриевых композиционных вяжущих рекомендуется использовать полисиликат натрия с модулем силикатной структуры не более 10. Такой подход позволит оптимизировать физико-химические свойства вяжущих материалов, повысить их эксплуатационные характеристики при тепловом воздействии и обеспечить высокую надежность и долговечность композиционных систем.

Применение полисиликатов натрия с контролируемым модулем силикатной структуры является результатом тщательного анализа и оптимизации их структуры. Это позволяет целенаправленно регулировать термическую устойчивость и механические свойства композитов, что является ключевым фактором их практического применения. Интеграция современных научных достижений в области материаловедения значительно расширяет возможности создания высокоэффективных жаростойких материалов, что имеет важное

значение для развития различных отраслей промышленности, включая металлургию, энергетику и строительство.

#### **Библиографический список:**

1. Nanotechnology in Construction / Edited by Y. de Miguel, A. Porro and P.J.M. Bartos. — 2006. — 416 p. - Режимдоступажурн.:<http://www.rilem.net/proContents.php?pro=pro045>.
2. Nanotechnology in Construction 3 / [ZdenekBittnar, Peter J.M. Bartos, JfriN"eme"cek, VitSmilauer, Jan Zeman (Eds.)] // Proceedings of the NICOM3 ABC: Springer, 31 may- 2 june, 2009. — 432 p.
3. Войтович В.А. Нанонаука, нанотехнологии, строительные наноматериалы / Войтович В.А. Режимдоступажурн. :<http://interlibrary.narod.ru/GenCat/GenCat.Scient.Dep/GenCatArch>). Нанотехнологии. Азбука для всех / ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: Физмат- лит,2008.– 368 с.
4. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34
5. Chong, K.P., 'Nanotechnology in Civil Engineering -Research and Challenge', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society ofChemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 13-22.
6. Masens, C., 'The Nanohouse - an Australian initiative todevelop the home of the future', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et aL Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 331-342.
7. Makar, J, 'Implication of nanotechnology for the construction industry', Internal report, IRC, National Research Council Canada, January 2002.
8. Institute for Research in Construction, 'New IRC research project applies nanotechnology to construction materials', Construction Innovation 7 (4) (2002).
9. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 1 (93). С. 27-34
10. Корнеев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. - Санкт-Петербург; СПб.: Стройиздат, 1996, С. 216
11. Айлер Р. Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: Пер. с англ.- М.: Мир, 1982. Ч 1. С. 416.
12. Брыков А.С. Силикатные растворы и их применение // Учебное пособие. - Санкт-Петербург; СПбГТИ (ТУ). 2009. С. 54.
13. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М.: «Академкнига». 2004. С. 208.
14. Пестерников Г.Н., Максютин А.С., Пучков С.П., Обухова В.Б. Способ получения полисиликатов натрия (варианты) // Патент России №2124475. 1999. Бюл. № 1.
15. Тотурбиев А.Б. Жаростойкое композиционное вяжущее на полисиликатах натрия // Бетон и железобетон. № 3. 2012. С.5-8.
16. Тотурбиев А.Б., Строкова В.В., Мусаджиев Н.Б. Высокоогнеупорный жаростойкий бетон на нанодисперсном связующем. // Промышленное и гражданское строительство. № 1 2014. С.75-77
17. Тотурбив Б.Д. Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М.: Стройиздат. 1988. С. 208.
18. Тотурбиев Б.Д., А.Б. Тотурбиев. Теоретические и экспериментальные основы получения жаростойких бетонов из нанодисперсного полисиликата натрия // Бетон и железобетон. - № 1. 2014. С. 2-6.
19. Рыжков И.В., Толстой В.С..Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом. -Изд.Харьковского университета. 1975.-136 с.
20. Тотурбиев А. Б., Тотурбиев Б. Дж. Исследования физико-хифизико-химических свойств жаростойкого полисиликатного натриевого композиционного вяжущего // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 4. С. 11- 18.
21. Тотурбиев Б. Дж. Физико-химические исследования композиционного вяжущего на основе боксита и полисиликата натрия // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 4. С. 19-25.

#### **References:**

1. Nanotechnology in Construction / Edited by Y. de Miguel, A. Porro and P.J.M. Bartos. 2006; 416 p. - Journal Access Mode: <http://www.rilem.net/proContents.php?pro=pro045>.
2. Nanotechnology in Construction 3 / [ZdenekBittnar, Peter J.M. Bartos, JfriN"eme"cek, VitSmilauer, Jan Zeman (Eds.)] // Proceedings of the NICOM3 ABC: Springer, 31 May - 2 June, 2009;432 p.
3. Voytovich V.A. Nanoscience, Nanotechnology, Construction Nanomaterials / Voytovich V.A. Journal Access Mode. :<http://interlibrary.narod.ru/GenCat/GenCat.Scient.Dep/GenCatArch>). Nanotechnology. ABC for everyone / ed. Yu.D. Tretyakova. - Moscow: Fizmatlit, 2008; 368 p.
4. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;1(93):27-34

5. Chong, K.P., 'Nanotechnology in Civil Engineering - Research and Challenge', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 13-22.
6. Masens, C., 'The Nanohouse - an Australian initiative to develop the home of the future', in 'Nanotechnology in Construction', P.J.M. Bartos et al. Eds. (Royal Society of Chemistry, 2004 - ISBN 0-85404-632-2) 331-342.
7. Makar, J, 'Implication of nanotechnology for the construction industry', Internal report, IRC, National Research Council Canada, January 2002.
8. Institute for Research in Construction, 'New IRC research project applies nanotechnology to construction materials', Construction Innovation 2002 7(4).
9. Lam T.Q.K., Do T.M.D., Ngo V.T., Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; (93):27-34
10. Korneev V.I., Danilov V.V. Soluble and liquid glass. - St. Petersburg; SPb.: Stroyizdat, 1996;216
11. Eiler R. Silica chemistry: solubility, polymerization, colloidal and surface properties, biochemistry: Trans. from English. - Moscow: Mir, 1982; 1: 416.
12. Brykov A.S. Silicate solutions and their application. *Study guide*. - St. Petersburg; SPbGTI (TU). 2009;54.
13. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Fundamentals of sol-gel technology of nanodispersed silica. M.: "Akademkniga". 2004;208.
14. Pesternikov G.N., Maksyutin A.S., Puchkov S.P., Obukhova V.B. Method for producing sodium polysilicates (variants). Russian Patent No. 2124475. 1999. Bull. No. 1.
15. Toturbiev A.B. Heat-resistant composite binder based on sodium polysilicates. *Concrete and reinforced concrete*. 2012;3:5-8.
16. Toturbiev A.B., Strokova V.V., Musadzhev N.B. Highly Refractory Heat-Resistant Concrete with a Nano-Dispersed Binder. *Industrial and Civil Engineering*. 2014;1:75-77
17. Toturbiev, B.D. Construction Materials Based on Sodium Silicate Compositions. Moscow: Stroyizdat. 1988; 208.
18. Toturbiev, B.D., A.B. Toturbiev. Theoretical and Experimental Principles of Obtaining Heat-Resistant Concretes from Nano-Dispersed Sodium Polysilicate. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2014;1: 2-6.
19. Ryzhkov, I.V., Tolstoy, V.S. Physicochemical Principles of Forming the Properties of Mixtures with Liquid Glass. Kharkiv University Press. 1975;36 p.
20. Toturbiev A. B., Toturbiev B. Dzh. Studies of the physicochemical and chemical properties of a heat-resistant sodium polysilicate composite binder. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2024; 18(4):11-18.
21. Toturbiev B. Dzh. Physicochemical studies of a composite binder based on bauxite and sodium polysilicate *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*. 2024;18(4):19-25.

#### **Сведения об авторах:**

Тотурбиев Батырбий Джакаевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, главный научный сотрудник Института Геологии ДФИЦ РАН; totbat@mail.ru.

Журавлев Михаил Михайлович, аспирант кафедры технологии и организации строительного производства; mmrd555@mail.ru

Тотурбиев Абдулазиз Адильбиевич, аспирант кафедры экономики и управления; totbat@mail.ru

#### **Information about authors:**

Batyrbiy Dzh. Toturbiev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Technology and Organization of Construction Production, Chief Researcher of the Institute of Geology of the Far Eastern Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; totbat@mail.ru.

Mikhail M. Zhuravlev, Postgraduate student, Department of Technology and Organization of Construction Production; mmrd555@mail.ru

Abdulaziz A. Toturbiev, Postgraduate student, Department of Economics and Management; totbat@mail.ru

#### **Конфликт интересов/Conflict of interest.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.**

**Поступила в редакцию/Received 10.08.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 20.10.2025.**

**Принята в печать/Accepted for publication 24.12. 2025.**