

Об одном способе назначения конструкции одежды ездового полотна на ортотропной плите металлических мостов

Поступила 21.05.2018

Рецензирование 27.06.2018

Принята к печати 03.10.2018

В статье отмечена проблема отсутствия в России нормативно закрепленных методик назначения одежды ездового полотна на мостах, а также недостаточного использования опыта эксплуатации уже существующих конструктивных решений мостового полотна, что приводит к снижению фактического срока службы покрытия на искусственных сооружениях в сравнении с проектным.

Авторами в настоящее время ведется разработка методики расчета асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите пролетных строений металлических мостов, часть положений которой рассмотрена в данной статье. Отмечена необходимость учета температурного фактора при определении значений механических характеристик асфальтобетона. Обоснованы схема и нормативная величина нагрузки для проведения соответствующих расчетов, величины применяемых к ней коэффициента надежности и динамического коэффициента.

Проведено определение напряженно-деформированного состояния асфальтобетона на мосту с ярко выраженными дефектами в одежде ездового полотна, по результатам которого получено расчетное подтверждение мест возникновения повреждений. Предложена конструкция одежды ездового полотна, способная не допустить проявления подобных неисправностей, так как, во-первых, уровень расчетных растягивающих напряжений в ней существенно ниже, а во-вторых, подобные системы покрытия хорошо проявили себя на других искусственных сооружениях.

Отмечены пока не решенные проблемы, например, отсутствие формализованной методики по определению усталостной прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе с учетом температурного фактора. Поставлены задачи на будущее – оценка температурных напряжений в покрытии, борьба с колебательностью, расчет на сдвиговое воздействие по контакту асфальтобетона с гидроизоляцией и гидроизоляции с ортотропной плитой.

Ключевые слова: мост, пролетное строение, ортотропная плита, одежда ездового полотна, напряженно-деформированное состояние, модуль деформации, коэффициент Пуассона.

Совершенствование норм, в соответствии с которыми выполняются расчет и проектирование объектов транспортной инфраструктуры, – непрерывный процесс, идущий вслед за углублением знаний о строительных материалах, об их работе в составе того или иного сооружения. С развитием инженерной науки детальной проработке подвергаются все более узконаправленные задачи, иногда находящиеся на стыке дисциплин. Одной из таких проблем является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) одежды ездового полотна на стальных пролетных строениях мостовых переходов.

Несмотря на то что исследования характера работы покрытия на ортотропной плите в нашей стране ведутся с начала 70-х гг. XX в. [1–4], отечественные методики проектирования конструкции одежды ездового полотна на искусственных сооружениях пока уступают зарубеж-

ным. В странах Евросоюза, США и Канаде в ограничении жесткости ортотропной плиты и использовании на мостах специально разработанных составов асфальтобетонных смесей уже давно нашли отражение опыт эксплуатации покрытий и результаты обширных экспериментальных исследований [5–9].

В нашей стране конструкция одежды ездового полотна на искусственных сооружениях назначается, как правило, аналогично таковой для дорог на земляном полотне. Современные нормы [10] лишь ограничивают минимальную толщину покрытия и листа настила. Однако иные параметры, очевидно влияющие на жесткость проезжей части и, следовательно, на величину напряжений в одежде ездового полотна (шаг, тип и расположение главных несущих элементов, поперечных балок, конструкция стрингеров), в СП 35.13330.2011 [10] не фигурируют. Существующая методика расчета нежесткой

дорожной одежды на земляном полотне [11] к покрытиям на пролетных строениях мостов неприменима, что рассматривалось авторами ранее [12].

Поэтому пока единственным критерием, позволяющим обоснованно назначить конструкцию покрытия, можно назвать опыт эксплуатации на аналогичных мостовых переходах. Но металлические мосты (особенно внеклассные), как правило, отличаются многообразием конструктивных решений, поэтому неясно, как количественно выразить эту «аналогичность», так как жесткость проезжей части от сооружения к сооружению будет отличаться. И нередко даже негативный опыт использования той или иной системы покрытия не останавливает ее дальнейшего применения [13].

Но и наличие положительного опыта эксплуатации не является гарантией бездефектной службы материала в иных условиях. Например, щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) хорошо проявил себя на обычных автомобильных дорогах (вследствие особой структуры он более устойчив к колее- и трещинообразованию в сравнении с традиционными асфальтобетонами), что предопределило его применение на автомагистралях с высокой интенсивностью движения [14]. Однако при использовании ЩМА в верхнем слое покрытия на мостах с ортотропными плитами его прочностные свойства оказались недостаточными [13].

Выход из сложившейся ситуации видится в определении параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние покрытия на ортотропной плите, и их сравнении с предельными значениями, отражающими прочность рассчитываемого материала.

Авторами в настоящее время ведется разработка методики расчета асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите пролетных строений металлических мостов:

- проанализированы отечественные и зарубежные наработки по тематике расчета одежды ездового полотна на мостах;

- рассмотрены зависимости для определения модуля деформации и коэффициента Пуассона асфальтобетона с учетом температуры и длительности воздействия нагрузки, поскольку в [11] не в полной мере учтен вязкоупругий характер деформирования данного материала;

- проведены натурные эксперименты по определению напряженно-деформированного состояния покрытия на ортотропной плите, подтвердившие соответствие принятых расчетных предпосылок реальному характеру деформирования асфальтобетона.

Результаты расчетов, проводимых в соответствии с разрабатываемой методикой, должны как позволять назначать конструкцию одежды ездового полотна на проектируемых или реконструируемых сооружениях, так и подтверждать характер проявления дефектов в покрытиях уже эксплуатируемых мостовых переходов. С этой целью проведено определение НДС покрытия Байдаевского моста, где ранее в асфальтобетоне возникали регулярные поперечные трещины.

Байдаевский мост через р. Томь в Кемеровской области построен в 1950–1952 гг. мостопездом № 419 треста «Мостострой № 2» по проекту Сибгипротранса под нагрузки Н-13 и НГ-60. Схема моста (52,5 + 4 × 70,0 + 52,5) м, полная длина 396 м, габарит Г-7 с двухсторонними тротуарами шириной по 1,6 м. Пролетные строения моста – металлические клепаные неразрезные фермы с простой треугольной решеткой, с открытым верхним поясом по типовому проекту «Проектстальконструкция» № 4257 Т-1 (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид Байдаевского моста

Конструкция проезжей части старой проектировки, она существенно отличается от общепринятой в настоящее время. Первоначально представляла собой деревоплиту, уложенную по продольным и поперечным металлическим балкам, затем в 1975 г. в ходе реконструкции сооружения была заменена на ортотропную плиту. Ортотропная плита представляет собой лист настила толщиной 10 мм, подкрепленный продольными полосовыми и поперечными полосовыми и опорными тавровыми ребрами. Блок-секции ортотропной плиты уложены на существующие продольные балки и прикреплены к ним высокопрочными болтами. Продольные балки сопрягаются с поперечными балками, которые затем

стыкуются с узлами главных ферм. Фотографии, иллюстрирующие особенности несущих конструкций проезжей части, даны на рис. 2, соответствующие схемы – на рис. 3.

После ремонта в 2001 г. на мосту было уложено новое асфальтобетонное покрытие толщиной 4–6 см. На момент проведения обследования специалистами АО «СибНИТ» в 2007 г. одежда ездового полотна находилась в неудовлетворительном состоянии – отмечены регулярные поперечные трещины, расположенные над опорными поперечными ребрами (рис. 4).

Определение напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна на рассматриваемом сооружении выполнено в конечно-элементном комплексе MidasCivil.

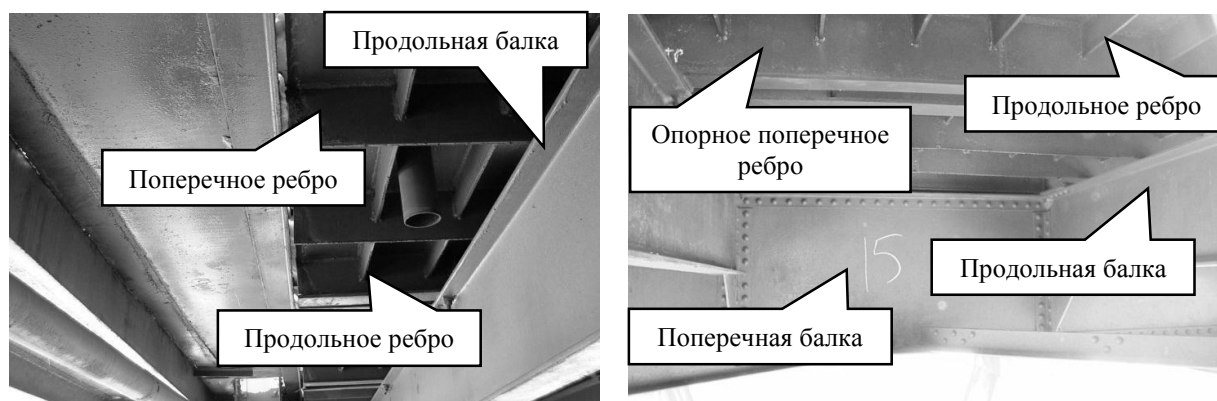


Рис. 2. Несущие конструкции проезжей части

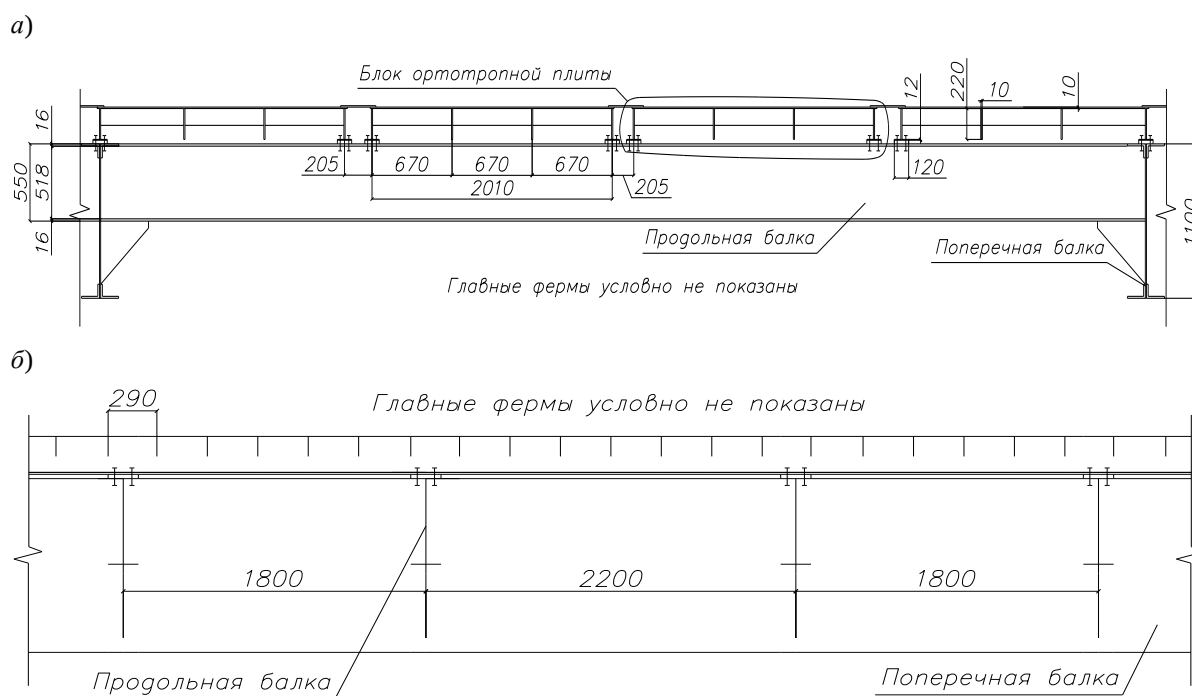


Рис. 3. Схема несущих конструкций проезжей части:
а – вид по фасаду; б – поперечное сечение

Детально смоделирована блок-секция пролетного строения – один пролет присоединенных к поперечным продольных балок с опирающимися на них блоками ортотропной плиты. Металлоконструкции заданы плитными конечными элементами, асфальтобетон – объемными конечными элементами. Толщина покрытия принята равной 5 см как средняя величина по результатам измерений специалистами АО «СибНИТ» в 2007 г. Общий вид конечно-элементной модели приведен на рис. 5.

Напряженно-деформированное состояние рассчитываемого материала зависит от значений его механических характеристик – модуля деформации и коэффициента Пуассона. Если для стали они общеизвестны, то в случае с асфальтобетоном могут возникнуть определенные сложности. Асфальтобетон – упруговязкопластичный материал, что подразумевает влияние температуры и длительности воздействия нагрузки на связь между нагрузкой и вызываемыми ей деформациями. С необходи-

мостью учета этих факторов связаны проведенные авторами ранее поиск и анализ существующих расчетных моделей для определения значений модуля деформации и коэффициента Пуассона асфальтобетона [15, 16], а также апробация выбранных зависимостей на практике путем проведения экспериментов по определению НДС одежды ездового полотна на нескольких мостовых сооружениях. На основании этого для дальнейших исследований были приняты:

- зависимость для вычисления модуля деформации асфальтобетона, выведенная Д. Кристенсеном с соавторами на базе модели Хирша и дополненная Б. Б. Телтаевым и Б. С. Радовским выражением для получения модуля деформации (или жесткости, как принято авторами) битума [17];

- формула для получения коэффициента Пуассона, принимаемая в соответствии с механико-эмпирическим методом проектирования покрытий [18, 19].



Рис. 4. Состояние покрытия Байдаевского моста в 2007 г.

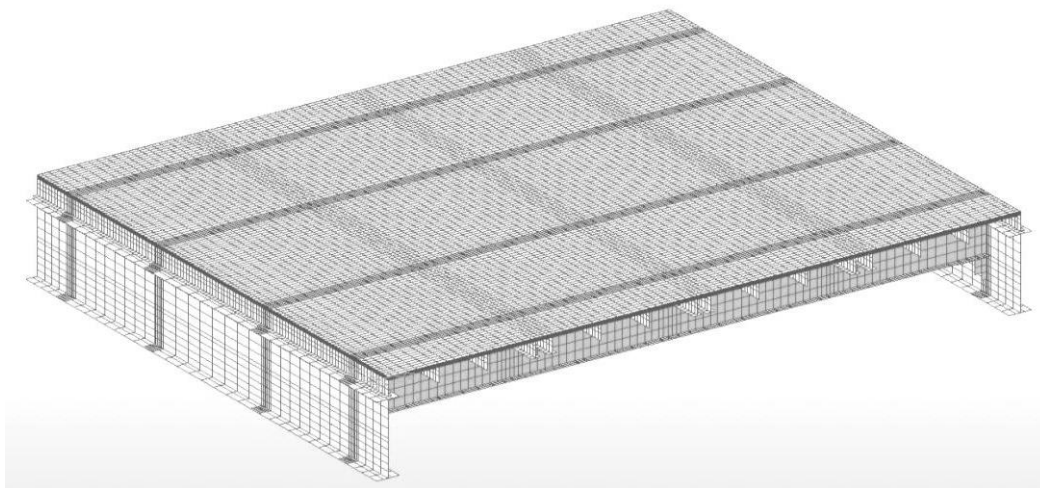


Рис. 5. Общий вид конечно-элементной модели

Помимо температуры и длительности внешнего воздействия, на напряженно-деформированное состояние одежды ездового полотна влияет и величина подвижной нагрузки. В расчет принята двухосная тележка с расстоянием между осями 1,5 м (как у нагрузки по схеме АК, что наиболее приближено к параметрам реальных транспортных средств), но нагрузка на ось равна 11,5 т (как для автомобильных дорог, так как планируемый срок службы покрытия на искусственном сооружении сопоставим с таковым для дорожной одежды на земляном полотне и нет необходимости учета роста интенсивности транспортного потока на отдаленную перспективу в 70–100 лет).

Передача нагрузки от транспортного средства на покрытие осуществлена посредством отпечатков размерами 0,2 × 0,6 м, как при расчете элементов ортотропной плиты [10].

При назначении величин коэффициента надежности и динамического коэффициента к нормативной нагрузке авторы исходили из по-

добия выполняемого расчета покрытия проверкам элементов автодорожных мостов по выносливости, поскольку асфальтобетон за срок эксплуатации испытывает число циклов воздействия, исчисляемое миллионами. Тогда в соответствии с положениями [10] коэффициент надежности $\gamma_f = 1$, а динамический коэффициент равен $(1 + 2/3\mu) = (1 + 2/3 \cdot 0,4) = 1,27$ (динамическая добавка $\mu = 0,4$ согласно [10]).

Схема прикладываемой нагрузки с учетом принятых расчетных предпосылок приведена на рис. 6.

На рис. 7 отмечены места возникновения продольных растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона при температуре материала -30°C .

Согласно результатам расчета максимальные продольные растягивающие напряжения в верхней фибре асфальтобетона действительно возникают над опиранием поперечных ребер на продольные балки, т. е. в местах, где фактически расположены регулярные поперечные трещины в покрытии (см. рис. 4).

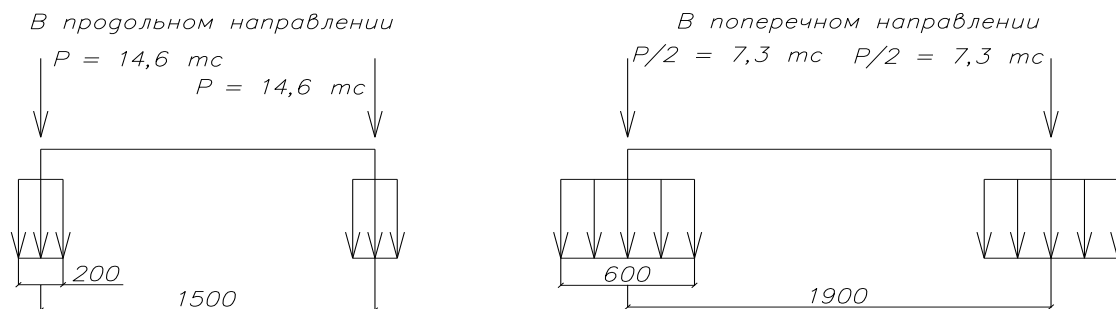


Рис. 6. Схема расчетной прикладываемой нагрузки

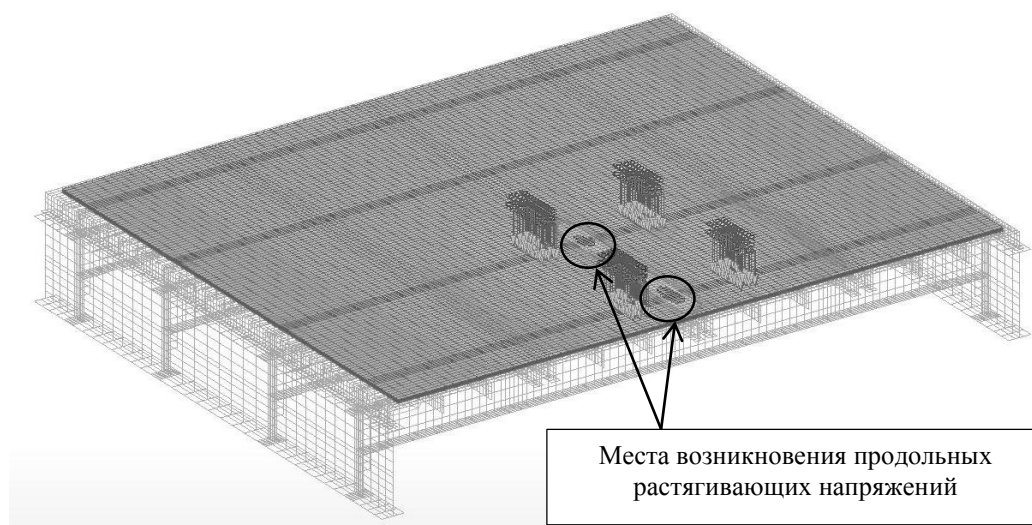


Рис. 7. Расположение подвижной нагрузки и места возникновения растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона

Для недопущения возникновения подобных дефектов необходимо снизить величину напряжений в асфальтобетоне. Один из возможных вариантов – замена проблемной конструкции одежды ездового полотна на более современную, включающую в себя:

- верхний слой толщиной 30–40 мм из литого асфальтобетона, хорошо проявляющего себя в разнообразных условиях эксплуатации [20];

- нижний слой толщиной 40–50 мм из щебеночно-мастичного асфальтобетона, устойчивого к пластическому колееобразованию;

- применение обмазочной (или «напыляемой») гидроизоляции вследствие особенностей конструкции проезжей части (на Байдаевском мосту стыки между блоками ортотропной плиты перекрыты накладками, выступающими над листом настила на всю толщину, что делает невозможным применение наплавляемой гидроизоляции, обычно используемой на металлических мостах).

С целью оценки степени влияния толщины одежды ездового полотна на напряженно-деформированное состояние асфальтобетона расчет проведен для предлагаемых систем покрытия общей толщиной 75 и 95 мм. По результатам вычислений построены графики продольных растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона в широком температурном диапазоне работы сооружения (рис. 8).

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы. В предлагаемых конструкциях покрытий уровень растягивающих напряжений существенно ниже, чем в «проблемной», что, с одной стороны, ожидаемо, а с другой – противоречит тезису некоторых исследователей о противоположной зависимости между изменением толщины и напряжений в покрытии [21]. Возможно, на иных конструкциях проезжей части связь между изменением толщины асфальтобетонных слоев и напряжениями будет иной.

Также с увеличением толщины существенно снижается скорость роста растягивающих напряжений, а при 95 мм они после определенного предела (около 1,25 МПа при 0 °С) остаются постоянными. Поэтому можно сделать вывод, что существует оптимальная толщина покрытия, после которой рост толщины асфальтобетона с целью снижения напряжений будет неэффективным, но данный тезис требует подтверждения расчетами покрытия на иных, более современных конструкциях проезжей части.

Выполнить полноценный расчет одежды ездового полотна с проверкой материалов по прочности в рамках действующих нормативов затруднительно. На прочность асфальтобетона существенное влияние оказывает температурный фактор [22–24], но формализованной методики, учитывающей это, пока не разработано, а норматив [11], по мнению авторов, нуждается в уточнении.

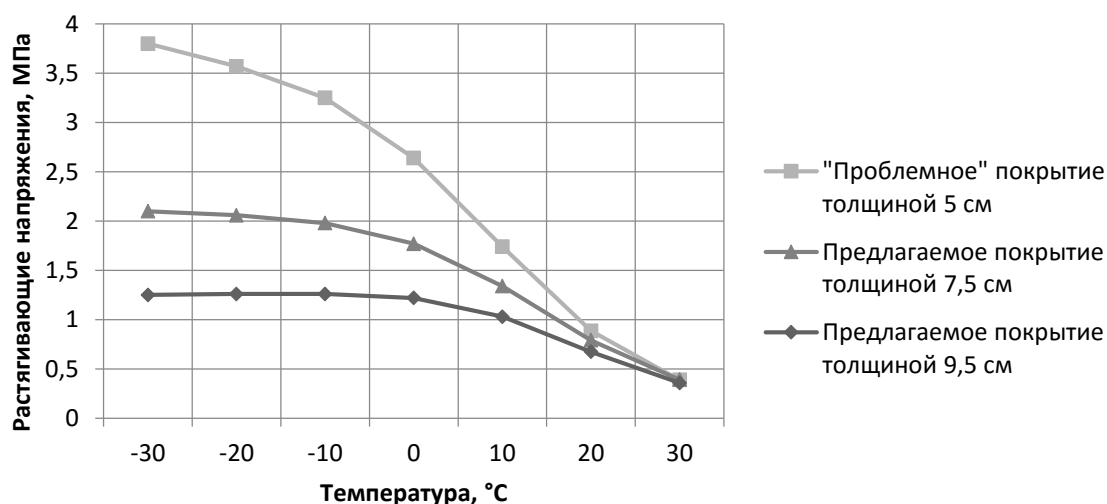


Рис. 8. Продольные растягивающие напряжения в верхней фибре асфальтобетона при разных конструкциях покрытия

Расчет одежды ездового полотна по нормальным напряжениям под воздействием подвижной нагрузки – лишь одна из задач, которые требуют решения. В битуме развиваются процессы старения [25], в покрытии возникают температурные напряжения, сдвиговые

воздействия, приводящие к нарушению сцепления между слоями, пластическая колей и колей износа, и решить этот комплекс проблем возможно лишь при совместной работе специалистов дорожной и мостовой сфер.

Библиографический список

1. Сахарова И. Д. Дорожная одежда на ортотропной плите пролетных строений мостов // Совершенствование проектирования мостовых сооружений : труды ГП Росдорнии, НИЦ «Мосты», ОАО «ЦНИИС». М., 2002. Вып. 12. С. 83–101.
2. Азоян Р. С. Некоторые вопросы конструирования и расчета проезжей части металлических автодорожных мостов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. М., 1970. 209 с.
3. Прикладная механика дорожных одежд на мостовых сооружениях / А. Г. Щербаков [и др.] ; Волгоград. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград : ВолГАСУ, 2006. 220 с.
4. Беляев Н. Н. Проблемы асфальтобетонных покрытий и пути их решения на примере КАД вокруг Санкт-Петербурга // Дороги. Инновации в строительстве. 2014. № 39. С. 60–63.
5. Корнеев М. М. Стальные мосты : теор. и практ. пособие по проектированию мостов : в 2 т. Киев : Академпресс, 2010. Т. 1. 532 с.
6. AASHTO LRFD. Bridge Design Specifications. SI Units 4th Edition. 2007. URL: http://www.academia.edu/33911862/AASHTO_LRFD_Bridge_Design_Specifications_SI_Units_4th_Edition_2007 (дата обращения: 17.10.2018).
7. Eurocode 1993-2. Design of Steel Structures. P. 2. Steel Bridges. 2006. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.2.2006.pdf> (дата обращения: 17.10.2018).
8. CAN/CSA-S6-00. Canadian Highway Bridge Design Code : A National Standard of Canada. 2010. URL: https://kupdf.net/download/can-csa-s6-1-06-commentary_58e1c97cdc0d60716f8970d7_pdf (дата обращения: 17.10.2018).
9. Нежесткие дорожные покрытия на металлических мостах : обзорная информация. М., 2004. 82 с.
10. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* / ОАО «ЦНИИС». М. : ЦПП, 2011. 340 с.
11. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. М., 2001. 61 с.
12. Яинов А. Н., Поляков С. Ю. Особенности расчета нежесткой дорожной одежды применительно к условиям эксплуатации покрытия на ортотропной плите // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 1. С. 142–157.
13. Яинов А. Н., Поляков С. Ю. Проблемы назначения и эксплуатации покрытий на ортотропной плите пролетных строений металлических мостов // Материалы XLI Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» / КазАТК им. М. Тынышпаева. Алматы, 2017. С. 354–358.
14. Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона. М. : Элит, 2009. 176 с.
15. Яинов А. Н., Поляков С. Ю. К вопросу о нормировании свойств асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите металлических мостов // Сб. ст. и докл. ежегод. науч. сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. М. : Моск. авт.-дор. гос. техн. ун-т (МАДИ), 2016. С. 40–49.
16. Яинов А. Н., Поляков С. Ю. Анализ расчетных моделей для определения модуля упругости асфальтобетона // Политранспортные системы : Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2017. С. 73–79.
17. Радовский Б. С., Телтаев Б. Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы : Білім, 2013. 152 с.
18. Кирюхин Г. Н. Современные подходы к прогнозированию долговечности асфальтобетона в дорожных покрытиях // Мир дорог. 2017. № 95. С. 63–67.
19. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Pt. 2. Design Inputs. Chap. 2. Material characterization. USA, 2004. 83 p. URL: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/Part2_Chapter2_Materials.pdf (дата обращения: 28.03.18).
20. Покровский А. В. Краткий обзор опыта применения литых полимерасфальтобетонов на искусственных сооружениях в Северо-Западном регионе РФ // Наукоедение : интернет-журнал. 2014. № 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/kratkiy-obzor-opyta-primeneniya-lityh-polimerasfaltobetonov-na-iskusstvennyh-sooruzheniyah-v-severo-zapadnom-regione-rf> (дата обращения: 24.03.18).

21. Овчинников И. Г. Применение инновационных решений в практике проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений Поволжского региона // Наука: 21 век. 2011. № 1 (13). С. 36–43.
22. Дровалева О. В. Усталостная долговечность асфальтобетона при воздействии интенсивных транспортных нагрузок : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Ростов н/Д, 2009. 201 с.
23. Кирюхин Г. Н. Анализ вязкопластичного и хрупкого разрушения асфальтобетона // Мир дорог. 2013. № 71. С. 51–55.
24. Teltayev B. B., Radovskiy B. S. Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties // Road Materials and Pavement Design. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/318430967_Predicting_thermal_cracking_of_asphalt_pavements_from_bitumen_and_mix_properties (дата обращения: 17.10.2018).
25. Учет процесса старения битума при устройстве асфальтобетонных покрытий / Г. Б. Старков, А. В. Костылевский, А. М. Попов и др. // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 45–48.

S. Yu. Polyakov, A. N. Yashnov

One Way to Assign the Pavement on Orthotropic Steel Deck of Metal Bridges

Abstract. The article reports that there is no method for design of pavement on bridges in Russia and the exploitation experience of existing pavements is not used enough. Because of this, the actual service life of pavements is lower than the design life.

Currently, the authors develop a method for calculating the pavement on the orthotropic steel deck of metal bridge superstructures. Some data of this method are given in the article. The need to accounting the temperature factor in the calculation of the asphalt mechanical characteristics is noted because asphalt is viscoelastic material. The scheme and value of the normative load are justified, the values of the reliability coefficient and the dynamic coefficient are established.

Calculation of stress-strain state of the pavement with defects in the asphalt was made. As a result of calculation, confirmation of defects locations was obtained. The pavement construction is proposed, in which cracks will not occur. Cracks will not occur because the stress level in the pavement is less and the same pavement systems are well proven on other bridges.

The article presents the unresolved problems in this time and several tasks which need to be done in the future. There is no method to determine the asphalt fatigue strength accounting the temperature factor. Calculation of temperature stresses is necessary also. The struggle with the rutting and calculation of shear impact on the contact of asphalt with waterproofing and waterproofing with orthotropic steel deck are need.

Key words: bridge; superstructure; orthotropic steel deck; pavement; stress-strain state; modulus of deformation; Poisson's ratio.

Поляков Сергей Юрьевич – аспирант кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: sergey19920@mail.ru

Яшнов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» СГУПС, ведущий научный сотрудник НИЛ «Мосты» НИДЦ СГУПС. E-mail: yan@stu.ru