



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu3.2015.1.10>

УДК 330.342.24

ББК 65.010.19

## УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

**Запороцкова Ирина Владимировна**

Доктор физико-математических наук, профессор,  
директор института приоритетных технологий,  
Волгоградский государственный университет  
[irinazaporotskova@gmail.com](mailto:irinazaporotskova@gmail.com), [ipriori@volsu.ru](mailto:ipriori@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Архарова Ирина Владимировна**

Аспирант кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
[sefm@volsu.ru](mailto:sefm@volsu.ru)  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** На основе анализа планов по развитию Волгоградской области в дорожно-транспортной сфере, предполагающих необходимость применения новых технологий, позволяющих создавать качественное дорожное покрытие, предлагается технология создания сверхпрочного дорожного покрытия с использованием углеродного наноматериала. Представлены основные принципы создания нового дорожного материала, полученного путем армирования битума углеродными нанотрубками.

**Ключевые слова:** углеродный наноматериал, углеродные нанотрубки, асфальтобетонные покрытия, армирование, допирование, физико-механические характеристики асфальтобетонов.

### Введение

Развитие фундаментальных и прикладных представлений о наноматериалах и нанотехнологиях уже в ближайшие годы приведет к кардинальным изменениям во многих сферах: материаловедении, энергетике, электронике, информатике, машиностроении, медицине, сельском хозяйстве, экологии. Не обойдет этот процесс и область строительства, и, в частности, дорожно-транспортную сферу.

В соответствии с положениями Федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России» [8] и «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» [7] одно из стратеги-

ческих пересечений национальных автомагистралей (транспортных коридоров) «Север-Юг» и «Запад-Восток» будет располагаться в районе Волгограда. Стратегическое пересечение международных транспортных коридоров в районе г. Волгограда даст толчок к устройству новых транспортно-коммуникационных объектов. Кроме того, перспективы проведения в Волгограде чемпионата мира по футболу в 2018 г. ставят в число первоочередных задач модернизацию имеющихся и строительство новых автомобильных дорог в городе и области.

Планируемое существенное развитие и модернизация дорог России и Волгоградского региона требует расширения направлений

научных исследований для дорожно-транспортного комплекса. Они должны быть направлены на развитие теории транспортных потоков, повышение безопасности движения и прежде всего на применение оригинальных методов развития и модернизации дорог, внедрение современных технологий и дорожно-строительных материалов. В Волгоградской области законодательно установлены правовые основы инновационной деятельности, что позволяет обеспечить условия для изменения структуры экономики с учетом внедрения новейших технологий. Это касается и сферы автодорожного комплекса. В 2020 г. Волгоградская область должна укрепить свои позиции как регион инновационных технологий. Волгоградская область должна стать достойной площадкой для продвижения и внедрения проектов, которые затем найдут применение в других субъектах Российской Федерации. За счет проведения эффективной политики Волгоградская область должна занять лидирующие позиции по инвестиционной и инновационной привлекательности с развитой многоотраслевой, сбалансированной экономикой, основу которой составят высокотехнологичные отрасли промышленности и сельского хозяйства, а также использование нанотехнологий в отраслях [6].

Свыше 280 км магистралей на территории Волгоградской области включено в трехлетний план (2015–2017 гг.) дорожного строительства, реконструкции и ремонта. На эти цели направят 18,6 млрд рублей. Таких масштабных дорожных работ в последние годы на территории города и области не проводилось. В декабре 2014 г. была сформирована стратегия развития дорожной инфраструктуры на ближайшую перспективу. В этот план включены все основные магистрали города и области. Так, в период с 2015 по 2017 г. планируется построить 120 км новых дорог, 11 – полностью модернизировать и 156 – охватить капитальным ремонтом. В перечень вошли все объекты Волгограда, предусмотренные программой подготовки к Чемпионату мира по футболу. В планах по областным магистралям предусмотрено два главных направления работы. Первое – прокладка подъездных путей к отдаленным селам. За счет федеральной программы и региональной поддержки за три года будет

построено 33 таких объекта протяженностью 108 км. Другим приоритетом станет ремонт областных трасс – за счет регионального дорожного фонда к 2017 г. в порядок приведут 79 км автомагистралей [6].

Для того чтобы реализовать намеченные планы, в дорожном строительстве необходимо применять новые технологии, позволяющие создавать качественное дорожное покрытие. Экономика требует появления новых материалов в этой отрасли с новыми повышенными физико-механическими свойствами. Нами разработана технология создания сверхпрочного дорожного покрытия с использованием углеродного наноматериала. В данной статье представлены основные принципы создания нового дорожного материала.

#### **Основные принципы технологии создания сверхпрочного дорожного покрытия**

На сегодняшний день в дорожном строительстве используют несколько типовых конструкций дорожных одежд, представленных на рисунке.

Асфальтобетонные покрытия в зависимости от типа оснований и требований движения устраивают в один, два или три слоя. Верхний слой должен обладать прочностью, износоустойчивостью и водонепроницаемостью. Этим условиям соответствуют мелкозернистые и песчаные смеси, содержащие минеральный порошок. Каждая асфальтобетонная смесь включает в себя минеральные составляющие (щебень, песок) и органические вяжущие составляющие (битум). Составляющие асфальтобетонной смеси перемешиваются в нагретом состоянии. Иногда в состав асфальтобетонной массы одновременно с битумом вводят поверхностно-активную добавку или наполнители. Добавки представляют собой органические и неорганические вещества или их комплексы, за счет введения которых в состав асфальтобетонной смеси направленно и контролируемо регулируются свойства смеси. Добавки применяются для снижения затрат на строительство (в том числе экономии цемента), модификации качественных и функциональных характеристик асфальтовых покрытий.

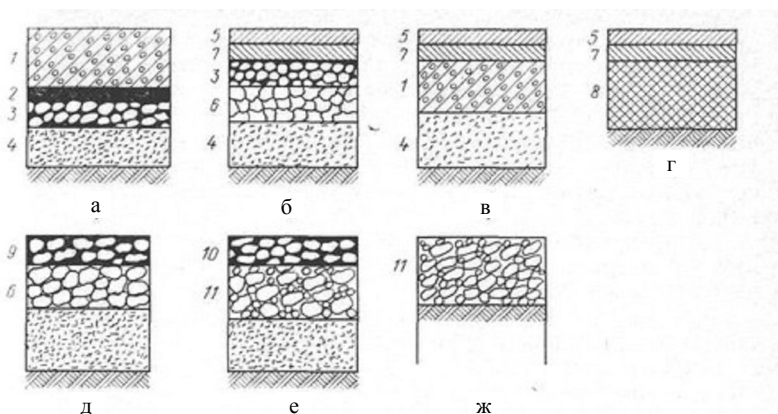


Рисунок. Типовые конструкции дорожных одежд:

*a* – цементобетонное покрытие; *б* – асфальтобетонное покрытие на щебеночном основании; *в* – асфальтобетонное покрытие на бетонном основании; *г* – асфальтобетонное покрытие на грунте, укрепленное цементом; *д* – щебеночное покрытие с верхним слоем, обработанным методом пропитки; *е* – гравийное покрытие, обработанное битумом методом перемешивания на дороге; *ж* – гравийное покрытие на дороге низкой категории; *1* – цементный бетон; *2* – выравнивающий слой из песка, обработанного битумом; *3* – слой щебня, гравия или грунта, обработанного вяжущим; *4* – морозозащитный слой из песка; *5* – мелкозернистый асфальтобетон; *6* – слой щебня; *7* – крупнозернистый асфальтобетон; *8* – грунт, укрепленный цементом; *9* – щебень, обработанный пропиткой; *10* – гравий, обработанный битумом; *11* – гравий

*Примечание.* Составлено по: [1].

Реальные свойства асфальтобетона не остаются постоянными, так как внешние условия могут быстро изменяться, а вместе с ними должны изменяться и свойства покрытия из асфальтового бетона. При обычной температуре (20–25 °С) четко проявляются упруго- и эластично-вязкие его свойства, при повышенных температурах – вязкопластичные, а при пониженных, отрицательных температурах асфальтобетон становится упруго-хрупким телом. Но он чувствительно реагирует не только на колебания температуры, но также на изменение скорости приложения механических усилий (нагрузки) или скорости деформирования. Чем выше значения скорости, тем при более высоких напряжениях разрушается асфальтобетон.

В производственных работах обычно механическую прочность асфальтобетона характеризуют пределом прочности при сжатии образцов, испытанных при заданных температуре и скорости приложения нагрузки. При температуре 20 °С предел прочности при сжатии асфальтобетона составляет около 2,5 МПа, а при растяжении – в 6–8 раз меньше. С понижением температуры предел прочности при сжатии возрастает (до 15–20 МПа при –15 °С), а с повышением – снижается (до 1,0–1,2 МПа при +50 °С).

Получение асфальтобетонов нового поколения невозможно без применения качественного, высокопрочного и однородного по свойствам вяжущего, без внедрения эффективных технологических решений, без использования специальных добавок для модификации асфальтобетонных смесей.

Анализ общих сведений об асфальтобетонах и знания об упрочняющих характеристиках углеродных нанотрубок – уникального материала нанотехнологий – позволили предположить, что углеродные нанотрубчатые материалы могут быть использованы для улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетонов, причем возможно осуществлять присадки нанотрубок как в горячий, так и в холодный битум.

Введение углеродных нанотрубок [6–9] в жидкий битум существенно повышает прочность и упругость получаемого асфальтового покрытия [2–4; 9]. Экспериментально установлено, что даже незначительные (0,005 % по массе) добавки углеродных нанотрубок увеличивают прочность битума при сжатии, что определяется по глубине вдавливания штампа в образцы. Важнейшим условием прочности и долговечности асфальтобетона является сцепление битума с поверхностью песка. Поскольку пески преимущественно кварце-

вые, а адгезия битума к поверхности кварцевых зерен недостаточна, то нанотрубки, обладающие исключительно высокими адгезионными свойствами, обеспечат прочное сцепление битума с песком.

Способ упрочнения асфальтового дорожного покрытия углеродным наноматериалом осуществляется следующим образом [5]. За основу берут известный способ приготовления асфальтобетонной смеси по ГОСТ 9128-84 [1]. Смесь готовят смешением в нагретом состоянии щебня, природного дробленого песка, минерального порошка и нефтяного дорожного битума, взятых в соотношениях, определяемых требованиями указанного стандарта. При этом основным компонентом смеси является битум. Битумные вяжущие материалы, как правило, являются практически отходами процесса нефтепереработки. Поэтому важнейшей задачей модификации таких битумов становится улучшение их физико-механических и химических свойств. Для повышения долговечности и качества таких материалов используют введение в их состав различного рода добавок, позволяющих улучшить присущие битумам свойства и модифицировать их в необходимом для практики направлении. В предлагаемом способе это достигается добавлением в нефтяной битум углеродного наноматериала (однослойных и многослойных углеродных нанотрубок) и их совместным структурированием.

Уникальные углеродные нанотрубки представляют собой полые трубки из одного или нескольких слоев, выполненных из атомов углерода, с диаметром от одного до нескольких нанометров и длиной до нескольких микрометров. Таким образом, они, по сути, являются полыми волокнами, имеющими высочайшую прочность и абсолютную инертность по отношению к любым кислотам и щелочам. Углеродные нанотрубки имеют высокие модуль линейной упругости, прочность на разрыв, коэффициент теплопроводности (удельная прочность на растяжение – более  $24 \cdot 10^4$  МПа). Использование углеродных нанотрубок в качестве допирующего (армирующего) элемента позволяет создать новый композитный материал, обладающий уникальными свойствами и характеристиками, которые обеспечат его использование при

производстве высококачественных и надежных в эксплуатации систем и материалов. Углеродные нанотрубки, обладающие рекордными механическими характеристиками, рассматриваются как эффективное средство повышения прочностных свойств композитных полимерных материалов. Введенные в асфальтобетонную смесь, нанотрубки ее армируют, превращая в композиционный материал. Нанотрубки ведут себя как «зародыши» кристаллов, но поскольку они имеют не точечную, а протяженную форму, кристаллы образуются вытянутые. Разрастаясь, кристаллы переплетаются, частично прорастают друг в друга и образуют пространственную сеть, пронизывающую и связывающую в единое целое всю асфальтобетонную смесь. Углеродные нанотрубки имеют чрезвычайно развитую поверхность: удельная поверхность материала нанотрубок достигает значений около  $600 \text{ м}^2/\text{г}$ . Столь высокая удельная поверхность, в несколько раз превышающая удельную поверхность лучших современных сорбентов, обеспечивает исключительно высокие адгезионные свойства углеродных нанотрубок, что также привлекательно при создании новых асфальтобетонных материалов, обладающих высоким средством к компонентам смеси. Проанализировав сведения об асфальтобетонах и знания об упрочняющих характеристиках углеродных нанотрубок, можно утверждать, что углеродные наноматериалы могут быть использованы для улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетонных смесей.

Для приготовления асфальтобетона был использован битум марки БНД 90/130. В качестве модификатора битума применялся углеродный наноматериал (УНМ) «Таунит» производства ООО «Нано Тех Центр» (г. Тамбов). Он представляет собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка черного цвета. Гранулы УНМ микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных углеродных нанотрубок. Количество вводимого углеродного наноматериала составляет 0,01–0,005 % от массы битума. Исследовалось поведение механических характеристик образца. Получение модифицированного битума осу-

шествлялось следующим образом. Битум нагревался до температуры 100 °С, затем в него добавляли необходимое количество УНМ и перемешивали в ультразвуковой мешалке в течение 6 часов для получения механически однородной смеси с равномерным распределением наноматериала. После этого битум в течение 10 часов охлаждали до окончания кристаллизации. Затем проводили испытания на механическую прочность на сжатие и изгиб. Проведенные исследования показали, что применение углеродного наноматериала приводит к повышению предела прочности при сжатии в 1,5–2 раза по сравнению с немодифицированным битумом. Предлагается использование полученного модифицированного углеродными нанотрубками битума для дальнейшего смешения с остальными компонентами асфальтобетонной смеси (щебень, песок) в миксере без изменения технологического процесса производства. Возможно введение углеродного наноматериала в процесс производства асфальтобетонных смесей на этапе механического перемешивания в миксере посредством одновременного внесения с жидким битумом в механический барабан, содержащий смесь песка и щебня. Повышенные прочностные свойства полученного модифицированного асфальтобетона в широком интервале температур могут предотвратить трещинообразование и повысить долговечность дорожного покрытия, что может компенсировать затраты на дополнительные технологические операции (добавление углеродного наноматериала в асфальтобетонную смесь). Полученный конечный материал – модифицированный асфальтобетон – обладает улучшенным комплексом прочностных свойств.

### Заключение

Полученные по предложенной методике составы связующих на основе битумов, модифицированных углеродным наноматериалом (углеродными нанотрубками), могут быть использованы при устройстве покрытий и оснований на автомобильных дорогах всех категорий во всех дорожно-климатических зонах России. Техническим результатом является повышение прочности

и упругости получаемого асфальтового покрытия, а также повышение водостойкости, теплостойкости и морозостойкости и расширение температурного диапазона его укладки в области отрицательных температур. Этот способ экономичен, эффективен и направлен на получение особо прочного материала, обладающего улучшенными физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. Его применение для автомобильных дорог дает экономическую выгоду в результате многократного увеличения срока службы дорожного покрытия без его ремонта и замены. Разработанная технология не требует приобретения дополнительного оборудования, так как углеродный наноматериал вводится в цикл производства асфальтобетонной смеси на этапе смешивания составляющих (щебень, песок, битум плюс углеродный наноматериал) в общем миксере. Снижение износа асфальтового покрытия, модифицированного углеродным наноматериалом, приведет к экономическому эффекту примерно в 600 млн руб. в год.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9128-84. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/3/3752/index.php](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/3/3752/index.php). – Загл. с экрана.
2. Дьячков, П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение / П. Н. Дьячков. – М.: Бинум, 2011. – 488 с.
3. Елецкий, А. В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 11. – С. 1191–1231.
4. Запороцкова, И. В. Углеродные и неуглеродные наноматериалы и композитные структуры на их основе: строение и электронные свойства / И. В. Запороцкова. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2009. – 469 с.
5. Пат. 2515007 С1 Российская Федерация. Способ упрочнения асфальтового дорожного покрытия углеродным наноматериалом / Запороцкова И. В., Сиплиный Б. Н. – Зарегистр. в Гос. реестре изобрет. РФ; опубл. 10.05.14, Бюл. № 13.
6. Портал Администрации Волгоградской области. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.volganet.ru>. – Загл. с экрана.

7. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=19188](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19188). – Загл. с экрана.

8. Федеральные целевые программы России. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://fcp.economy.gov.ru/>. – Загл. с экрана.

9. Харрис, П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века / П. Харрис. – М.: Техносфера, 2003. – 364 с.

## REFERENCES

1. GOST 9128-84. *Smesi asfaltobetonnye dorozhnye, aerodromnye i asfaltobeton* [GOST 9128-84. Asphalt Concrete Road, Airfield Mixtures and Asphalt Concrete]. Available at: [http://www.oхранatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/3/3752/index.php](http://www.oхранatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/3/3752/index.php).

2. Dyachkov P.N. *Uglerodnye nanotrubki: stroenie, svoystva, primeneniye* [Carbon Nanotubes: Structure, Properties, Application]. Moscow, Binom Publ., 2011. 488 p.

3. Eletskiy A.V. Sorbtionnye svoystva uglerodnykh nanostruktur [Sorption Properties of Carbon Nanostructures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2004, vol. 174, no. 11, pp. 1191-1231.

4. Zaporotskova I.V. *Uglerodnye i neuglerodnye nanomaterialy i kompozitnye struktury na ikh*

*osnove: stroenie i elektronnye svoystva* [Carbon and Non-Carbon Nanomaterials and Composite Structures Based on Them: the Structure and Electronic Properties]. Volgograd, Izd-vo VolGU, 2009. 469 p.

5. Zaporotskova I.V., Siplivyy B.N. *Pat. 2515007 C1 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob uprochneniya asfaltovogo dorozhnogo pokrytiya uglerodnym nanomaterialom* [Patent 2515007 C1 Russian Federation. The Method of Hardening the Asphalt Pavement by Carbon Nanomaterials]. Zaregistririvan v Gosudarstvennom reestre izobreteniy RF, opubl. 10.05.14, Byul. no. 13.

6. *Portal Administratsii Volgogradskoy oblasti* [The Portal of Volgograd Region Administration]. Available at: <http://www.volganet.ru>.

7. *Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda* [Transport Strategy of the Russian Federation for the Period Till 2030]. Available at: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=19188](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=19188).

8. *Federalnye tselevye programmy Rossii* [Russian Federal Target Programs]. Available at: <http://fcp.economy.gov.ru/>.

9. Kharris P. *Uglerodnye nanotruby i rodstvnyye struktury. Novye materialy XXI veka* [Carbon Nanotubes and Related Structures. New Materials of the 21<sup>st</sup> Century]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 364 p.

## CARBON NANOMATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION

**Zaporotskova Irina Vladimirovna**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Director of Institute of Priority Technologies, Volgograd State University  
[irinazaporotskova@gmail.com](mailto:irinazaporotskova@gmail.com), [priori@volsu.ru](mailto:priori@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Arkharova Irina Vladimirovna**

Postgraduate Student,  
Department of Forensic Expertise and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
[sefm@volsu.ru](mailto:sefm@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The requirement of developing and modernizing the roads in Russia and in the Volgograd region in particular, is based on need of expanding the directions of scientific research on road and transport complexes. They have to be aimed at the development of the theory of transport streams, traffic safety increase, and, first of all, at the application of original methods of road development and modernization, introduction of modern technologies and road-building materials. On the basis of the analysis of the plans for transportation sphere development in the Volgograd region assuming the need to apply the new technologies allowing to create

qualitative paving, the authors propose the technology of creating a heavy-duty paving with the use of carbon nanomaterial. The knowledge on strengthening the characteristics of carbon nanotubes is a unique material for nanotechnology development which allowed to assume the analysis of general information about asphalt concrete. The analysis showed that carbon nanotubes can be used for improvement of operational characteristics of asphalt concrete, and it is possible to carry out additives of nanotubes in hot as well as in cold bitumen. The article contains the basic principles of creation of the new road material received by means of bitumen reinforcing by carbon nanotubes. The structures received by the offered technique binding on the basis of the bitumens modified by carbon nanomaterial can be used for coverings and bases on highways of all categories in all road and climatic zones of Russia. The technical result consists in increasing the durability and elasticity of the received asphalt covering, and also the increase of water resistance, heat resistance and frost resistance, the expansion of temperature range of its laying in the field of negative temperatures.

**Key words:** carbon nanomaterial, carbon nanotubes, asphalt concrete coverings, reinforcing, doping, physical and mechanical characteristics of asphalt concrete.