

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 6. С. 146–159.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (6): 146–159.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 553.2 +691.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159

EDN: PQEUNZ

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧАСТИЕМ НАНОАРМИРУЮЩЕГО И МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ВОЛЛАСТОНИТА

**Анатолий Васильевич Мананков, Ирина Анатольевна Рахманова,
Валерий Михайлович Владимиров**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Развитие цивилизации требует постоянного поиска решений для создания новых функциональных материалов, способных удовлетворить возрастающие потребности общества. В настоящей работе представлены подходы к снижению энергозатратности, металлоемкости и повышению качества функциональных материалов посредством использования современных композиционных материалов, включающих модифицирующие и наноармированные добавки на основе волластонита. Уникальные свойства волластонита обусловлены его тонкой игольчатой структурой, высоким уровнем белизны и особым химическим составом, что делает этот материал перспективным для применения в различных отраслях промышленности.

Для успешного участия в процессе модернизации машиностроительных и строительных отраслей предлагается использовать научные достижения томских университетов в сфере экспериментальной и технической минералогии, а также материаловедения.

Результаты. Разработан метод синтеза синтетического волластонита с заданными характеристиками. Многочисленные эксперименты подтвердили превосходство волластонита над традиционными материалами, используемыми в таких областях, как производство красок, бумаги, для создания стоматологических и хирургических материалов, керамики, глазурей, ангобов и т. д.

Ключевые слова: игольчатые модификации волластонита, трансволластонит, функциональные композиционные материалы, периодическо-ритмическая цикличность, экономика, материаловедение, экспериментальная и техническая минералогия

Для цитирования: Мананков А.В., Рахманова И.А., Владимиров В.М. Возможности применения композиционных материалов с участием наноармирующего и модифицирующего волластонита // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 146–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159. EDN: PQEUNZ

ORIGINAL ARTICLE

PROSPECTS OF COMPOSITE MATERIALS WITH NANOREINFORCING AND MODIFYING WOLLASTONITE**Anatoly V. Manankov, Irina A. Rakhmanova, Valery M. Vladimirov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. A completion of the industrial stage in many industries began late in the 20th century. Measures to reduce the energy and metal consumption and improve the quality of functional materials by attracting new functional composite materials with the addition of modifying and nanoreinforcing filler wollastonite are discussed herein. The main directions of wollastonite use are determined rather by acicular crystals and their color (up to finely white) and chemical composition. In order for the country to participate in the inevitable modernization of mechanical engineering, construction industry and entire economy, it is proposed to study the experience of foreign countries, primarily such as Japan, and begin to implement scientific results obtained in Tomsk universities in the field of experimental and technical mineralogy and materials science.

Research findings: A large deposit of natural wollastonite is discovered in the host metasomatic formations of a gold ore deposit in the Altai Mountains. Methods for obtaining synthetic acicular wollastonite are created. Numerous studies show advantages of wollastonite and its merits in comparison with other traditional materials used in many composite materials, ranging from paints, paper, dental, surgical materials, ceramics, glazes and others.

Keywords: acicular wollastonite, transwollastonite, composite material, periodic-rhythmic cycle, economics, materials science, experimental and technical mineralogy

For citation: Manankov A.V., Rakhmanova I.A., Vladimirov V.M. Prospects of Composite Materials with Nanoreinforcing and Modifying Wollastonite. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 146–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-146-159. EDN: PQEUNZ

Введение

Периодическо-ритмическая цикличность экономического развития основана на привлечении научных достижений, включая прорывные достижения фундаментальных и прикладных исследований в области материаловедения и технической минералогии, обеспечивающих качественное совершенствование, даже рывок технологического уровня. Исторически временные интервалы этих циклов постепенно сокращаются: от эпох и веков (палеолит, неолит, каменный век, бронзовый и железный века) до более коротких промежутков времени в XX в. В этот период потребление природных ресурсов, объемы промышленных отходов и численность населения планеты росли экспоненциально. Параллельно с этим в промышленное производство вовлекалось всё больше видов полезных ископаемых. Если в начале XX в. использовалось 52 химических элемента из 84 известных тогда, то к 1917 г. их число увеличилось до 64 из 85, к 1937 г. – до 73 из 89, к 1975 г. – до 87 из 104, а в 1990-х гг. все 104 элемента получили производственное применение. Этот экспоненциальный экономический рост выявил дефицит природных ресурсов и обострил проблемы материаловедения, затронув практически все отрасли промышленности.

Внедрение автоматизированных и высокоскоростных производственных линий потребовало значительного изменения традиционных рецептур, ускоре-

ния физико-химических процессов и адаптации к новым технологиям. Так, введение 20 % волластонита в традиционную рецептуру керамических плиток на отечественных конвейерных линиях позволило существенно улучшить свойства продукции по деформируемости, усадке (в два раза), в 1,5 раза уменьшить водопоглощение, значительно увеличить термостойкость, в 2,5 раза повысить прочность на изгиб, в 2 раза увеличить морозостойкость и прочность сцепления с глазурью и снизить температуру обжига. Аналогичные тенденции наблюдаются и при использовании других материалов.

Важно отметить роль игольчатой формы минерала для асбоцементной и строительной промышленности. Цемент с добавкой волластонита, в отличие от цемента с инертными материалами (диатомит, опок, трепел), является безусадочным, воздухо- и атмосферо-морозостойким, нормально твердеющим при гидротермальной обработке. Волластонит не генерирует коллоидных гидросиликатов. Цементно-волластонитовые вяжущие используются для изготовления коррозионностойких и экономически эффективных бетонов с высокими механическими свойствами [2].

Применение волластонитового порошка в процессе производства бумаги может значительно повысить экономическую эффективность. Замена одной тонны традиционного древесного сырья на ультрадисперсный порошок волластонита позволяет сократить потребление древесины до 3,6 м³ и уменьшить производственные расходы на более чем 4000 руб. по сравнению с использованием обычной целлюлозы.

Волластонит с игольчатым габитусом в лакокрасочной промышленности действует как выравнивающий агент в покрытиях, улучшает механическую прочность пленки покрытия, укрывистость покрытия и заменяет вредный асбест в армированных покрытиях. Волластонит с обработанной поверхностью может использоваться в промышленных алкидных, эпоксидных и других антикоррозионных покрытиях для повышения коррозионной стойкости металлических грунтовок и частичной замены активных антикоррозионных пигментов. Это позволяет рассматривать возможность применения волластонита в качестве альтернативы импортным материалам, например, для разметки пешеходных переходов на асфальтовых покрытиях [1].

Синтез волластонита игольчатой формы

Волластонит как промышленный минерал по достоинству впервые был оценен в США в 40-х гг. XX в. В качестве продукта расплавной технологии по своим физическим свойствам он весьма близок природному.

Кристаллохимические свойства. Игольчатый низкотемпературный полиморф β-волластонит, как и природный, имеет триклинную структуру из бесконечных силикатных цепочек. В состав его элементарной ячейки входят три тетраэдра, вытянутых вдоль оси *у*, как это было впервые установлено академиком Н.В. Беловым [5]. Катионы Ca²⁺ и его изоморфные примеси Fe²⁺, Na⁺, Mg²⁺, Al³⁺, Fe³⁺ располагаются в искаженных октаэдрах, находясь в одной плоскости с четырьмя ближайшими атомами кислорода. Поэтому синтетический β-волластонит формирует игольчатые, пластинчатые агрегаты со значительным удлинением.

На основе одного и того же исходного состава, но при разных кинетических параметрах или технологических условиях могут быть получены разные полиморфные модификации волластонита при определенных значениях вязкости расплавленной и переохлажденной системы, что в целом хорошо согласуется с диаграммами состояния систем $\text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$. По данным изучения **высокотемпературной вязкости** охлаждающегося расплава, от состояния гомогенности в интервале 1400–1250 °С происходит в целом медленное, но заметно ускоряющееся нарастание вязкости. Переходная область – интервал 1250–1200 °С, а затем происходит быстрое увеличение вязкости от 10 до 50–80 П.

В рамках **полимерной модели строения расплава** энергия активации вязкого течения $E\eta$ должна определяться в основном тремя составляющими: 1) энергией разрыва мостиковых связей Si–O в анионных комплексах; 2) энергией разрыва связей немостиковых атомов кислорода с катионами-модификаторами; 3) энергией разрыва связей свободных атомов кислорода с катионами-модификаторами. В действительности процесс гораздо сложнее. Так, влияние химического состава на вязкость расплава может полностью компенсироваться влиянием активности кислорода. Поэтому по абсолютным значениям вязкость у разных составов различна при одинаковой температуре. То есть системы различаются между собой сложностью структурных единиц вязкого течения и их размерами. Менее сложные и более короткие комплексы более подвижны, что обуславливает уменьшение динамической вязкости при неизменной температуре.

К настоящему времени за счет постоянного расширения сфер использования общий годовой объем производства достигает 300 тыс. т, более одной трети составляет синтетический волластонит. Последний представлен рядом модификаций, однако на рынке преобладает игольчатый β -волластонит, обладающий рядом преимуществ перед природным минералом. Главные из них – игольчатая форма кристаллов, высокая степень чистоты, отсутствие включений других фаз, однородность химического состава, реально достижимая низкая стоимость. Результаты исследований подтверждены авторскими свидетельствами и патентами на изобретения (А. с. № 1011514; 1176564; 1331827; 1552560; 1625837; 1705250; 1705741; патенты № 2108069; 2109493; 2181105). На мировом рынке тонкодисперсный волластонит представлен восемью сортами. Значительная часть производимого тонкодисперсного волластонита экспортируется в страны Западной Европы и Японию. Он широко используется в США, Китае и других странах как конструктивный минерал в производстве специальной радиокерамики, фаянса, фарфора, изоляторов с низкими диэлектрическими потерями, санитарных изделий, облицовочных кирпичей, специальных цементов для керамики, абразивов, стекла, шин, кабельных резин, бумаги и разнообразных композитов [3, 5–9].

С 1970-х гг. в Томском государственном университете под руководством профессора И.К. Баженова была инициирована программа «Комплексное использование природных ресурсов». В ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях было доказано, что минерал из группы метасиликатов кальция $\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, обладающий триклинной сингонией, способен существенно улучшать свойства различных композитных материалов. В отличие от других метасиликатов, процесс синтеза этого минерала требует особого контроля, по-

скольку необходимо обеспечить доминирование стабильной β -модификации (β -волластонита), исключив при этом образование метастабильных фаз.

Изучение продуктов экспериментов по кинетике фазовых превращений при кристаллизации волластонита и их анализ позволили обнаружить доминирующую роль низкоэнергетических взаимодействий при фазовых переходах и установить, что именно они в неравновесных условиях во многом управляют эволюцией системы. Причиной низкоэнергетических взаимодействий являются градиентные поля, возникающие под действием механических, термомеханических, электрических и магнитных напряжений, сил поверхностного натяжения, нуклеаторов и т. п. Несмотря на различную природу градиентных полей, механизмы кристаллизации волластонита имеют достаточно общий характер. Они заключаются в том, что кристаллизация силикатных расплавов и растворов в нестационарных и стационарных условиях определяется в значительной мере не транспортными процессами, а механизмом поляризационной трансляции молекул и молекулярных агрегатов континуума внешними и самоиндуцированными силовыми полями. Ориентация поляризованных молекул и их агрегатов предшествует образованию кристаллической решетки в тех ситуациях, когда она соответствует их ориентации в решетке [10]. При достижении этих условий понижаются энергии, необходимые для активации фазового перехода, на 2 порядка ускоряется сам процесс.

Была предложена концепция кватаронной модели зародышеобразования и роста кристаллов, основанная на кластерной самоорганизации вещества на наноуровне. Кватароны представляют собой наноструктуры, которые благодаря своей динамической структуре могут включаться в кристаллическую решётку практически без кинетических препятствий и деформаций самой решётки [11].

На основе эффекта поляризационной трансляции фазовых переходов мы получаем более целостное, концептуально ясное описание физико-химических процессов на наноуровне, необходимое для широкого практического использования в генетической, экспериментальной минералогии и материаловедении. Эти результаты самым серьезным образом необходимо развивать в новой науке наноминералогии и в материаловедении.

На этапе измельчения материала вместо обычных традиционных авторы применили специфический дезинтегратор Хинта, заказав его изготовление автору оригинальной конструкции в г. Таллине. Принцип работы данного устройства основан на раскалывании кристаллов, в отличие от обычного размола, применяемого в стандартных методах.

Триклинный полиморф волластонита природного и синтетического генезиса используется как экологически чистый наполнитель, заменяет асбест, диоксид титана, каолин, мел, тальк и др. Благодаря своим nanoармированным свойствам, даже небольшие добавки волластонита способны увеличить прочность различных материалов на два порядка, снизить продолжительность технологического процесса и температуру термической обработки, повысить жаростойкость, химическую стойкость и износостойкость продукции, а также улучшить её электроизоляционные и диэлектрические характеристики.

Примеры наиболее масштабных достижений включают производство автомобильных и турбовентиляторных двигателей в Японии и США, термоза-

щитных покрытий для ракетно-космической техники (США, СССР), строительных материалов (Германия, Италия), высококачественной бумаги, в число которой входят офсетные сорта, чековая бумага, водяные знаки, огнестойкий картон (Финляндия) и многое другое.

Проблемы отраслей машиностроения и способы их преодоления

В начале нового технологического цикла возникла необходимость замены металлов на лёгкие и прочные материалы. Алюминий, будучи одним из самых распространённых металлов в земной коре, благодаря своей лёгкости, механической прочности и устойчивости к воздействию атмосферных условий, воды, некоторых кислот и органических соединений, стал основой для создания летательных аппаратов. Этот металл нашёл широкое применение в самолётостроении, автомобилестроении, судостроении, строительстве железнодорожных вагонов, создании машин, разнообразных технических конструкций и оборудования. Однако сегодня активно разрабатываются более экономически выгодные и экологически безопасные конструкционные композиты, способные заменить алюминий.

Композитные материалы находят всё большее применение в авиационной отрасли. Использование новых материалов позволяет снизить вес конструкций, одновременно увеличивая их прочность, что положительно сказывается на лётно-технических характеристиках самолётов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Внедрение этих материалов помогает минимизировать затраты на производство [1].

Автомобильная промышленность развитых стран на протяжении десятилетий уделяет особое внимание весу транспортных средств, т. к. он непосредственно влияет на динамику движения, расход топлива и экологию. По данным Министерства энергетики США, снижение веса транспортных средств на 10 % приводит к увеличению экономии топлива на 6–8 %. Повышение топливной эффективности и снижение веса являются основными факторами, вынуждающими производителей инвестировать в фундаментальные исследования и прикладную науку композитных материалов. Положения законодательства о выбросах в США и Европе вынудили производителей автомобилей ограничить уровень выхлопных газов выпускаемых автомобилей. Транспортные средства в европейском регионе начали адаптироваться к нормам Евро-6, другие регионы (Азиатско-Тихоокеанский сегмент, Индия) последовали этому примеру. Более высокие стандарты (которые предназначены для контроля выбросов), в свою очередь, зависят от веса транспортного средства, сгорания топлива и эффективности его использования [1].

Строгие правила и нормы в отношении выбросов играют огромную роль в Северной Америке и Европе. Законодательные органы издают протоколы, предусматривающие включение определенного процента композитных материалов при изготовлении автомобилей для уменьшения загрязнения. В легковых автомобилях наибольшая доля использования композитных материалов. В связи с увеличением корпоративных требований к средней экономии топлива и ужесточением требований к выбросам транспортных средств во всем мире

ождается, что рынок легковых автомобилей, где наибольшая доля использования композитных материалов, будет расти [1].

Триггером для автомобилестроения стало землетрясение 1923 г. в Японии. Природный катаклизм разрушил железнодорожные и трамвайные пути. Стране потребовались грузовики, автобусы и легковые машины. Изначально свои заводы недалеко от Токио построили американские компании «Форд» и «Дженерал моторс». В период Второй мировой войны производственные мощности были уничтожены бомбардировками. К 1950-м гг. большую часть предприятий удалось восстановить, и первый выпуск машин составил 30 000 ед. в год. Японское автомобилестроение получило развитие в 1960-х гг. в эпоху японского экономического чуда. Война в Корее (между Севером и Югом) глобально отразилась на японском автомобилестроении. Армия США заказывала для своих нужд огромные партии грузовых и легковых машин марок «Тойота», «Ниссан», «Исудзу». Вместе с объёмом росло и качество продукции. По окончании военных действий «японский станок» нарастил высокие производственные мощности. К 1980 г. «Нихон коку» обогнала Америку по количеству выпускаемых автомобилей, заняв первое место в мире. После топливного кризиса 1973–1974 гг. экономичные японские автомобили закрепились на американском рынке и продолжают на нём доминировать. Флагманские автоконцерны «Тойота», «Ниссан», «Хонда» и «Мазда» имеют сеть производственных мощностей в США и других уголках мира. Растущий спрос на экономичные автомобили, увеличение сегмента легких электромобилей и тенденция крупных автомобильных гигантов, таких как BMW и Nissan, к замене металлических деталей композитными волокнами открывают перспективы новых масштабов сотрудничества [1].

Анализ размера и доли рынка автомобильных композитов Японии (2024–2029 гг.) показывает, что он сегментирован по типу материала (термоактивный полимер, термопластичный полимер, углеродное волокно, игольчатый волластонит, стекловолокно) и применению (конструкционная сборка, компоненты силовой передачи, применение внутреннее, внешнее и др.) [1].

Общее развитие науки и тяжёлой промышленности сер. XX в. обусловило бурное развитие электроники, в связи с этим стремительно стала расти отрасль робототехники. В 2004 г. на долю Японии приходилось около 45 % функционирующих в мире промышленных роботов (в абсолютных цифрах: к концу 2004 г. в Японии было задействовано 356,5 тыс. промышленных роботов, на втором месте со значительным отрывом шли США – 122 тыс.). Япония занимает первое место в мире по экспорту промышленных роботов, ежегодно производя более 60 тыс. единиц, почти половина из которых вывозится за границу. Сейчас эта промышленность является одной из ведущих в стране и практически не имеет конкурентов в мире. Не менее востребованы роботы в быту. Уход за маломобильными и престарелыми людьми уже практикуется в автоматическом режиме. Создаются роботы, похожие на людей, которые способны выполнять функции социальных работников, могут быть полезны медицинской отрасли. Основными разработчиками и производителями роботов являются компании Sony, Honda, Toyota, Mitsubishi Electric, Panasonic, Kawasaki и Yamaha. Правительство принимает активное участие в развитии отрасли, предоставляя изобретателям льготные условия труда [1].

Успехи промышленности страны, лишенной природных ресурсов, расположенной на ограниченной территории островного архипелага, обусловлены развитием материаловедения и системным анализом социально-экономической динамики с использованием методов нормирования, моделирования и прогнозирования экологических последствий.

Японский автопром достиг лидирующих позиций благодаря планомерной работе инженеров, маркетологов и государства. Япония занимает второе место в мировом экспорте автомобилей, экспортируя свыше 3,1 млн ед. (по данным 2022 г.). Автомобили отличаются высоким качеством, привлекательным дизайном и надежностью, что поддерживается глобальными маркетинговыми кампаниями. Например, известны тесты на затопляемость автомобилей Toyota, которые подчеркивают их высокую надежность.

На начало XXI в. в автомобильной индустрии было задействовано около 8 млн чел. Одной из особенностей данного этапа стало создание сборочных предприятий японских компаний в странах Азии [1].

Композитные материалы в машиностроении

В сфере машиностроения, особенно в производстве коммерческих самолетов, наблюдается революционный переход к использованию композитов. Этот материал обладает рядом преимуществ перед традиционными металлическими сплавами. Во-первых, композиты обладают высокой прочностью при значительно меньшем весе, что снижает расход топлива и затраты на перевозку пассажиров. Кроме того, они менее подвержены усталостным разрушениям, возникающим вследствие многократных циклов взлетов и посадок, что уменьшает количество необходимых проверок и увеличивает время эксплуатации воздушного судна, обеспечивая его рентабельность [12].

Композитный материал (КМ) – это материал, который состоит из прочных армирующих нановолокон или наноиглолок, соединенных с несколько более слабым материалом (матрицей). Основная роль арматуры заключается в обеспечении прочности, жесткости и других механических свойств композита. Матрица, или связующее, помогает поддерживать положение и ориентацию арматуры и является несколько более хрупкой. Матрица в композитах выполняет функцию непрерывной фазы, определяющей форму конструкции. В аэрокосмической отрасли применяются различные типы композитов, каждый из которых обладает специфическими свойствами и областью применения [1].

Впервые композиты были разработаны и стали использоваться в военных самолетах во время Второй мировой войны. В настоящее время они доминируют в частных самолетах и современных коммерческих самолетах в аэрокосмической промышленности. В зависимости от состава арматуры выделяется три наиболее распространенных типа композитов: КМ усилены стекловолокном, КМ усилены углеродным волокном и КМ усилены арамидным волокном. В каждом типе КМ есть подтипы, которые обеспечивают широкий спектр композитов. Fiberglass представляет собой армированный волокном полимер, изготовленный из пластиковой матрицы, армированной тонкими волокнами из стекла. Это легкий, чрезвычайно прочный материал. Хотя по прочностным свойствам материал немного уступает углеродному волокну, однако он менее жесткий, как правило,

гораздо менее хрупкий, а изготавливаемое на его основе сырье намного дешевле. Укрепленный углем полимер (углепластик) – это высокопрочный и легкий композит, содержащий углеродные волокна. Помимо них, в состав материала могут входить другие армирующие элементы, такие как волластонит, арамид, кевлар, тварон, а также алюминиевые или стеклянные волокна. Aramid fiber относится к типу прочных синтетических волокон. Он используется в аэрокосмической и военной областях, для изготовления бронежилетов и баллистических композитов, в велосипедных шинах и в качестве заменителя асбеста.

Ежегодно авиаракетостроительная отрасль увеличивает использование современных композитных материалов в конструкциях новых поколений воздушных судов. Если в 1950-е гг. доля композитов из стекловолокна в структуре пассажирского самолета Boeing 707 составляла лишь 2 %, то в Boeing 787 этот показатель достигает 50 % от конструктивного веса самолета. В Airbus A380 композиты занимают около 25 % общей массы планера [13].

Рост спроса на более легкие и экономичные воздушные суда создает значительные перспективы для производителей композитных компонентов в авиационно-космической отрасли на ближайшие 15 лет. Следует отметить, что применение композитных материалов в аэрокосмической промышленности пока находится на этапе исследования и необходимо дальнейшее улучшение производственных процессов для полного раскрытия потенциала рынка. Так, растущие требования потребителей стимулируют разработчиков стекловолоконных и волластонитовых материалов к внедрению более эффективных технологий производства. Композиционные материалы продолжают играть важную роль в создании аэрокосмических конструкций [1].

Волластонит и композиты на его основе

Производство β -волластонита начато в США в 40-х гг. XX в. В настоящее время годовой объем производства волластонита достигает 300 тыс. т, в том числе более одной трети составляет синтетический β -волластонит [7]. Значительная часть продукции экспортируется в Западную Европу и Японию [1].

Под руководством А.В. Мананкова в научно-исследовательской лаборатории кинетики минералообразования и кристаллофизики Томского государственного университета и в Томском государственном архитектурно-строительном университете с 1972 г. проводятся исследования природных и синтезированных искусственных β -волластонитов с использованием высокотемпературных петругических и гидротермальных золь-гельных методов. Было получено 19 различных составов. Основные характеристики β -волластонита включают волокнистую и игольчатую структуру с соотношением сторон до 30:1. Материал обладает высокой белизной (до 90 %), сопротивлением, низкой маслоёмкостью, низкой диэлектрической проницаемостью, термостойкостью, коррозионной стойкостью, устойчивостью к кислотам и щелочам, нетоксичностью, немагнитностью и низким коэффициентом теплового расширения. Он имеет характеристики малых потерь при возгорании и превосходные механические свойства, а также обладает определенным сродством с растительными волокнами. Принято ультратонкий порошок волластонита называть «минеральным волокном». Другие характеристики волластонита: нетоксичность, хорошая термическая ста-

бильность (1200–1540 °С), стеклянный и жемчужный блеск, отличные механические и электрические свойства, устойчивость к химической коррозии, хорошая стабильность размеров, низкая скорость абсорбции, а также определенный усиливающий эффект [1].

Вычисленные параметры кристаллической решетки обнаруживают некоторую зависимость от температуры кристаллизации в интервале 950–1150 °С. Выявлена новая полиморфная модификация волластонитового состава триклинной сингонии, которая получила название трансволластонит (Т-волластонит) [9]. Проведены опытно-заводские испытания в более чем 20 технологических процессах и различных функциональных и строительных материалах. Получены убедительные результаты в области модификации кабельных резин, автошин, полиэтилена, композитов для космического корабля «Буран», пластмасс, керамик и т. п. Результаты исследований подтверждены около 20 патентами на изобретения [3, 4, 14, 15].

В медицинскую практику внедрены патенты:

– № 2108069 «Способ получения материала для косного имплантата», приоритет 09.04.1996;

– патент № 2109493 «Зубной имплантат», приоритет 09.08.1996.

Получил внедрение патент № 2181105 от 10.04.2002 г. «Состав синтетического волластонита и способ его получения на основе промышленных отходов ОАО «Химпром», г. Волгограда [1].

Мировой спрос на волластонит удовлетворен только на 40–45 %. В связи с этим увеличивается производство синтетического волластонита. Его цена на мировом рынке составляет 800–900 долл. США за тонну, что приблизительно вдвое ниже рыночной стоимости природного волластонита, но более чем на порядок превышает себестоимость синтеза из промышленных отходов и доступного природного сырья.

Перспектива использования синтетического волластонита в России, на наш взгляд, определяется потребностями практически всех отраслей экономики. Строительная индустрия может улучшить качество основных материалов:

- стеновых изделий;
- перекрытия зданий»
- облицовочных материалов;
- отделочных материалов;
- кислотостойких бетонов;
- кирпича;
- сухих штукатурок;
- клеев;
- строительной фурнитуры;
- красок для автотрасс.

Основная тенденция развития промышленности неорганических наполнителей за рубежом – значительное расширение их ассортимента и строгое дифференцирование по областям применения в соответствии с постоянно возрастающими требованиями к качеству, возможностью экономии дорогих и дефицитных модификаторов, наполнителей и необходимостью рационального использования природных ресурсов. Однако руководители томских предприя-

тий, производящих строительные материалы, судя по результатам недавних опросов, не проявляют интереса к данной теме. Мы считаем, что такое отношение неоправданно и даже неэтично, поскольку приоритетом должно быть не расширение личных владений, а изменение подхода к управлению. Томская область занимает последнее место в регионе по объемам строительства.

Заключение

Социальный, экономический и экологический эффекты от внедрения композитных материалов становятся все более чем очевидными, учитывая технологические особенности разработок и увеличивающиеся потребности в инновационных силикатных материалах.

Отрасли машиностроения, в режиме модернизации, судя по мировым тенденциям, будут активно использовать волластонит. Сегодня при разработке новой техники и оборудования особое внимание уделяется созданию конструкционных термостойких материалов с заданными каталитическими и излучательными свойствами. По статистике, около 12–15 % мирового потребления волластонита приходится на металлургическую промышленность. Это связано с тем, что волластонит обладает низкотемпературными флюсовыми свойствами, стабильным химическим составом, высокой чистотой и нейтральной щелочностью.

Проблемы получения и применения силикатов и гидросиликатов кальция, стехиометрический состав которых можно выразить формулами $a\text{CaO} \cdot b\text{SiO}_2$ и $a\text{CaO} \cdot b\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ соответственно, вызывают все больший интерес со стороны учёных и специалистов. Это объясняется масштабами использования природных и синтетических силикатных минералов в различных отраслях промышленности, техники и науки. Силикаты кальция разного состава и структуры, благодаря своим физическим и физико-химическим свойствам, нашли широкое применение в качестве наполнителей композиционных материалов в строительной, резинотехнической, целлюлозно-бумажной, химической, керамической, стекольной, лакокрасочной, электротехнической и других отраслях промышленности.

Перспективным направлением является использование этих соединений в качестве основы для получения функциональных материалов различного назначения. Особый интерес представляют силикаты кальция со стехиометрическим соотношением CaO к SiO_2 , равным 1, типичным представителем которых является волластонит. Новый полиморф волластонита, открытый нами в этой системе, объясняет квантовые свойства и квантование при росте кристаллов.

Волластонит обладает высокой химической стойкостью, обеспечивает материалам на его основе негорючесть, уникальные диэлектрические свойства и низкую теплопроводность, экологическую безопасность применения. В металлургии и машиностроении, космической и авиационной технике, строительстве, медицине и фармакологии волластонит доказал свою перспективность и соответствие современным требованиям.

Синтетические силикаты кальция, в отличие от природных, более однородны по составу и строению, содержат меньше примесей и характеризуются дисперсным составом вплоть до тысячных долей микрона. Эти преимущества определяют их более широкое практическое применение. Современные высокотехнологичные методы получения силикатов кальция позволяют изменять

свойства конечных продуктов в широком диапазоне и тем самым обеспечивают оптимальное соответствие требованиям конкретного направления использования. Сырьевая база для получения синтетических силикатов кальция практически неограниченна, поскольку кальций- и кремнийсодержащие соединения присутствуют в различных техногенных отходах и природных образованиях. Поэтому актуальным становится получение синтетических силикатов кальция с заданными характеристиками. Для синтеза игольчатого волластонита нами используется дезинтегратор Хинта (Эстония, г. Таллин).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Рахманова И.А., Мананков А.В.* Новые функциональные композиционные материалы на основе волластонита для машиностроения // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Томск, 2024. С. 50–54. EDN: PRMDMR
2. *Исламова Г.Г.* Технология синтетического волластонита из природных кальций- и кремнийсодержащих соединений : специальность 05.17.01 – Технология неорганических веществ : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012. 24 с.
3. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Инновационные материалы класса «сикам» и концептуальный этап их жизнедеятельности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 170–182. EDN: OYATHP
4. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Концептуальная фаза жизненного цикла инновационного материала – синтетического волластонита // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 368. С. 108–114. EDN: PWHSGI
5. *Белов Н.В.* Очерки по структурной минералогии. Москва : Недра, 1976. 344 с.
6. *Vukovich M.Jr.* Wollastonite in melted ceramic systems // J. Canad. Ceram. Soc., 1962. V. 31. P. 100–103.
7. *Weston R.M., Rogers P.S.* The growth of calcium metasilicate polymorphs from supercooled melts and glasses // Mineral. Magazine. 1978. V. 42. P. 325–335.
8. *Мананков А.В., Локтюшин А.А.* Нетрадиционные технологии силикатов на основе фундаментальных научных разработок // Геология, геохимия, минералогия и металлогения юга Сибири. Томск, 1990. С. 85–87.
9. *Мананков А.В., Горюхин Е.А., Локтюшин А.А.* Волластонитовые, пироксеновые и другие материалы из промышленных отходов и недефицитного природного сырья. Томск : Изд-во ТГУ, 2002. 168 с.
10. *Локтюшин А.А., Мананков А.В.* Поляризационная трансляция фазовых переходов и динамика образования метасиликатов щелочно-земельных элементов в вязких расплавах // Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Сибири. Томск, 1990. Вып. 1. С. 16–22.
11. *Асхабов А.М.* Квазаронные модели зарождения и роста кристаллов // ЗРМЛ. 2016. № 5. С. 17–24.
12. *Аль-Дарабсе А.М.Ф.* Исследование экономических систем в авиастроении на основе методологии функционально-стоимостной инженерии // Молодежь и наука XXI века : материалы Международной научной конференции. 2018. С. 470–472.
13. *Аль-Дарабсе А.М.Ф., Вольсков Д.Г.* Авиационная промышленность – смягчения последствий изменения климата посредством технологии и политики // Проблемы технического сервиса в АПК : сборник научных трудов II студенческой всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 21–28.
14. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Структура инновационного процесса производства наноматериалов на основе промышленных отходов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1. С. 143–149. EDN: LAIXCP
15. *Мананков А.В., Рахманова И.А.* Экологические аспекты производства инновационных материалов на основе промышленных отходов // Инновации и недвижимость как матери-

альный базис модернизации экономики : материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2013. С. 227–231.

REFERENCES

1. *Rakhmanova I.A., Manankov A.V.* New Functional Composite Materials Based on Wollastonite for Mechanical Engineering. In: *Proc. 15th Int. Sci. Conf.* Tomsk, 2024. Pp. 50–54 (In Russian)
2. *Islamova G.G.* Technology of Synthetic Wollastonite from Natural Calcium and Silicon-Containing Compounds. PhD Abstract. Kazan National Research Technological University. Kazan, 2012. (In Russian)
3. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Rock Glass-Ceramics Innovative Materials and Conceptual Stage of Their Life. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2012; (2): 170–182. (In Russian)
4. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Conceptual Phase of Life Cycle of Synthetic Wollastonite Innovative Material. *Vestnik TSU.* 2013; (368): 108–114. EDN: PWHSGL (In Russian)
5. *Belov N.V.* Essays on Structural Mineralogy. Moscow: Nedra, 1976. 344 p. (In Russian)
6. *Vukovich M.Jr.* Wollastonite in Melted Ceramic Systems. *Journal of the American Ceramic Society.* 1962; 31: 100–103. (In Russian)
7. *Weston R.M., Rogers P.S.* The Growth of Calcium Metasilicate Polymorphs from Supercooled Melts and Glasses. *Mineral. Magazine.* 1978; 42: 325–335.
8. *Manankov A.V., Loktyushin A.A.* Unconventional Silicate Technologies Based on Fundamental Scientific Developments. In: *Geology, Geochemistry, Mineralogy and Metallogeny of Southern Siberia.* Tomsk, 1990. Pp. 85–87. (In Russian)
9. *Manankov A.V., Goryukhin E.A., Loktyushin A.A.* Wollastonite, Pyroxene and Other Materials from Industrial Waste and Abundant Natural Raw Materials. Tomsk: TSU, 2002. 168 p. (In Russian)
10. *Loktyushin A.A., Manankov A.V.* Polarization Translation of Phase Transitions and Dynamics of Formation of Alkaline-Earth Element Metasilicates in Viscous Melts. *Mineralogiya, geokhimiya i poleznye iskopaemye Sibiri.* 1990; (1): 16–22. (In Russian)
11. *Askhabov A.M.* Quataronic Models of Crystal Nucleation and Growth. *ZRML.* 2016; (5): 17–24. (In Russian)
12. *Al-Darabse A.M.F.* Economic Systems in Aircraft Manufacturing Based on Methodology of Functional Cost Engineering. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Youth and Science of the 21st Century'.* 2018. Pp. 470–472. (In Russian)
13. *Al-Darabse A.M.F., Volskov D.G.* Aviation Industry - Mitigation of Climate Change Through Technology and Policy. In: *Proc. 2nd Int. Sci. Conf. 'Problems of Technical Service in Agro-Industrial Complex'.* 2019. Pp. 21–28. (In Russian)
14. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Innovative Production Process of Nanomaterials Based on Industrial Waste. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2010; (1): 143–149. EDN: LAIXCP (In Russian)
15. *Manankov A.V., Rakhmanova I.A.* Environmental Aspects of Production of Innovative Materials Based on Industrial Waste. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Innovations and Real Estate as a Material Basis for Economic Modernization'.* 2013. Pp. 227–231. (In Russian)

Сведения об авторах

Мананков Анатолий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mav.39@mail.ru

Рахманова Ирина Анатольевна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ir9039508837@yandex.ru

Владимиров Валерий Михайлович, канд. хим. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, glovani.v@mail.ru

Authors Details

Anatoly V. Manankov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mav.39@mail.ru

Irina A. Rakhmanova, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ir9039508837@yandex.ru

Valery M. Vladimirov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, glovani.v@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.11.2024
Одобрена после рецензирования 28.11.2024
Принята к публикации 02.12.2024

Submitted for publication 20.11.2024
Approved after review 28.11.2024
Accepted for publication 02.12.2024