

УДК 665.775.4 : 625.85

## НАНОТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д.  
ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет»,  
Ярославль, e-mail: gotovtsev\_ym@mail.ru

Проведен анализ литературных и интернет-источников по вопросам использования нанотехнологий в производстве асфальтобетонных покрытий. Приведены существующие классификации наночастиц и наноматериалов на их основе. Показаны примеры использования наноматериалов в производстве асфальтобетона. Проведена оценка экономической эффективности используемых методов наномодифицирования асфальтобетонов. Отмечено, что основным достоинством рассмотренных методов модификации является возможность получения материала с использованием традиционной технологии производства асфальтобетонной смеси. Приведены основные критерии, определяющие принадлежность той или иной технологии к области нанотехнологий. Показана возможность получения результатов, достигаемых при наномодифицировании материала, путем структурирования битума в асфальтобетоне без использования модификаторов. Установлено, что эффект структурирования достигается при толщинах пленок битума в композите порядка 100 нм, что является основанием для отнесения эффекта структурирования к разряду наноэффектов.

**Ключевые слова:** нанотехнология, наночастица, модификация материала, структурирование

## NANOTECHNOLOGIES IN ASPHALT CONCRETE PROCESSING

Gotovtsev V.M., Shatunov A.G., Rummyantsev A.N., Sukhov V.D.  
Yaroslavl state technical university, Yaroslavl, e-mail: gotovtsev\_ym@mail.ru

In this study, literary and internet sources concerning nanotechnologies use in asphalt concrete coatings manufacturing were analyzed. The existing classifications of nanoparticles and nanomaterials based on those were cited. The examples of nanomaterials use in concrete asphalt manufacturing were shown. The economical efficiency evaluation of the used asphalt concrete nanomodification methods was carried out. It was indicated that the main advantage of the examined modification methods is the possibility of obtaining the material using traditional asphalt concrete manufacturing technology. The basic criteria which define if this or that technology belongs to the area of nanotechnologies were cited. There was shown the possibility of getting the results like those gotten by material nanomodifying, by bitumen structuring in asphalt concrete without using any modifiers. It was stated that the structuring effect can be obtained with bitumen film thickness about 100 nm in composite, which allows considering the structuring effect as a nanoeffect.

**Keywords:** nanotechnology, nanoparticle, material modification, structuring

Целью настоящей работы является анализ литературных и интернет-источников по вопросам использования нанотехнологий в производстве строительных материалов, в частности, асфальтобетона. В настоящее время принадлежность той или иной новой технологии к классу нанотехнологий имеет немаловажное значение для ее продвижения и дальнейшего развития. В связи с этим назрела необходимость в систематизации известных знаний по нанотехнологиям, используемым в производстве строительных материалов.

Начнем с трактовки понятия «нанотехнология» [1]. На сегодняшний день в мире нет стандарта, описывающего, что такое нанотехнологии и нанопродукция. В Еврокомиссии создана специальная группа для разработки классификации нанопродукции.

1. В ISO/TK 229 под нанотехнологиями подразумевается следующее:

– знание и управление процессами, как правило, в масштабе 1 нм, но не исключаяющее масштаб менее 100 нм в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений;

– использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти свойства.

2. Согласно «Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года» нанотехнология определяется как совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие *принципиально новые качества*, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

Современная тенденция к миниатюризации показала, что вещество может иметь совершенно новые свойства, если взять очень маленькую частицу этого вещества. Частицы размерами от 1 до 100 нанометров обычно называют «наночастицами». Так,

например, оказалось, что наночастицы некоторых материалов имеют очень хорошие каталитические и адсорбционные свойства. Тщательно очищенные наночастицы могут самовыстраиваться в определённые структуры. Такая структура содержит строго упорядоченные наночастицы и также зачастую проявляет необычные свойства.

Нанообъекты делятся на 3 основных класса:

1) трёхмерные частицы, получаемые взрывом проводников, плазменным синтезом, восстановлением тонких плёнок и т.д.;

2) двумерные объекты – плёнки, получаемые методами молекулярного наслаивания, CVD, ALD, методом ионного наслаивания и т.д.;

3) одномерные объекты – висеры, получаемые методом молекулярного наслаивания, введении веществ в цилиндрические микропоры и т.д.

Также существуют нанокompозиты – материалы, полученные введением наночастиц в какие-либо матрицы.

Одним из важнейших вопросов, стоящих перед нанотехнологией – как заставить молекулы группироваться определённым способом, самоорганизовываться, чтобы в итоге получить новые материалы или устройства. Этой проблемой занимается раздел химии – супрамолекулярная химия, изучающая взаимодействия между молекулами, которые способны упорядочить молекулы определённым способом, создавая новые вещества и материалы.

Материалы, разработанные на основе наночастиц, подразделяются исходя из их микроскопических размеров на следующие виды:

1) углеродные нанотрубки – протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов);

2) фуллерены – молекулярные соединения, представляющие собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из чётного числа трёхкоординированных атомов углерода;

3) графен – монослой атомов углерода.

Основными продуктами нанотехнологии в России и других странах в настоящее время являются нанопорошки и наночастицы [8], различающиеся размерами, формой и специфическими свойствами. Они могут выполнять роль адсорбентов, катализаторов и модификаторов химических реакций, технологических и конструктивных свойств изготавливаемых с их применением материалов. Улучшение свойств материа-

лов, наблюдаемое при использовании нанопорошков и наночастиц, связано с физико-химическими процессами и явлениями, происходящими на поверхности взаимодействующих фаз.

В последние годы активно проводятся работы по использованию нанотехнологий в производстве строительных материалов. Однако в отечественном научном сообществе распространено мнение, что строительное материаловедение непосредственно не связано ни с «нанодисциплинами», ни с созданием наноструктурированных материалов. Считается, что принадлежностью к нанотехнологиям обладают «более фундаментальные» научные области. Применение нанотехнологий при производстве строительных материалов – это новый подход к выбору сырья, технологий, формированию структуры строительных композитов [8].

Стратегическое значение в условиях современной России имеет производство асфальтобетонных дорожных покрытий, отвечающих требованиям сегодняшнего дня. В условиях резко возросшей интенсивности движения автомобильного транспорта, глобальных изменений климата ужесточаются требования к качеству дорожных покрытий. Одним из способов решения этой проблемы является использование нанотехнологий в производстве асфальтобетона. Асфальтобетон представляет собой композиционный материал, основу которого составляют минеральные частицы разных размеров, связанные битумом, свойствами которого определяется большинство физико-механических показателей материала. Содержание каждого из компонентов асфальтобетонной смеси жестко нормируется требованиями ГОСТ в зависимости от условий работы дорожного покрытия. Содержание битума, как правило, не превышает 10% от массы материала.

Битум, выпускаемый отечественными предприятиями, обладает рядом существенных недостатков: слишком узким интервалом пластичности и слишком низким комплексом основных свойств, необходимых для создания высококачественных покрытий, особенно при температурах ниже нуля. В связи с этим возникает настоятельная потребность в улучшении свойств битума путем введения в него модифицирующих добавок [6].

Механизм действия модификаторов состоит в связывании длинномерных молекул битума с образованием прочной пространственной сетки. В качестве связующих элементов могут быть использованы различные материалы, в том числе и наночастицы. Характер сил, формирующих про-

странственную сетку из молекул битума, до настоящего времени не изучен. Предполагается, что при введении модификатора в матрицу реализуется специфический физико-химический процесс трансформации поверхностной энергии частиц модификатора, приводящий к упорядочению и упрочнению модифицируемой матрицы [3].

Судя по количеству публикаций и их содержанию, наиболее успешно в настоящее время развивается технология производства асфальтобетонных смесей с использованием модификатора «Унирем». Модификатор асфальтобетонов «Унирем» представляет собой сыпучий композиционный материал на основе активного порошка дискретно девулканизированной резины, получаемого методом высокотемпературного сдвигового измельчения из отработанных автопокрышек отечественного производства [9]. Модификатор «Унирем» не требует предварительного подогрева и вводится в смеситель асфальтобетонной смеси одновременно с битумом или сразу же после введения битума.

При производстве модификатора «УНИРЕМ» применяется метод высокотемпературного сдвигового измельчения. Его суть заключается в использовании сразу трех физических воздействий на резиновую крошку – давления, высокой температуры и деформации. После спекания структура частиц приобретает вид коралловых полипов, которые скрепляют своими лепестковыми молекулами обычный битумный состав до необычного состояния. Благодаря наночастицам происходит замедление расслоения битума при сильных нагрузках и перепадах температур. В результате удается не только получить резиновый порошок достаточно мелких размеров, но и добиться значительного увеличения удельной поверхности частиц по сравнению с другими методами. Поэтому при применении активного резинового порошка во время приготовления асфальтобетонных смесей образуется резинобитумное вяжущее, структурированное на микро- и наноуровне. При применении порошка не нужно менять технологию производства асфальта, температурные и временные режимы или использовать какие-то дополнительные материалы.

Дорожные покрытия, модифицированные «Униремом», относятся к материалам с повышенными эксплуатационными характеристиками. Производство модификатора связано с решением глобальной экологической проблемы – утилизацией изношенных автомобильных покрышек.

Рассмотрим экономическую сторону внедрения модификатора. В работе [5] приводится цена модификатора, которая

составляет 110–120 рублей за килограмм продукта. Количество модификатора «Унирем», вводимое в асфальтобетон, составляет 10% от содержания битума. При этом декларируется подорожание дорожного покрытия при использовании модификатора на 6%. Проведем простой расчет. Содержание битума в асфальтобетонной смеси по требованиям ГОСТ составляет в среднем 6%. Таким образом, для производства 1 т асфальтобетонной смеси требуется 60 кг битума и соответственно 6 кг «Унирема», стоимостью примерно в 700 руб. Средняя цена асфальтобетонной смеси составляет 2500 руб. за тонну [7], т.е. реальное удорожание составляет 28%.

Компания «Перспективные технологии» осуществляет разработки в области микрореакторной универсальной технологии углеродных нанотрубок, фуллеренов, наноалмазов, графенов, наночастиц металлов, их оксидных соединений, наночастиц карбидов, нитридов и т.п. [4]. Важнейшей отличительной особенностью этой технологии является непосредственное поглощение наночастиц практически в момент их образования специально разработанными жидкими органическими средами, которые препятствуют их агрегации в течение длительного времени – более полугода. При наномодифицировании эффект упрочнения достигается при концентрациях нанодобавок в сотые и тысячные доли массового процента. При этом кардинальным образом улучшаются потребительские свойства материалов. Базовый продукт ArgmCap, содержащий многостенные углеродные нанотрубки и наноалмазы в настоящее время используется для получения наномодификатора ArgmBit для битумов и асфальтобетонов.

В таблице приводятся физико-механические показатели немодифицированного и наномодифицированного асфальтобетонов.

Концентрация наномодификатора ArgmBit в битуме – 0,005 масс. %;  $R_{20}$  и  $R_{50}$  – пределы прочности на сжатие при 20 и 50 °С соответственно.

Как видно из таблицы, модифицированный асфальтобетон имеет несколько более высокие показатели в сравнении с требованиями ГОСТ, при этом добавочная стоимость при применении наномодификатора составляет 350 рублей на тонну битума, что значительно ниже увеличения стоимости асфальтобетона в сравнении с модификатором «Унирем».

Достоинством рассмотренных способов модификации битума в асфальтобетоне является возможность их внедрения без изменения требований ГОСТ на состав асфальтобетонной смеси и технологии ее

производства. Модификаторы выступают в роли заменителя части битума в асфальтобетоне при неизменном его содержании в материале, что не требует пересмотра нормативных документов. При стоимости модификатора ниже стоимости битума за-

мена части битума модификатором является экономически обоснованной. В противном случае использование модификаторов связано с удорожанием асфальтобетонной смеси, а значит, и дорожного покрытия в целом.

| Наименование позиции             | Наименование показателей            |                           |                       |                       |                           |                             |                                |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                                  | Средняя плотность г/см <sup>3</sup> | Водонасыщение, % по массе | R <sub>т0,2</sub> МПа | R <sub>с0,2</sub> МПа | Коэффициент водостойкости | Сдвиговая устойчивость tg φ | Сцепление при сдвиге при 50 °С |
| Немодифицированный асфальтобетон | 2,33                                | 2,4                       | 3,1                   | 1,1                   | 0,93                      | –                           | –                              |
| Модифицированный асфальтобетон   | 2,49                                | 2,5                       | 4,2                   | 2,3                   | 1,00                      | 0,87                        | 0,35                           |
| Требования ГОСТ 9128-97          | –                                   | 2,0–5,0                   | ≥ 2,8                 | ≥ 1,0                 | ≥ 0,90                    | ≥ 0,87                      | ≥ 0,25                         |

Результатом воздействия наномодификаторов является повышение технических и эксплуатационных свойств асфальтобетона. Такой же эффект достигается при структурировании асфальтовяжущего [2]. В этом случае эффект достигается уменьшением содержания битума в асфальтобетонной смеси при упорядоченном расположении частиц минерального порошка в асфальтовяжущем. В отличие от модификации асфальтобетона, где происходит самоорганизация структуры вследствие введения модификаторов, при структурировании асфальтовяжущего упорядочение структуры реализуется путем механического воздействия на частицы материала в процессе окатывания гранул.

В заключение отметим, что технология структурирования асфальтовяжущего является принципиально новой для производства асфальтобетона. Ее внедрение требует пересмотра требований к асфальтобетону и технологии его производства. Однако снижение себестоимости материала на 30–40% может быть весомым основанием для продолжения работ в этом направлении. Снижение стоимости обусловлено уменьшением содержания битума в асфальтобетонной смеси, а также возможностью использования вместо дорогостоящих каменных материалов различных отходов производства и местных минеральных материалов. Кроме того, возможность заготовки гранулированных продуктов впрок, возможность круглогодичной работы асфальтобетонных заводов с увеличением числа рабочих мест, возможность холодной укладки асфальтобетонной смеси в дорожное полотно дополняют достоинства нового материала.

О возможности включения технологии структурирования асфальтовяжущего

в класс нанотехнологий отметим следующее. В соответствии с приведенной выше классификацией ограничительным фактором при решении этого вопроса является размер объекта, формирующего новые свойства материала. В рассматриваемой технологии таким объектом является битумная пленка в асфальтовяжущем между частицами минерального порошка, а контролируемым параметром – толщина этой пленки. Прямое измерение этой величины весьма проблематично. Однако можно воспользоваться соображениями, позволяющими оценить порядок этой величины. Удельная поверхность минеральных порошков, вырабатываемых отечественными предприятиями, составляет в среднем 300–350 м<sup>2</sup>/кг [10]. Тогда можно определить толщину битумной пленки, необходимой для распределения 13% битума в массе асфальтовяжущего. Процентное содержание битума взято в соответствии с данными, приведенными в работе [2]. Проведя простой расчет, получим оценку порядка 1<sup>-7</sup> м, т.е. 100 нм.

Таким образом, поверхностный слой веществ – особая поверхностная фаза толщиной в несколько нанометров. По этому показателю его можно было бы отнести к наноструктурам. Однако типичными наноструктурами принято считать только обособленные тела – нити, ленты, пленки трубки такой же толщины. Поверхностный слой только с одной стороны имеет межфазовую границу, отделяющую его от других веществ. Поэтому поверхностный слой является особой поверхностной фазой вещества, но не типичной наноструктурой.

Отметим, что окончательное решение об отнесении рассмотренной технологии к классу нанотехнологий не входит в компетенцию авторов и, на наш взгляд, не является принципиальным вопросом.

**Список литературы**

1. Википедия. [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Нанотехнология#> (дата обращения 11.10.2011).
2. Технология получения структурированного асфальтобетона / В.М. Готовцев, А.Г. Шатунов, А.Н. Румянцев, В.Д. Сухов // *Фундаментальные исследования*.
3. ЗАО «Перспективные технологии»/ Федеральный интернет-портал «Нанотехнологии и наноматериалы» 24.09.2011. [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.portalnano.ru/rubricator/jump.php?id\\_document=690](http://www.portalnano.ru/rubricator/jump.php?id_document=690). (дата обращения: 11.10.2011).
4. ЗАО «Перспективные технологии». Федеральный интернет портал «Нанотехнологии и наноматериалы». – URL: <http://www.portalnano.ru/read/iInfrastructure/russia/nns/persptech> (дата обращения: 11.10.2011).
5. Перспективы «Унирема». [Электронный ресурс] [http://www.polymer.ru/letter.php?n\\_id=4836](http://www.polymer.ru/letter.php?n_id=4836).
6. Помогут ли нанотехнологии решить проблему русских дорог: научно-информационный портал по нанотехнологиям. [Электронный ресурс]. – 2009. – 28 сентября. – URL: [http://nano-info.ru/post/nanoasfalt\\_na\\_russkih\\_dorogah](http://nano-info.ru/post/nanoasfalt_na_russkih_dorogah) (дата обращения: 11.10.2011).
7. Прайс лист на смеси асфальтобетонные. – URL: [http://euroasfalt.geragroup.ru/prays-list\\_na\\_asfaltob](http://euroasfalt.geragroup.ru/prays-list_na_asfaltob) (дата обращения: 11.10.2011).
8. Строкова В.В. От атомов до городов // *Российские нанотехнологии*. [Электронный ресурс]. – 2010. – № 1–2. – URL: <http://podclub.ru/ot-atomov-do-gorodov/> (дата обращения 11.10.2011).
9. «Унирем» – модификатор асфальтобетонных смесей. [Электронный ресурс]. – URL: [http://europolimers.ru/unirem\\_-\\_modifikator\\_asfaltobeton](http://europolimers.ru/unirem_-_modifikator_asfaltobeton) (дата обращения: 11.10.2011).
10. HTML-версия документа от 06.09.2011 [21:18:42]. – URL: <http://abiturient.ncstu.ru/Science/articles/ns/07/21.pdf/fil> (дата обращения: 11.10.2011).

**References**

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology> (date: 11.10.2011).

2. Gotovcev V.M., Shatunov A.G., Rumyantsev A.N., Suhov V.D. Structuring asphalt concrete production technology // *Fundamental Research*.
3. ЗАО «Perspektivnye tehnologii»/ Federalnyj internet-portal «Nanotehnologii i nano materialy», 24.09.2011., URL: [http://www.portalnano.ru/rubricator/jump.php?id\\_document=690](http://www.portalnano.ru/rubricator/jump.php?id_document=690). (date: 11.10.2011).
4. ЗАО «Perspektivnye tehnologii»/ Federalnyj internet-portal «Nanotehnologii i nano materialy», URL: <http://www.portalnano.ru/read/iInfrastructure/russia/nns/persptech> (date: 11.10.2011).
5. Perspektivy «Unirema», [http://www.polymer.ru/letter.php?n\\_id=4836](http://www.polymer.ru/letter.php?n_id=4836).
6. Pomogut li nanotehnologii reshit problemu russkih dorog?: nauchno-informacionnyj portal po nanotehnologijam., 2009., 28 september., URL: [http://nano-info.ru/post/nanoasfalt\\_na\\_russkih\\_dorogah](http://nano-info.ru/post/nanoasfalt_na_russkih_dorogah) (date: 11.10.2011).
7. Prajs list na smesi asfaltobetonnye., URL: [http://euroasfalt.geragroup.ru/prays-list\\_na\\_asfaltob](http://euroasfalt.geragroup.ru/prays-list_na_asfaltob) (date: 11.10.2011).
8. Strokova V.V. Ot atomov do gorodov., Rossijskie nanotehnologii., 2010 no.№ 1-2., URL: <http://podclub.ru/ot-atomov-do-gorodov/> (date 11.10.2011).
9. «Unirem» – modifikator asfaltobetonnyh smesej., URL: [http://europolimers.ru/unirem\\_-\\_modifikator\\_asfaltobeton](http://europolimers.ru/unirem_-_modifikator_asfaltobeton) (date: 11.10.2011).
10. URL: <http://abiturient.ncstu.ru/Science/articles/ns/07/21.pdf/fil> (date: 11.10.2011).

**Рецензенты:**

Епархин О.М., д.т.н., профессор, директор Ярославского филиала ГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль;  
 Бачурин В.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры высшей и прикладной математики, Ярославский филиал ГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль.  
 Работа поступила в редакцию 06.09.2012.