Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 625.731.7

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-3-171-177

© Б. Н. Карпов, д-р техн. наук, профессор
© В. В. Гурьянова, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: kafedra-ad@yandex.ru, gurianova_vera@mail.ru

© B. N. Karpov, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. V. Gur'anova, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: kafedra-ad@yandex.ru, gurianova_vera@mail.ru

ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С БЕТОННЫМ СБОРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

THE OBJECTIVE OF INCREASING STABILITY OF PRECAST CONCRETE ROAD PAVEMENTS

Представлены направления по решению задач повышения устойчивости дорожных одежд со сборным бетонным покрытием. Рассмотрен опыт применения сборных покрытий в России и за рубежом; проведен анализ применения различных конструкций дорожных покрытий. Указаны достоинства и недостатки типовых решений дорожных одежд со сборным покрытием, а также особенности и требования к новым конструктивным решениям по повышению устойчивости. Сформулированы вопросы о необходимости совершенствования методов расчета конструкций со сборным покрытием. Делается вывод о том, что существующие сборные бетонные покрытия имеют ряд конструктивных недостатков, связанных с нерационально выбранными конструктивными элементами данного покрытия, и поставлен вопрос о необходимости проведения оптимизации конструктивно-технологических решений, показаны ее реальные возможные направления.

Ключевые слова: сборное дорожное покрытие, железобетонная плита, деформация сборного покрытия, устойчивость сборного бетонного покрытия, разрезы-швы, регулирование напряженно-деформированного состояния, оптимизация конструктивных решений.

The paper covers the main issues regarding the improvement of the stability of existing precast road pavement solutions. The authors consider the experience of using various road pavement designs in Russia and abroad. The merits and drawbacks of standard designs of road pavements with precast pavement are analyzed, and the characteristics and requirements for new design solutions with improved sustainability are listed. The methods of calculating designs with precast covering are discussed. A conclusion is made that the existing precast concrete pavement solutions have a number of drawbacks caused by irrationally selected composition of elements. The issue is set out regarding the need for optimization of the existing structural and technological designs, and possible research directions are shown.

Keywords: precast road pavement, reinforced concrete slab, deformation of precast road pavement, stability of precast road pavement, section-seams, regulation of stress-strain state, optimization of design solutions.

История использования плитных покрытий из натурального камня для укрепления поверхности полос движения людей и транспортных средств торгового и военного назначения, наряду с благоустройством городских территорий, в том числе для светских и сакральных шествий и собраний, уходит во времена еще до Римской империи.

В России, в Санкт-Петербурге, еще в XVIII веке появились булыжные и клинкерные мостовые. В 1714 году Петр I издал указ, в котором повелевалось доставлять в город «дикий» камень для строительства булыжных мостовых. 11 ноября 1816 года император Александр I утвердил «Постановление о тротуарах» — тротуары устраива-

лись «из гранитных камней и плит» шириной два аршина (около 1,5 м) по обеим сторонам улиц.

Цементно-бетонные плиты малых размеров начали использовать для строительства тротуаров в начале XX в. Однако в дальнейшем для повышения производительности труда и в связи с индустриализацией производства в дорожном строительстве и благоустройстве было принято решение использовать крупногабаритные железобетонные плиты. К этому времени в промышленном и гражданском строительстве началось освоение крупногабаритных железобетонных плит (панелей), модификации которых были рекомендованы для дорожных покрытий, что нашло отражение в нормативных документах (СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции»; СНиП 3.06.03–85 «Автомобильные дороги»; СНиП 3.09.01–85 «Производство железобетонных конструкций и изделий»; ВСН 197–91 «Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд»; ВСН 139–80 «Инструкция по строительству цементобетонных покрытий автомобильных дорог»; СН 120–70 «Указания по проектированию аэродромных покрытий»; ГОСТ 25912.0–91 — ГОСТ 25912.4–91 «Плиты железобетонные для аэродромных покрытий»; ГОСТ 17608–91 «Плиты бетонные тротуарные»; ГОСТ 21924.0–84 — ГОСТ 21924.3–84 «Плиты железобетонные для покрытий городских дорог»; ТУ ГОСТ 26633–91 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» и другие).

Сборные покрытия обладают рядом преимуществ, таких как высокая индустриализация строительства, возможность круглогодичного производства работ, минимальная номенклатура работ на месте, возможность транспортировки плит на любые расстояния, простота технологии и организации работ, немедленный пуск движения по дороге и т. д.

Главные недостатки таких покрытий — относительно высокая стоимость, большой расход арматуры — особенно при необходимости ее предварительного напряжения, большое количество швов и стыковых соединений, потеря устойчивости из-за плохого контакта с основанием и несовершенных связей в швах.

А. В. Яковлев [10, 11] отмечал, что большую роль в обеспечении надежной работы покрытий оказывает устойчивость плит против вертикаль-

ного и горизонтального их смещения. Решающее значение при этом имеет вид поверхностей плиты и характер ее опирания на нижний слой основания. Так, применение ребристых, решетчатых, ячеистых и кессонированных плит по сравнению с гладкой опорной поверхностью, как и усиление основания под углами и краями бетонными подкладками в виде подушек или лежней значительно снижает их подвижность (качение), повышает вертикальную устойчивость за счет увеличения сцепления и площади опорных поверхностей.

Опыт эксплуатации сборных покрытий из железобетонных плит подтвердил, что важнейшее значение для обеспечения устойчивости имеют форма плит и вид стыкового соединения между ними. Для повышения устойчивости стали применять С-образные плиты на площадях (Германия), трапециевидные и клиновидные плиты (Россия, Германия), плиты с зубчатыми и фигурными зацеплениями, шестигранные плиты, покрытия из сочлененных плит [12].

Для повышения эффективности работы арматуры в железобетонных плитах было предложено осуществлять ее предварительное напряжение, обеспечивающее значительное повышение трещиностойкости плит [12]. Наибольшее распространение в нашей стране получили плиты типа ПАГ-XIV и их дорожные модификации.

Исследуя работы сборных покрытий автомобильных дорог, В. С. Орловский [7, 8] по их результатам сделал выводы, что применение предварительно напряженных плит больших размеров не является единственным средством получения ровного и устойчивого покрытия, покрытие из плит 1,5×1,75 м более устойчиво, чем из плит ПАГ-XIV — в нем не наблюдаются «выплески», нет нарушений контактов с основанием и поэтому нет разброса в напряжениях; расчет должен учитывать реальные условия работы плит при эксплуатации, и влияние неполного контакта плит намного больше, чем влияние упругих характеристик основания согласно обычной практике расчетов. Исследованиями В. С. Орловского показано, что в качестве основания под асфальтобетонное покрытие наиболее эффективны именно плиты малых и средних размеров (28–165 см). Условия работы покрытий из малоразмерных жестких элементов существенно отличаются от работы крупногабаритных

(панельных) тем, что отдельные элементы (блоки) имеют между собой иные связи; их устойчивость в покрытии обеспечивается посредством трения-сцепления боковых граней (усиливаемого заклиной, шпунтированием и т. п.), что позволяет элементам замкнуться и рационально распределять вертикальные нагрузки; устойчивость такого покрытия увеличивается благодаря взаимному влиянию его элементов друг на друга [7, 8].

Из анализа опыта применения сборных дорожных покрытий видно, что в России до последнего времени доминирующей тенденцией являлось увеличение габаритов плит и широкое использование при производстве железобетона с мощной арматурной основой из металла. Однако по мере накопления опыта были обнаружены и существенные недостатки дорожных покрытий из крупногабаритных железобетонных плит. При использовании таких плит возникают существенные затруднения по обеспечению плотного контакта основания плиты с подстилающим грунтом. Поэтому требуются дополнительная перекладка плит, задув песка между основанием плиты и грунтом и ряд других мероприятий. Относительно небольшие элементы сборных дорожных покрытий более плавно огибают неровности подстилающего основания не только при монтаже покрытия, но и в ходе его эксплуатации. Изгибающие моменты в них значительно ниже, чем в покрытиях из крупногабаритных плит, нет «выплесков» материала основания из пазов в зонах швов, что обеспечивает им большую работоспособность. У малых плит не наблюдается нарушения контакта с основанием, поэтому не возникает разброс в напряжениях при действии нагрузки, а сами напряжения существенно меньше, чем, например, в плитах ПАГ, что позволяет улучшать экономические показатели, снижая расход арматуры на единицу площади [12].

Установлены условия устойчивости от воздействия транспортной нагрузки в шве без стыковых соединений плиты сборного бетонного покрытия:

- первое условие устойчивости будет обеспечено, если по всей подошве плиты напряжения будут сжимающими (положительными);
- второе условие [1] состоит в том, что наибольшее по абсолютному значению напряжение $[\delta_v]$ не должно превосходить предельного зна-

чения для данного вида грунта (слоя материала основания) при сжатии:

$$|\delta_v| \leq \delta_{\text{пред}}, \quad (1)$$

где δ_v — наиболее нагруженная точка плиты; $\delta_{\text{пред}}$ — расчетное сопротивление грунта при сжатии;

- по третьему условию [2] вертикальное смещение (W_v) в зоне шва (угла плиты) должно удовлетворять требованию:

$$W_v = |\delta_v| \times K \leq W_{\text{пред}}, \quad (2)$$

где K — коэффициент постели грунта; $W_{\text{пред}}$ — нормативный предельный упругий прогиб.

Б. Н. Карповым для обеспечения повышенной устойчивости дорожной конструкции от многократного воздействия подвижных динамических нагрузок при эксплуатации предлагаются сборные многокомпонентные покрытия дорог и тротуаров. Покрытия изготавливаются и монтируются из крупноразмерных (на стадии строительства) прямоугольных блок-секций, трансформирующихся на стадии эксплуатации в систему малых рационально взаимосвязанных (по зонам рустов-надрезов) элементов эффективных форм [3].

Анализируя динамическую устойчивость рекомендуемых по нормативным требованиям ОДН 218.046–01 решений сборных дорожных покрытий, можно констатировать:

- величина прогиба и степень контактирования по подошве плиты с основанием под действием природно-климатических факторов и динамических транспортных нагрузок в ходе эксплуатации непрерывно меняются, что расширяет покрытие и основание, смещая плиты с исходного положения, ухудшая ровность и безопасность движения;
- не обеспечена рациональная работа бетона плиты на сжатие, плита подвержена изгибающим моментам с возникновением опасных растягивающих напряжений как от транспортной нагрузки, так и от природных факторов;
- конструктивно не обеспечено в ходе эксплуатации стабильно плотное прилегание подошвы плиты к основанию для гашения динамики колебания конструкции от транспортной нагрузки;
- в конструкции не предусмотрены необходимые механизмы регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) и оптимизации конструктивно-технологических решений,

в том числе для выбора покрытия рационального типа, размещения типа и стыковых соединений швов. Регулирование НДС может включать механизм воздействия для повышения равномерности деформирования по площади покрытия, необходимой для увеличения его срока службы;

- для комбинированных дорожных конструкций асфальтобетона на сборном основании актуальным остается решение задачи снижения толщины асфальтобетонных слоев, которая по нормативам составляет 16–20 см, что является экономически затратным, а главное, способствует увеличению колеи и снижению межремонтных сроков службы покрытия.

Результатом недостаточного обеспечения устойчивости используемых типов сборных покрытий в соответствии с реальными вышеприведенными их характеристиками являются остаточные деформации, снижающие ровность и безопасность движения и сокращающие сроки их службы:

- трещинообразование в плитах, обусловленное в основном постоянным и непрерывным изгибом при разной степени контакта с основанием и усиленной динамикой;

- перекосы отдельных плит с изменением уклонов — от вымывания грунта основания, усиливаемого динамическим воздействием транспортной нагрузки, изменчивостью воздействий водно-теплого режима конструкции, в том числе влиянием морозного пучения;

- изменение проектного положения в плане, сползание плит покрытия к обочине вследствие уноса грунта с обочин от движения автомобилей и вымывания, динамических колебаний плит покрытия;

- уступы между плитами в сборном покрытии обусловлены размерами плит и типом стыковых соединений, значением коэффициента фильтрации материала основания и коэффициента постели основания, особенностями движения транспорта;

- отколы торца плит, вызываемые сильными горизонтальными ударами тяжелых автомобилей и недостаточной прочностью поверхностного слоя бетона, зависящие также от высоты уступа, типа шва, угла набега колеса на шов.

Конкретный вид остаточных деформаций (из вышеуказанных) обусловлен дополнительным

влиянием причин возникновения других деформаций и разрушений сборного покрытия, а иногда и комплексом причин. Виды и причины возникновения остаточных деформаций сборных бетонных покрытий более подробно рассмотрены в таблице.

В существующей нормативной (как и в специальной) литературе расчет сборного покрытия сводится к расчету отдельной плиты определенных размеров с ее граничными условиями, при этом, в отличие от сборных бетонных плит перекрытия промышленных зданий и сооружений, где расчетная схема практически не изменяется, для сборного дорожного покрытия расчетная схема в ходе эксплуатации претерпевает изменения.

Обычно роль швов, разрезов, изломов рассматривается в расчетах как передаточное звено, считается, что связи в них необходимы лишь для недопущения чрезмерного раскрытия или возникновения уступов, резко снижающих ровность и безопасность движения.

Но справедливо считать, что их роль также в регулировании НДС дорожной одежды (в том числе обеспечении рациональной работы бетона как материала, предотвращении разрушительных растягивающих напряжений с ориентацией работы на сжатие); в оптимизации динамических характеристик покрытия (за счет применения рациональных связей в разрезах-швах и снижения уступов, обеспечения постоянного контакта элемента плиты с основанием). При этом исследования должны быть направлены на обеспечение адекватного приближения расчета от отдельной плиты к совместной работе сборного покрытия, т. е. рассмотрение покрытия, включающего разрезы. Для этого может использоваться математический аппарат теории пластин с разрезами, где швы, разрезы, изломы моделируются разрывными функциями (Хевисайда, дельта-функция Дирака).

В отечественной научной и нормативной литературе основное внимание уделяется поверочным расчетам заранее заданных схем дорожных одежд, то есть их анализу. Такой анализ может служить лишь одной из стадий проектирования конструкций, используя разные методы расчета без определения оптимального решения [5]. На недостаточность такого подхода указал член-корреспондент Академии наук СССР

Виды и причины остаточных деформаций сборных бетонных покрытий

№ п/п	Вид и наименование деформации	Общая характеристика сборных покрытий используемых видов	Причины возникновения разных видов остаточных деформаций (разрушений)
1	Трещинообразование в плитах покрытия	Практика эксплуатации отмечает несоответствие требованиям по ровности и безопасности движения применяемых в настоящее время конструктивно-технологических решений сборного покрытия	Многочисленные динамические воздействия на изгиб от транспортных нагрузок и природных факторов, неравномерный контакт подошвы плит с основанием
2	$Q_i > Q_{доп}$ Неравномерное раскрытие швов покрытия		Разная степень деформирования и раскрытия швов от температурно-влажностного режима дорожной одежды, динамики покрытия, работы стыковых соединений
3	$h_i > h_{доп}$ Уступы между плитами покрытия в швах		Разные по величине осадки основания (в середине плит и швах), снижение герметичности швов в ходе эксплуатации и выплески в швах, нарушение связи участков плит с основанием
4	Перекосы плит в профиле и расползание в плане покрытия	Практика эксплуатации отмечает несоответствие требованиям по ровности и безопасности движения применяемых в настоящее время конструктивно-технологических решений сборного покрытия	Неоднородная связь с основанием и плит между собой, высокая жесткость покрытия и низкие демпферные характеристики используемых плит и стыковых соединений
5	Отколы торцов плит покрытия		Ударная нагрузка при наезде на выступы (торцевые удары), ослабление бетона по контуру плит при очистке от льда и снега
6	Шелушение поверхности сборного покрытия		Воздействие химических реагентов при очистке покрытия, технологические причины при изготовлении плит

И. М. Рабинович в работе «К теории вантовых ферм», отметив, что при данном подходе чаще анализируют заданные конструкции и не уделяют внимания их созиданию через оптимизацию конструкций на основе решения задач регулирования их НДС.

Регулирование НДС предусматривает повышение равномерности деформирования элементов дорожной конструкции, необходимой для увеличения срока ее службы. Регулирование возможно осуществлять за счет изменения или дополнения некоторых параметров конструкции, например показателей видов, количества, размеров, форм и других характеристик элементов, в том числе разрезов, швов, связей и их соединений.

Такой подход предусматривает оптимизацию существующих решений, обуславливающих повышение устойчивости и сроков службы дорожной одежды со сборным покрытием.

На основании рассмотрения особенностей эксплуатационных качеств применяемых конструктивных решений, существующих технологий строительства и работы данных покрытий следует резюмировать, что:

- современные сборные бетонные покрытия автомобильных дорог обладают рядом существенных недостатков, определяющих их низкую динамическую устойчивость, обусловленную неравномерным деформированием конструкции от воздействия природных факторов и динамической транспортной нагрузки, что связано в том числе с нерациональным использованием типов, формы, количества, размещения и направления швов, жесткостных характеристик швов и стыковых соединений, применяемого армирования;

- следует использовать экспериментально проверенные конструктивные решения [3, 7], обеспечивающие повышение устойчивости составляющих сборное покрытие несущих элементов; учитывать при размещении транспортной нагрузки на шве сборного покрытия представленные выше три условия обеспечения устойчивости несущих элементов;

- необходимо учитывать материалы анализа причин неудовлетворительной устойчивости используемых (в соответствии с нормативами) конструктивно-технологических решений сборного покрытия в части неполного контакта с осно-

ванием, работы бетона на изгиб, возможностей регулирования НДС с помощью рационального использования швов, возможностей конструкции по гашению динамических колебаний и т. д.;

- дальше и глубже исследовать влияние причин устойчивости сборного покрытия на развитие основных типов остаточных деформаций, снижающих ровность и безопасность движения.

Исследование по повышению устойчивости сборного покрытия предполагает разработку расчетной схемы, адекватной реальному деформированию покрытия, при обеспечении регулирования НДС за счет дополнения или изменения параметров конструкции и, в итоге, оптимизацию существующих конструктивно-технологических решений сборных покрытий.

Таким образом, при рационально подобранных конструктивных элементах сборного дорожного покрытия и, как следствие, решении вопроса повышения устойчивости можно предположить, что применение сборного бетонного покрытия станет эффективным направлением развития городской дорожной инфраструктуры; при тщательном технико-экономическом обосновании, а также дальнейшей проработке проектных решений данной конструкции возможно активное внедрение данного вида дорожной одежды как в городском строительстве, так и за пределами города. Важнейшее значение в вопросе повышения устойчивости с последующей оптимизацией конструктивно-технологических решений дорожных одежд со сборным бетонным покрытием имеет вопрос включения в расчет таких конструкций дополнительных параметров разрезов, разрезов-швов и иных связей, что позволит предложить новый метод обоснования конструкций и усовершенствовать метод расчета выбранного конструктивно-технологического решения, а также более точно оценить и спрогнозировать работу дорожной одежды со сборным покрытием как перспективного типа покрытия в развивающейся дорожной отрасли.

Библиографический список

1. Бируля А. К., Батраков О. Т., Могилевич В. М. Сборные железобетонные покрытия автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1960. 135 с.
2. Защепин А. Н., Зельманович М. С., Лукьянов Н. К. Комплексная механизация строительства

цементобетонных покрытий. М.: Дориздат, 1953. 92 с.

3. Карпов Б. Н., Симановский А. М., Цветков А. Б. Эффективные сборные дорожные покрытия для районов Севера и Сибири. Л.: Стройиздат, 1986. 96 с.

4. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. 204 с.

5. Клековкина М. П. Совершенствование конструкции и технологии строительства дорожных одежд с бетонным несущим основанием: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 189 с.

6. Михайлов Б. К., Кипиани Г. О. Деформативность и устойчивость пространственных пластинчатых систем с разрывными параметрами. СПб.: Стройиздат, 1996. 434 с.

7. Орловский В. С. Проектирование и строительство сборных дорожных покрытий. М.: Транспорт, 1978. 149 с.

8. Орловский В. С. Расчет основания под сборное покрытие // Автомобильные дороги. 1986. № 1. С. 18–20.

9. Смирнов А. В., Шестаков В. Н., Сиротюк В. В., Никитин В. П., Боброва Т. В., Миронов А. А. Конструкции и технологии строительства автомобильных дорог в сложных природных условиях: учеб. пособие / под ред. А. В. Смирнова. Омск: СибАДИ, 2005. 172 с.

10. Сборные покрытия военно-автомобильных дорог / под ред. А. А. Калерта. Л., 1958. 310 с.

11. Сборные покрытия автомобильных дорог / под ред. В. М. Могилевича. М.: Высшая школа, 1972. 348 с.

12. Карпов Б. Н. Сборные многокомпонентные дорожные покрытия: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2000. 330 с.

References

1. Birulya A. K., Batrakov O. T., Mogilevich V. M. *Sbornye zhelezobetonnye pokrytiya avtomobil'nykh dorog* [Precast reinforced concrete highway pavements]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1960, 135 p.

2. Zashchepin A. N., Zel'manovich M. S., Luk'yanov N. K. *Kompleksnaya mekhanizatsiya stroitel'sta tsementobetonnykh pokrytiy* [Complex mechanization of cement-concrete coverings construction]. Moscow, Dorizdat Publ., 1953, 92 p.

3. Karpov B. N., Simanovskiy A. M., Tsvetkov A. B. *Ehffektivnye sbornye dorozhnye pokrytiya dlya rayonov Severa i Sibiri* [Effective combined road carpets for regions of the North and Siberia]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1986, 96 p.

4. Karpenko N. I. *Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami* [The theory of deformation of reinforced concrete with cracks]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 204 p.

5. Klekovkina M. P. *Sovershenstvovanie konstruktssii i tekhnologii stroitel'sta dorozhnykh odezhd s betonnym nesushchim osnovaniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of design and technology of road clothes construction with the concrete bearing base. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2010, 189 p.

6. Mikhaylov B. K., Kipiani G. O. *Deformativnost' i ustoychivost' prostranstvennykh platinchatykh sistem s razryvnymi parametrami* [Deformability and stability of spatial platelike systems with tearing parameters]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1996, 434 p.

7. Orlovskiy V. S. *Proektirovanie i stroitel'stvo sbornykh dorozhnykh pokrytiy* [Design and construction of precast road carpets]. Moscow, Transport Publ., 1978, 149 p.

8. Orlovskiy V. S. *Raschet osnovaniya pod sbornoe pokrytie* [Calculation of the base for precast covering]. *Avtomobil'nye dorogi – Highways*, 1986, no. 1, pp. 18–20.

9. Smirnov A. V., et al. *Konstruktssii i tekhnologii stroitel'sta avtomobil'nykh dorog v slozhnykh prirodnnykh usloviyakh*. *Ucheb. posobie* [Designs and technologies of construction of highways in a hard environment. Teaching manual]. Ed. by Smirnov A. V. Omsk, SibADI Publ., 2005, 172 p.

10. *Sbornye pokrytiya voenno-avtomobil'nykh dorog* [Precast coverings of military highways]. Ed. by Kaler A. A. Leningrad, 1958, 310 p.

11. *Sbornye pokrytiya avtomobil'nykh dorog* [Precast coverings of highways]. Ed. by Mogilevich V. M. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972, 348 p.

12. Karpov B. N. *Sbornye mnogokomponentnye dorozhnye pokrytiya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Precast multi-component road carpets. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2000, 330 p.