



Нанопокрытия в современном строительстве

В.Р. Фаликман 

Научно-исследовательский центр «Строительство», г. Москва, Россия

Контакты: e-mail: vfalikman@yandex.ru

РЕЗЮМЕ: В обзоре проанализировано состояние рынка нанопокровтий, приведены основные их виды, а также драйверы и барьеры их разработки и применения. Современный прогресс в области нанотехнологий позволяет отнести нанопокровтия к высокотехнологичным материалам, структура и свойства которых могут быть «запроектированы» по специфическим функциональным критериям и уровню воздействия на окружающую среду. Они обладают уникальными характеристиками по сравнению с обычными покрытиями, применяемыми в строительстве. Масштабные планы правительства по введению в эксплуатацию нового жилья и созданию дорожной инфраструктуры, амбициозные проекты освоения Арктики и обеспечения национальной безопасности должны привести к росту индустрии в целом, а также к повышению спроса на более эффективные, инновационные строительные материалы, включая нанопокровтия и нанокраски.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная индустрия, наноматериалы и нанотехнологии, функциональные покрытия, мировой рынок, драйверы и барьеры, устойчивое развитие.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фаликман В.Р. Нанопокровтия в современном строительстве // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 1. – С. 5–11. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-1-5-11.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность строительных материалов и строительство, несмотря на их определенно консервативный характер, вынуждены все чаще сталкиваться с тем, что называют «индустриальной революцией XXI века». Новые закономерности, новые методы испытаний и исследований создают значительный потенциал для создания высокотехнологичных продуктов и процессов, отличающихся гарантированными показателями надежности, развивают принципы получения современных «суперматериалов» и характеризуют начало шестого технологического уклада [1].

Среди них, согласно документам ТС 197-NCM Международного союза экспертов и лабораторий в области строительных материалов, систем и конструкций (РИЛЕМ), особое место занимают функциональные покрытия, многократно повышающие качества материалов, например, их оптические, тепловые свойства, долговечность, истираемость, сопротивляемость различным воздействиям, обеспечивающие самоочищаемость, препятствующие надписи на стенах и т.д. [2].

Согласно стандарту ISO 4618:2014 [3], под термином «покрытие» понимают слой, образованный в результате однократного или многократного нанесения материала покрытия на подложку. Материал покрытия – это продукт в жидкой, пастообразной или порошковой форме, который при нанесении на подложку образует слой, обладающий защитными, декоративными и/или другими специфическими свойствами. При этом «нанопокровтие» может быть определено как покрытие, имеющее либо толщину покрытия в наноразмерном масштабе, либо содержащее частицы второй фазы в наноразмерном диапазоне, которые диспергируются в матрице, либо покрытие, имеющее наноразмерные зерна/фазы и т. д. [4].

В научно-технической и аналитической литературе краски являются частным случаем покрытий [5]. Так, в ГОСТ 9.072-2017 [6] «лакокрасочное покрытие» определено как сплошное покрытие, сформированное в результате нанесения одного или нескольких слоев лакокрасочного материала на окрашиваемую поверхность, а «нанопокровтие» как покрытие с толщиной высохшего слоя в диапазоне от 1 до 100 нм. Интересно отметить, что одним из первых коммерческих применений нанотехно-

логий стало использование углеродных нанотрубок именно в красках [5].

Таким образом, обобщая, можем сделать вывод, что по своей природе нанопокрывтия относятся, как правило, к очень тонким слоям химических веществ (полимеров, металлов, композитов и др.), которые используются для придания специфических химических и физических характеристик поверхности подложки: гидрофобных и/или олеофобных свойств, коррозионной стойкости, стойкости к истиранию и царапинам, твердости, смазываемости, прозрачности, пластичности и др.

РЫНОК НАНОПОКРЫТИЙ. ДРАЙВЕРЫ И БАРЬЕРЫ

По материалам мировых аналитических агентств, объем мирового рынка нанопокрывтий в 2019 году оценивался в 6101,8 млн долларов США и, по прогнозам, он достигнет 22,96 млрд долларов США к 2027 году при среднем показателе роста (CAGR) 18,4% в год. Рынок нанопокрывтий переживает быстрый рост, связанный с их растущим спросом в таких отраслях конечного потребителя, как здравоохранение, автомобилестроение, строительные материалы и строительство, электроника, судостроение, энергетика, водоочистка и упаковка [7–9].

Благодаря свойствам, присущим наноуровню, нанопокрывтия обычно являются многофункциональными, проявляя одно или комбинации следующих свойств: самозалечивание, самоочистление, антимикробная и антивирусная активность, каталитическая активность, антистатика, сенсорная чувствительность и т.д. Принципиально инновационными являются нанопокрывтия с памятью формы и чувствительные к отпечаткам пальцев, а также энергоэффективные покрывтия.

Нанопокрывтия обеспечивают устойчивость к колебаниям температуры, в результате чего их применение резко растет в изделиях и конструкциях, подверженных воздействию перепадов температур и суровых климатических условий. Керамическая плитка, стеклянные окна, резервуары для хранения сжиженных газов являются типичными примерами.

Эффективные огнезащитные нанопокрывтия получают путем применения наноразмерных двойных гидроксидов магния-алюминия (LDHs), нанодиоксида титана (TiO_2) и нанодиоксида кремния (SiO_2) [10–12].

Нанопокрывтия создают прозрачную, бесцветную защиту, которую невозможно обнаружить невооруженным глазом. Это поддерживает эстетический внешний вид изделия, сохраняет его естественный блеск и прозрачность. Кроме того, изделия с нанопокрывтием практически не накапливают грязь. В тех

редких случаях, когда посторонние загрязнители, такие как пыль и грязь, прилипают к поверхности, их можно легко удалить смыванием.

Нанопокрывтия способны обеспечить защиту от ультрафиолетового света (УФ) и устойчивость к истиранию. Это значительно увеличивает срок службы изделий и делает их идеальными для сохранения лакокрасочных поверхностей. Наночастицы диоксида кремния (SiO_2), диоксида титана (TiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) и оксида циркония (ZrO_2) широко используются для повышения твердости и механических свойств покрывтий, тем самым повышая их износостойкость и устойчивость к царапинам. Среди областей их применения – поддержание внешнего вида поверхности и долговечности паркетных полов или оконных стекол [13].

В последние годы широкое распространение приобретают наноструктурированные покрывтия «анти-граффити» на основе полиуретанов, модифицированных наночастицами кремнезема и диоксида титана [14–17]. Они особенно перспективны на исторических и каменных поверхностях для сохранения культурного наследия.

Нанопокрывтия значительно повышают коррозионную стойкость конструкций (железобетона, каменных конструкций, металлов и т.д.), что увеличивает их долговечность и срок службы. Самые последние технические решения применения самовосстанавливающихся и интеллектуальных покрывтий для повышения защиты от коррозии рассмотрены в [18].

Нанопокрывтия являются антиадгезионными и более гигиеничными по сравнению с обычными покрывтиями. Они препятствуют росту бактерий и микроорганизмов. Конструкции и детали с нанопокрывтиями не требуют вошения для поддержания своего блеска. Кроме того, они также являются экологически чистыми, нетоксичными и дышащими, что позволяет эффективно использовать их на различных продуктах, поскольку они подавляют сырость и плесень.

Среди выпускаемых рядом немецких и испанских фирм с конца 90-х годов продуктов, получаемых на основе нанотехнологий, выделяются покрывтия для полной гидрофобизации поверхностей, для предотвращения ущерба от граффити, для ликвидации потенциальных источников биоповреждений – плесени, грибов, мхов, лишайников, подавления высолообразования.

Гидрофобные покрывтия [19–23], в основном, используются для придания поверхностям водостойкости и коррозионной стойкости. Так, гидрофобная система на основе нанодиоксида кремния (SiO_2) создает для воды краевой угол смачивания, превышающий 150° , а угол скатывания – менее 10° [24].

Современные кремнийорганические соединения (КОС) могут заметно улучшить эти показатели [25].

Действительно, КОС с их активными группами могут вступать в реакцию с минеральными (неорганическими) субстратами, содержащими силанольные группы (Si–OH), такими как бетон, цемент, камень, кирпич, железобетон, с образованием силоксановых связей (Si–O–Si) между субстратом и молекулами модификатора. Это приводит к стабильной гидрофобизации поверхности. Среди других положительных свойств следует отметить то, что КОС проникают в субстрат на глубину от ~0,5 мм до 1 мм, что помимо устойчивого гидрофобного эффекта алкилсилоксановой поверхности предотвращает ее шелушение. Кроме того, модифицированная поверхность становится устойчивой к атмосферным воздействиям и ультрафиолетовому излучению [5].

Гидрофобизация сегодня активно используется для повышения эффективности минеральных утеплителей («минеральной ваты»), что сводит к минимуму их водо- и паропоглощение. Области применения гидрофобизированных утеплителей включают нефтехимический комплекс, судостроение, гражданские здания (стены, полы и потолки), тепловые станции, нефтеперерабатывающие заводы, электростанции, студии звукозаписи, конференц-залы, аэропорты и метрополитен, системы кондиционирования воздуха, изготовление сэндвич-панелей и т.д. [5].

Знаковые изменения произошли в сфере разработки и применения нового поколения самоочищающихся покрытий. Важно, что последние рассматриваются сегодня в общем контексте борьбы за кардинальное снижение затрат и рабочего времени на обслуживание, ремонт и восстановление конструкций сложных объектов.

Как известно, под воздействием ультрафиолета модифицированный TiO_2 работает как фотокатализатор, выделяя атомарный кислород из паров воды или атмосферного кислорода. Выделенного активного кислорода достаточно для окисления и разложения органических загрязнений, дезодорирования помещений, уничтожения бактерий.

К настоящему времени строительные материалы, содержащие добавки TiO_2 -наночастиц, широко применяются в цементных красках, специальных цементах, строительных растворах, дорожных покрытиях, как бетонных, так и битумных, самоочищающихся материалах и конструкциях, воздухоочищающих материалах и конструкциях, антибактериальных материалах и конструкциях, составах и отделочных материалах для наружных и внутренних работ [26].

Особенно распространено применение таких светочувствительных катализаторов при формировании

самоочищающихся поверхностей бетона за счет открытого явления супергидрофильности, что позволяет поддерживать эстетический вид построенных объектов неизменным в течение продолжительного времени.

Первое очень крупное применение фотокаталитических материалов с самоочищающимися свойствами относится к 1996 году, когда фирма Italcementi приняла участие в строительстве церкви Dives in Misericordia в Риме. Проект предполагал возведение сложной конструкции из трех огромных белых парусов, собираемых из сборного железобетона, что потребовало использования уникального по своим свойствам бетона, который, кроме высокой прочности и долговечности, должен был неограниченно долго сохранять белый цвет благодаря самоочищающимся свойствам поверхности.

Фотокаталитические цементы были использованы и в других престижных европейских архитектурных проектах, прежде всего во Франции – Cité de la Musique в Шамбери (2003 год), Hotel de Police в Бордо, а также Saint John Court в Монте-Карло (Монако), школы в городе Мортара, Италия (1999 год), многоэтажных жилых комплексах в Остенде, Бельгия. Кроме того, были разработаны составы цементных красок и штукатурок, содержащих фотокатализаторы, которые широко применяются в Италии при строительстве жилых зданий в мегаполисах и сложной городской среде, для повышения экологичности тоннелей, подземных парковок, заправок и т.п.

Строительные материалы, содержащие TiO_2 , интересны не только из-за своих свойств самоочищения. Проводимые исследования показывают, что такие материалы имеют хороший потенциал при контроле городского загрязнения. Например, фотокаталитической системой TiO_2 /цемент могут быть уничтожены NO_x , SO_x , NH_3 , CO , летучие органические углеводороды, такие как бензол и толуол, органические хлориды, альдегиды и конденсированные ароматические соединения [27].

Легирование мезопористой пленки TiO_2 небольшим количеством наносеребра может усилить ее антибактериальный эффект даже без облучения ультрафиолетовым светом.

Как гидрофильные, так и гидрофобные покрытия применимы, прежде всего, для плоских поверхностей и базовых строительных материалов, таких как бетон и железобетон, камень и дерево.

В последнее время все большее распространение находят покрытия с фазовым переходом (PCMs), используемые в качестве скрытой системы аккумуляции тепла [28]. В основном, они используются на внутренних и внешних поверхностях, например, стенах, окнах, полах [29–31], чтобы регулировать их температуру в определенном диапазоне.

Нанохромные материалы, например, триоксид вольфрама (WO_3) [32], нестехиометрические оксиды никеля (NiO_x), диоксид титана (TiO_2) и диоксид ванадия (VO_2) [33, 34], могут наноситься в виде тонкопленочных слоев на оконные стекла в качестве энергоэффективных покрытий [35]. Электрохромные окна являются наиболее перспективными для снижения холодовых нагрузок, тепловых нагрузок и экономии энергии освещения в зданиях, где они способны регулировать коэффициент пропускания до 68% всего солнечного спектра.

Нанопористые пленки диоксида титана (TiO_2) на тонкой пленке оксида олова (SnO_2) успешно используются в фотоэлектрических системах (PV) для получения большего количества электроэнергии [36]. Кроме того, в [37] предложен метод антиотражения с использованием наноразмерной точечной матрицы в качестве одного из наиболее эффективных методов достижения высокой эффективности в таких системах.

Особую группу составляют высокопрочные, высокоэластичные и ударостойкие покрытия, которые одновременно стойки к химическим воздействиям и защищают конструкции от коррозии.

Ключевой концепцией механизма обеспечения работы нанопокровов является их способность к самовосстановлению посредством процесса «самосборки» [38]. Под самосборкой понимают явление, при котором компоненты системы самопроизвольно собираются в результате взаимодействия, образуя более крупную функциональную единицу. Такая спонтанная организация может быть обусловлена непосредственными специфическими взаимодействиями и/или реализовываться опосредованно через свое окружение [39].

Интересна технология получения нанокomпозиционных материалов, содержащих взаимопроникающие полимерные сетки (ВПС) на основе полиуретанов, эпоксидных смол и акрилатов, модифицированных в жидкой фазе наночастицами SiO_2 , TiO_2 или другими оксидами металлов [40]. Базовым элементом технологии являются разветвленные (дендровидные) аminosиланы, которые служат отверждающим агентом для многих олигомеров. Они позволяют интродуцировать силоксановые фрагменты в структуру эпоксидной композиции, а дополнительный гидролиз аminosиланового олигомера — получить вторичный наноструктурированный сетчатый полимер, который существенным образом повышает эксплуатационные характеристики компаунда. Такие наномодифицированные полимерные сетки создают уникальную возможность управления микро- и наноструктурными характеристиками новых композиционных материалов. Двухкомпонентный компаунд объединяет высокие механические характеристики

полиуретана и химическую стойкость эпоксидного связующего. Разработанные разветвленные дендроминные отвердители являются новым направлением в химической технологии циклокарбонатов, эпоксидных и акриловых смол [41]. Полимерные нанокomпозиты нового класса являются экологически чистыми материалами, не содержащими вредные или летучие компоненты.

В работе [42] исследованы свойства и разработана технология производства новых композиционных материалов и компаундов наногетерогенной структуры, основанная на использовании эпоксидных смол, жидкого каучука, аминных отвердителей и фторсодержащих поверхностно-активных веществ. Полученные наноструктурированные эпоксикаучуковые покрытия для бетонных и железобетонных конструкций резко уменьшают их деформативность при кратковременном и длительном действии нагрузки. Защитные эпоксикаучуковые покрытия обеспечивают увеличение прочности бетона на растяжение при изгибе в два-три раза и, следовательно, повышают его трещиностойкость. Они обладают хорошей химической стойкостью, высокими механическими характеристиками и термостойкостью.

На рынке красок и покрытий представлено множество игроков, два из которых — Akzo Nobel и PPG — занимают почти четверть рынка. Из других крупных производителей достаточно упомянуть Sherwin Williams, Dupont и BASF (от 7 до 4%). Почти все основные производители красок и покрытий развивают производство нанотехнологической продукции, закупая на стороне нанокomпоненты, и не занимаются дистрибуцией. Исключение составляет Sherwin-Williams, так как компания владеет также сетью DIY. Из многочисленных конкретных продуктов можно выделить фасадную краску с грязеотталкивающими свойствами Herbol Symbiotec производства Akzo Nobel, систему продуктов по технологии Nanoguard (BEHR), систему защиты поверхностей от загрязнений с перманентным эффектом защиты от граффити на основе наноструктурированных полиуретанакрилатных композитов (MC Bauchemie), широкую гамму покрытий, красок с высокой адгезией по металлу, черепице, бетону, стеклу и уникальными характеристиками по энергосбережению, грязеотталкиванию, защите от огня и влаги по технологии Nansulate (Nanotechnic) [43]. Новые тенденции, оказывающие непосредственное влияние на динамику развития наноиндустрии, включают в себя наноструктурированное покрытие для профилактики биопленочных инфекций и разработку нанопокровов для водонепроницаемых мобильных устройств.

Из других участников рынка нанопокровов следует выделить быстро растущие CTC Nanotechnology, Theta Chemicals, Advenira Enterprises, Inframat,

Nanogate, AdMat Innovations, Nanophase Technologies, Tesla NanoCoatings [8].

Говоря о российском рынке, его лидер в сегменте покрытий и красок – финская Tikkurila – не имеет лидирующих мировых позиций по нанотехнологическим продуктам. Единственный здесь мировой лидер с существенными позициями в России – Akzo Nobel.

Наноокрашивание может быть произведено с предельной точностью с помощью процесса, который включает в себя атомные строительные блоки, где атомы осаждаются контролируемым образом, чтобы получить слой, который равномерно соответствует каждой отдельной особенности поверхности.

За счет все более широкого проникновения нанотехнологических стройматериалов в строительную отрасль, а также коммодитизации производства наноконструктивных сегментов производства строительных материалов, в целом, и покрытий, в частности, будет расти быстрее остальных.

Вообще говоря, ужесточение регулирования по охране окружающей среды – главный драйвер популяризации новых нанотехнологических строительных материалов. Повышение внимания мирового сообщества к проблеме устойчивого развития [44] определяет введение новых нормативных требований в строительной отрасли. При этом основной акцент делается на сокращение выбросов CO₂, энергоэффективность, снижение загрязненности воздуха. Существенную роль в коммерциализации играют также экономические факторы – увеличение срока службы зданий сооружений, использование меньшего количества строительных материалов, облегчение обслуживания, сокращение сроков строительства. Все это, в той или иной степени, обеспечивается применением эффективных нанопокровов.

Несмотря на высокие начальные инвестиции в производство, необходимость следования принципам устойчивого развития [45] может вызвать существенное увеличение объемов применения новых материалов с учетом значительного снижения расходов на основе анализа полного жизненного цикла здания. Заинтересованность в сохранении окружающей среды является важным драйвером для проникновения инновационных материалов.

Рост спроса на инновационную продукцию в последнее время обусловлен изменениями в образе жизни населения, тенденции к большому комфорту и функциональности жилых помещений. Определенная категория населения Европы и Северной Америки требует повышения экологичности зданий и готова оплачивать их премиальную стоимость.

Внедрение ужесточенных природоохранных норм и норм по энергоэффективности может существенно

поддержать спрос на нанотехнологические строительные материалы.

С сожалением приходится констатировать, что в России этот рынок во всех своих составляющих фактически пока отсутствует. Прежде всего, это связано тем, что спрос на нанотехнологическую продукцию, как со стороны государства, так и со стороны частных потребителей, минимален. Строители, в основном, не знакомы с инновационными материалами и, как правило, не ищут их на рынке, а производители не имеют достаточного количества специализированных производственных мощностей на территории РФ. В результате, несмотря на существование ряда драйверов, которые предоставляют возможности развития рынка, имеет место ряд негативных факторов, которые этому препятствуют.

С нашей точки зрения, содействовать развитию рынка нанотехнологических стройматериалов в РФ будут реализация национальных программ «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации», «Охрана окружающей среды» и «Развитие транспортной системы», задачи повышения энергоэффективности экономики и коммерциализация инновационной деятельности.

Действительно, масштабные планы правительства по введению в эксплуатацию нового жилья и дорожной инфраструктуры, амбициозные проекты освоения Арктики и обеспечения национальной безопасности должны привести к росту индустрии, в целом, а также к повышению спроса на более эффективные, инновационные строительные материалы. Сегодня Россия существенно отстает от ведущих мировых стран по показателю жилого фонда на душу населения: в 2 раза по сравнению с ЕС и в 4 раза по сравнению с США. С этой точки зрения, использование новых технологий увеличения полного жизненного цикла и повышения качества жизни должно позволить существенно приблизиться к объявленным ориентирам.

Вместе с тем, растущее использование наноматериалов вызывает определенные опасения по поводу их безопасности для здоровья человека и окружающей среды. В настоящее время существует ряд серьезных неопределенностей и пробелов в знаниях в отношении поведения, химических и биологических взаимодействий и токсикологических свойств наноматериалов [46 - 49]. К сожалению, маловероятно, что все они будут разрешены в ближайшем будущем, поскольку их устранение потребует большого объема сложных экспериментальных работ и выработки новых базовых знаний. Важно при этом учитывать весь жизненный цикл нанопродуктов, чтобы обеспечить систематическое обнаружение их возможных воздействий [50–51].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время во всем мире продолжают дальнейшие исследования, направленные на улучшение свойств, функциональных возможностей и областей применения нанопокрываний. Эти исследования все еще находятся в фазе непрерывной эволюции, если не революции, хотя уже сегодня, путем использования нанопокрываний самого различного вида и механизма действия, может быть достигнута существенная модификация свойств поверхности или вещества в соответствии с заданными пользователями параметрами. Следует ожидать, что наиболее значимым функционалом нанотехнологической про-

дукции в ближайшее время в сегменте красок и покрытий будет являться повышение их долговечности.

Создание и активизация деятельности в России институтов развития, которые продвигают инновационную продукцию, содействуют организации ее производства и применения в различных отраслях, в том числе в строительстве, несомненно, повлечет за собой появление новых строительных материалов, которые обеспечат достижение поставленных национальных целей. Современный прогресс в области нанотехнологий позволяет надеяться, что уже в наступившем десятилетии многие задачи, на сегодня представляющиеся фантастическими, будут успешно решены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинецкий Г. Г. Модернизация – курс на VI технологический уклад // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – М., 2010. – № 41. – С. 16–19.
2. Zhu, W., Bartos, P.J.M., Porro, A. (eds.): Application of Nanotechnology in Construction. Mater. Struct. 37, 649–659 (2004).
3. ISO 4618:2014. Paints and varnishes – Terms and definitions.
4. Saji V.S., Cook R. Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials. Woodhead Publishing. Cambridge, UK, 2012, 424 p.
5. Li L., Yang Q. (eds.): Advanced Coating Materials. Scrivener Publishing LLC, Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA, USA, 2019, 523p.
6. ГОСТ 9.072-2017 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия лакокрасочные. Термины и определения.
7. Nanocoating Market Report: Trends, Forecast and Competitive Analysis. Research and Markets. Lucintel. January 2018, 59 p.
8. Global Nanocoatings for Building and Construction Market Report 2020. Market.US. 2020, 138p.
9. Construction Paints and Coatings Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2013–2019. Transparency Market Research, NY, 2013.
10. Wang Z., Han E., Ke W., Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame-retardant coating. Prog. Org. Coat., 53(1), 2005, pp. 29–37.
11. Wang Z., Han E., Ke W., An investigation into fire protection and water resistance of intumescent nano-coatings. Surf. Coat Tech., 201(3), 2006, pp. 1528–1535.
12. Wang Z., Han E., Liu F., Ke W., Fire and corrosion resistances of intumescent nano-coating containing nano-SiO₂ in salt spray condition. J Mat Sci Tech, 26(1), 2010, 75–81.
13. Barna E., Bommer B., Kysteiner J., Vital A., et al., Innovative, scratch proof nanocomposites for clear coatings. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 36(4), 2005, 473–480.
14. Quagliarini E., Bondioli F., Goffredo G.B., Licciulli A., Munafò P., Smart surfaces for architectural heritage: preliminary results about the application of TiO₂-based coatings on travertine. J. Cult. Heritage, 13(2), 2012, 204–209.
15. Quagliarini E., Bondioli F., Goffredo G.B., Cordoni C., Munafò P., Self-cleaning and de-polluting stone surfaces: TiO₂ nanoparticles for limestone. Const. Build. Mat., 37, 2012, 51–57.
16. Munafò P., Quagliarini E., Goffredo G. B., Bondioli F., Licciulli A., Durability of nano-engineered TiO₂ self-cleaning treatments on limestone. Const. Build. Mat., 65, 2014, 218–231.
17. Rabea A.M., Mohseni M., Mirabedini S.M., Tabatabaei M.H., Surface analysis and anti-graffiti behavior of a weathered polyurethane-based coating embedded with hydrophobic nanosilica. Appl. Surf. Sci., 258(10), 2012, 4391–4396.
18. Montemor M.F., Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances, Surf. Coat Tech., 258, 2014, 17–37.
19. Koch K., Ensikat H. J. The hydrophobic coatings of plant surfaces: epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly, Micron, 39(7), 2008, 759–772.
20. Kumar D., Wu X., Fu Q., J.W.C. Ho, Kanhere P.D., Li L., Chen Z., Hydrophobic sol–gel coatings based on polydimethylsiloxane for self-cleaning applications, Mat. Design, 86, 2015, 855–862.
21. Caldarelli A., Raimondo M., Veronesi F., Boveri G., Guarini G., Sol–gel route for the building up of superhydrophobic nanostructured hybrid-coatings on copper surfaces, Surf. Coat Tech., 276, 2015, 408–415.
22. Wang H., Chen E., Jia X., Liang L., Wang Q., Superhydrophobic coatings fabricated with polytetrafluoroethylene and SiO₂ nanoparticles by spraying process on carbon steel surfaces. Appl. Surf. Sci., 2015, 349; pp. 724–732.
23. Nakajima A., Miyamoto T., Sakai M., Isobe T., Matsushita S., Comparative study of the impact and sliding behavior of water droplets on two different hydrophobic silane coatings. Appl. Surf. Sci., 292, 2014, 990–996.
24. Lafuma A., Quéré D. Superhydrophobic states, Nat. Mat., 2(7), 2003, 457–460.
25. Muzenski, S., Flores-Vivian, I., Sobolev, K. Hydrophobic engineered cementitious composites for highway applications. Cement and Concrete Composites, 2015; v. 57, pp. 68–74.

26. Фаликман В.Р., Соболев К.Г. «Простор за пределом», или как нанотехнологии могут изменить мир бетона // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. – М. – 2011. – № 1. – С. 21–33. – Гос. регистр. № 0421100108. – URL: <http://www.nanobuild.ru> (дата обращения: 15.01.2021).
27. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Фотокаталитически активные строительные материалы с наночастицами диоксида титана – новая концепция улучшения экологии мегаполисов // Сборник докладов участников круглого стола «Вопросы применения нанотехнологий в строительстве» – М.: МГСУ, 2009. – С. 35–49.
28. Karlessi T., Santamouris M., Synnefa A., Assimakopoulos D., Didaskalopoulos P., Apostolakis K., Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. *Buil. Env.*, 46(3), 2011, 570–576.
29. Memon S.A., Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renew Sust. Ener. Rev.*, 31, 2014, 870–906.
30. Ismail K.A., Salinas C.T., Henriquez J.R., Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Ener. Build.*, 40(5), 2008, 710–719.
31. Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Reinders A.H.M.E., Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Sol. Ener.*, 85(5), 2011, 1007–1020.
32. Deb S.K., Opportunities and challenges in science and technology of WO₃ for electrochromic and related applications, *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.*, 92(2), 2008, 245–258.
33. Granqvist C.G., Lanseker P.C., Mlyuka N.R., Niklasson G.A., Avendano E., Progress in chromogenics: new results for electrochromic and thermochromic materials and devices, *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.*, 93(12), 2009, 2032–2039.
34. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review, *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.*, 94(2), 2010, 87–105.
35. Granqvist C.G., Oxide electrochromics: Why, how, and whither, *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.*, 92(2), 2008, 203–208.
36. Jayaweera P.M., Kumarasinghe A.R., Tennakone K., Nano-porous TiO₂ photovoltaic cells sensitized with metallochromic triphenylmethane dyes: [n-TiO₂/triphenylmethane dye/pI-/I3-(or CuI)], *J. Photochem. Photobio (A: Chemistry)*, 126(1), 1999, 111–115.
37. Photovoltaic (PV) system, Retrieve Sep 6, 2015, <http://www.sandiego.gov/development-services/graphics/components.jpg>.
38. Patel Abhiyan S., Hiren A.R., Sharma D.N., An overview on application of Nanotechnology in construction industry. *Int. J. Innov. Res.Sci. Eng. and Tech.*, 2(11), 2013. pp. 6094–6098.
39. Whitesides G.M., Grzybowski B., Self-assembly at all scales. *Science*, 295(5564), 2002, 2418–2421.
40. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – № 3. – С. 6–21.
41. Figovsky O., Shapovalov L., Buslov F., Blank N. Nanostructured Hybrid Nonisocyanate Polyurethane Coatings // International Conference «Nano and Hybrid Nonisocyanate Polyurethane Coatings». Manchester, UK. 2005. P. 4/1–4/10.
42. Blank N., Figovsky O. Epoxy-Rubber Coatings with Nanoheterogenic Structure. *Paint Industry (in Russian)*. Moscow. 2009. № 10. P. 14–16.
43. Гусев Б.В., Фаликман В.Р., Лайстнер Ш. и др. Отраслевое технологическое исследование «Развитие российского рынка нанотехнологических продуктов в строительной отрасли до 2020 года». Часть 2 Анализ мирового рынка // Нанотехнологии в строительстве. – 2013. – Том 5, № 2. – С. 6–20. – URL: http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_2_2013.pdf.
44. Гусев Б.В., Фаликман В.Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // ПГС. – 2016. – № 2. – С. 30 – 38.
45. Фаликман В.Р. GLOBE – новая инициатива профильных международных организаций в области устойчивого строительства // Бетон и железобетон. – 2020. – № 2 (602). – С. 3–7.
46. Wiesner, M. R., Bottero, J. Y. *Environmental nanotechnology. Applications and Impacts of Nanomaterials*, 2007. pp. 395–517.
47. Calkins M., *Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction materials*, John Wiley & Sons, 2008.
48. Aschberger K., Micheletti C., Sokull-Klyttgen B., Christensen F.M., Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health-lessons learned from four case studies, *Env. Int.*, 37(6), 2011, 1143–1156.
49. Hester R.E., Harrison R.M. (Eds.), *Nanotechnology: Consequences for human health and the environment (Vol. 24)*. Royal Society of Chemistry, 2007.
50. Nowack B., Bucheli T.D. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment, *Env. Pollut.*, 150(1), 2007, 5–22.
51. Upadhyayula V.K., Meyer D.E., Curran M.A., Gonzalez M.A. Life cycle assessment as a tool to enhance the environmental performance of carbon nanotube products: a review, *J. Clean Prod.*, 26, 2012, 37–47.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фаликман Вячеслав Рувимович, доктор материаловедения, руководитель Центра научно-технического сопровождения сложных объектов строительства Научно-исследовательского института бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ), глава российской Национальной делегации в ФИБ, Почетный пожизненный член ФИБ, региональный представитель RILEM в Восточной Европе и Центральной Азии, национальный делегат RILEM, Почетный член RILEM, член Американского института бетона. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6232-9862>; e-mail: vfalikman@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 22.01.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 05.02.2021.

Статья принята к публикации: 07.02.2021.