

УДК 624.21.012.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ БЕЗБАЛЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТАХ

*EXPERIMENTAL STUDIES OF THE WORK
OF BALLASTLESS BRIDGE DECK BUILT
OF PREFABRICATED REINFORCED-CONCRETE SLABS*

Наиболее эффективной конструкцией мостового полотна на металлических железнодорожных мостах Белорусской железной дороги является безбалластное мостовое полотно из сборных железобетонных плит.

Проведены экспериментально-теоретические исследования образования трещин в железобетонных плитах. Предложены решения для повышения эксплуатационной надежности плит.

The most efficient design of bridge deck on metal railway bridges of the Belarusian Railway is ballastless bridge deck made of prefabricated reinforced-concrete slabs.

Experimental and theoretical studies of cracks formation in reinforced-concrete slabs are carried. Solutions to enhance slabs' maintainability are offered.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях высокой грузонапряженности, с развитием высокоскоростного движения поездов и увеличением поездных нагрузок наиболее эффективной конструкцией мостового полотна на металлических железнодорожных мостах Белорусской железной дороги является безбалластное мостовое полотно (БМП) из сборных железобетонных плит.

На сегодняшний день на Белорусской железной дороге протяженность безбалластного мостового полотна составляет примерно 32 % от общей протяженности металлических мостов.

Опыт эксплуатации плит БМП на Белорусской железной дороге показал, что наряду с преимуществами существуют и недостатки, такие как образование трещин в эксплуатируемых плитах и

П.Ю. Этин,
аспирант Белорусского национального технического университета,
г. Минск, Беларусь
Г.П. Пастушков,
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

несовершенство конструкции сопряжения плит БМП с продольными балками.

Цель настоящей работы заключается в изучении особенностей образования трещин, усовершенствовании конструкции сопряжения, а также в поиске и подборе нового современного прокладного материала для узла сопряжения.

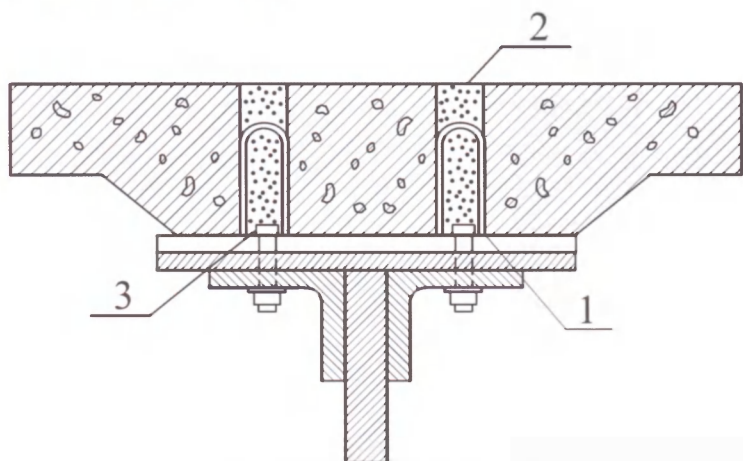
КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПЛИТ БМП И УЗЛА ИХ СОПРЯЖЕНИЯ СО СТАЛЬНЫМИ БАЛКАМИ

Плита БМП представляет собой плоскую железобетонную плиту, армированную обычной или напрягаемой арматурой. Применяются плиты четырех типоразмеров, отличающиеся длиной (размеры вдоль пути 1390, 1490, 1890 и 1990 мм, поперек пути – 3200 мм для всех марок плит). Верхняя поверхность имеет уклон к краям плиты, поэтому толщина плиты переменная и изменяется от 160 до 180 мм. Плиты укладываются на верхние пояса продольных балок через прокладной слой.

Предложение о применении закладных деталей для объединения сборной железобетонной плиты со стальными балками посредством высокопрочных болтов появилось в Советском Союзе в 1958 г. В ЦНИИСе были испытаны опытные образцы с соединениями, обеспечивающими плотные контакты посредством применения двухрезбовых гаек или стальных шайб с последующим инъецированием в зазоры цементного раствора (рис. 1).

Сопряжение между плитами и главными или продольными балками может быть выполнено в виде сплошного прокладного слоя или дискретных опор по длине плиты (вдоль оси пути).

При изготовлении и эксплуатации выявились



1 - закладная деталь; 2 - окно; 3 - шайбы

Рисунок 1 - Конструкция сопряжения на высокопрочных болтах с закладными деталями и инъектированием цементного раствора

ощутимые недостатки данных конструкций сопряжения:

- сложность «мокрого» процесса омоноличивания;
- выкрашивание и разрушение прокладного слоя, выступавшего в роли опорного элемента плит;
- возникновение продольных и поперечных трещин в бетоне плит;
- ослабление натяжения шпилек и, как следствие, расстройство узлов крепления плит к балкам проезжей части.

Этими обстоятельствами объясняются поиски других решений сопряжения плит с балками, проводимые как разработчиками первоначального решения, так и эксплуатационными службами, занимающимися практическим применением данного типа мостового полотна.

В настоящее время, в соответствии с [1], сопряжение железобетонных плит с балками пролетных строений может производиться с помощью монолитного прокладного слоя из цементно-песчаного раствора или полимербетона, прокладок из антисептированных досок и резины, резиновых

прокладок, металлических обойм, заполненных бетоном, или других конструкций в соответствии с технической документацией, утвержденной службой пути Белорусской железной дороги.

В Республике Беларусь применяется сопряжение плит с балками на деревянных (дубовых) антисептированных прокладках шириной 70 мм, размещаемых по оси поддерживающих балок между головками двух рядов связующих заклепок. Затягиваются плиты высокопрочными шпильками натяжением до 80 кН. Рекомендуемая толщина прокладок 30-70 мм.

Недостатком прокладного слоя из армированного цементно-песчаного раствора является высокая жесткость мостового полотна и недостаточная прочность. Часто обнаруживались случаи полного хрупкого разрушения цементно-песчаного слоя, особенно в тонких слоях (около 25 мм).

Высокая жесткость цементно-песчаных и бетонных конструкций сопряжения устранена благодаря древесно-резиновому подстилающему слою, применяемому в настоящее время на металлических мостах Белорусской железной дороги (рис. 2). В таком сопряжении используется антисептированная древесина твердых пород (дуб, граб, лиственница) и армированная тканью рези-



1 - продольная балка; 2 - плита БМП; 3 - высокопрочная шпилька; 4 - резиновая прокладка; 5 - деревянная прокладка

Рисунок 2 - Применяемая конструкция узла сопряжения на металлических мостах Белорусской железной дороги

новая прокладка (транспортная лента).

Недостатком прокладного слоя из древесины и резиновой прокладки является плохая защита металлической продольной балки пролетного строения от коррозии и электрокоррозии и даже их усиление за счет скапливания воды под древесиной, невысокая долговечность древесины (10-15 лет). Наблюдается и повреждение самого прокладного слоя из досок в виде их скола, ведущее к нарушению соединения плиты с верхним поясом балок.

Таким образом, материалы, применяющиеся для изготовления прокладного слоя, не вполне удовлетворяют эксплуатационным требованиям.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БЕЗБАЛЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА (БМП) НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТАХ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Для установления причин повышенного трещинообразования железобетонных плит БМП проведены обследования технического состояния железобетонных плит безбалластного мостового полотна на следующих металлических мостах:

- железнодорожный мост на 111 км участка Калинковичи – Овруч (р. Припять);
- железнодорожный мост на 319 км участка Гомель – Лунинец (р. Днепр);
- железнодорожный мост на 281 км участка Гомель – Жлобин (р. Днепр);
- железнодорожный мост на 194 км участка Бахмач – Гомель (р. Сож).

В процессе обследований фиксировались неисправности в эксплуатируемых плитах (трещины, изменения состояния узлов сопряжения, состояния стыков и др.). Кроме этого, производились измерения усилий крепления шпилек плит к мостовым балкам.

Для систематизации и облегчения анализа результатов обследований были разработаны специальные формы записи наблюдаемых параметров. В них изображалась схема расположения плит одной панели пролетного строения, плиты нумеровались и на плиты наносились обнаруженные

неисправности. Рядом со схемой приводилась таблица, в которой записывались результаты измерения натяжения шпилек.

Опытное измерение натяжения шпилек крепления плит к продольной балке производилось с помощью электронного динамометрического ключа, который был разработан в НАН Республики Беларусь (рис. 3).

В результате обследования технического состояния железобетонных плит БМП установлено, что плиты из преднапряженного железобетона изготовлены на Рижском заводе железобетонных изделий, а плиты из обычного железобетона изготовлены на Осиповичском заводе железобетонных изделий. Сопряжение плит с главными мостовыми балками выполнено в соответствии с Инструкцией по применению и проектированию безбалластного мостового полотна на железобетонных плитах на металлических пролетных строениях железнодорожных мостов [1].

Наиболее распространенными повреждениями, выявленными при эксплуатации плит БМП и прокладного слоя, являются:

- продольные (вдоль пути) трещины по верхней поверхности плит БМП;
- продольные и поперечные трещины с шагом 150-200 мм по нижней поверхности плит;
- сквозные поперечные (поперек пути) тре-



1 - электронное табло; 2 - ручка (плечо)

Рисунок 3 - Электронный динамометрический ключ во время стендовой тарировки

щины, распространяющиеся от отверстий под шпильки к краям плит;

- деформации деревянных прокладок в форме «размочаливания» или прессования;

- выкрашивание и разрушение армированного сплошного прокладного слоя из цементного раствора, выступавшего в роли опорного элемента плит в первых реализованных проектах;

- отсутствие шайб, закрывающих шпилечные отверстия, или нарушения их укладки, в результате чего продольные балки воспринимают воздействия агрессивной среды и атмосферных осадков.

Следует отметить, что в ряде случаев установлены неудовлетворительные условия эксплуатации плит, выражающиеся в неравномерном натяжении шпилек и отсутствии при текущем содержании инструментального контроля натяжения.

Кроме того, в пролетных строениях со сварными ребрами жесткости БМП за счет высокой динамики может произойти развитие продольных трещин в стенке балок проезжей части.

Обследование конструкций БМП позволило выявить следующие особенности работы БМП под нагрузкой, приводящие к возникновению описанных повреждений:

1. Возникновение зон отрыва плиты от прокладного слоя как при проходе поезда, так и при натяжении шпилек. Именно в этих зонах происходит разрушение прокладного слоя.

2. Наличие подвижек в зоне контакта прокладного слоя с верхним поясом балок, приводящее к истиранию слоя и ослаблению шпильки.

3. Высокая жесткость подрельсового основания (по сравнению с ездой на поперечинах), обуславливающая повышение динамических нагрузок на элементы БМП и пролетного строения.

4. Знакопеременное нагружение плит БМП вследствие разных знаков изгибающих моментов от поездной нагрузки и натяжения шпилек.

5. Неровности на нижней поверхности плит, в результате которых при неточной установке возможен излом плиты при натяжении высокопрочных шпилек.

Указанные выше особенности работы БМП приводят к появлению трещин как на нижней, так и на верхней поверхности плиты.

Эти повреждения нередко проявляются достаточно быстро и вызывают определенные опасения эксплуатационников в связи с возможностью проникновения влаги внутрь конструкции, что может привести к коррозии бетона и арматуры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН НА МОДЕЛЯХ ПЛИТ БМП

Для установления причины трещинообразования плит БМП было проведено экспериментально-теоретическое исследование развития трещин на моделях плит при воздействии нагрузки от натяжения шпилек.

Плиты для испытаний (рис. 4) являлись упрощенными моделями реальной железобетонной плиты БМП ПЧ-200 в масштабе 1:2,5, а в направлении поперек пути - в масштабе 1:4,5. Уменьше-

ние размера плиты в поперечном направлении допущено для снижения веса плит, так как этот размер в меньшей степени влияет на развитие верхних продольных (параллельных оси пути) трещин, появляющихся между опорами плит. Модели плит изготавливались из бетона класса $C_{30/37}$ на гранитном щебне с проволочной арматурой класса S500.

Схема испытаний (рис. 5) в точности отвечала расчетной схеме работы плиты, опертой через узкие деревянные проклад-

ки на недеформируемые плоские линейные опоры. Толщина прокладок принималась удвоенной против натуральных, поскольку к каждой из плит следует относить половину их толщины. Плиты испытывались по две одновременно с загрузением усилиями от натяжения шпилек (болтов) – в точном соответствии с реальными плитами ступени.

Первая пара плит-близнецов ПМ-1а и ПМ-1б

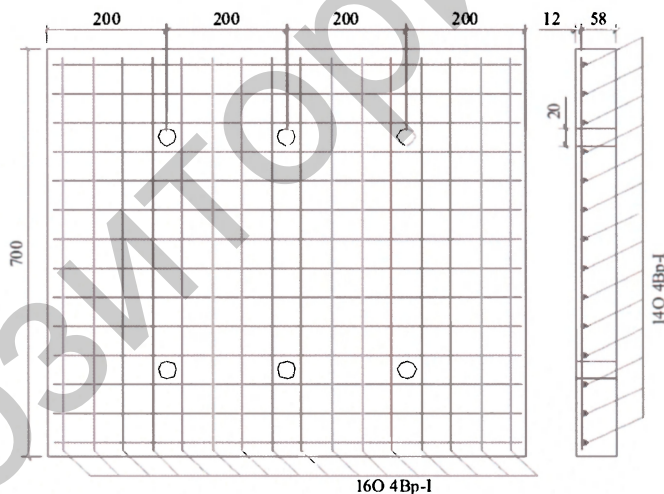


Рисунок 4 - Конструкция опытных плит

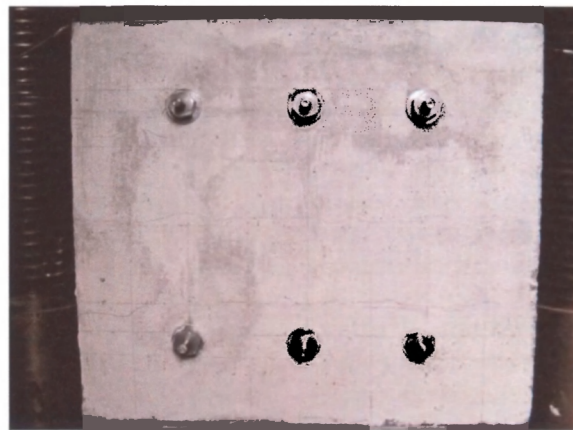
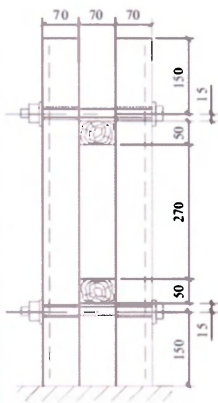


Рисунок 5 - Схема испытания плит

неравномерностей загрузки, связанного с сосредоточенным характером нагрузки от шпилек. Такая картина соответствует плоской расчетной схеме с равномерным опиранием плит, нагружением плит распределенной нагрузкой и изгибом в одном направлении.

Для плит ПМ-2а и ПМ-2б, особенно для первой из них, уже проявляются признаки

испытывалась при натяжении всех 6 шпилек на усилие до 30 кН. Вторая пара плит ПМ-2а и ПМ-2б испытывалась при натяжении 4 угловых шпилек до 45 кН. Таким образом, суммарное натяжение шпилек в обоих случаях доводилось до 180 кН.

Натяжение шпилек проводилось по возможности равномерно – с последовательным доведением до определенных отсчетов по индикатору динамометрического ключа, с осмотром и фиксацией трещин на каждой. Для плит ПМ-1а и ПМ-1б, нагруженных натяжением 6 шпилек, характерно практически равномерное по длине раскрытие продольных трещин, проходящих по всей плите (рис. 6). При этом нет заметной разницы между трещинами, ближайшими к прокладкам (шпилькам) и расположенными в средней части плиты. Не усматривается никаких следов

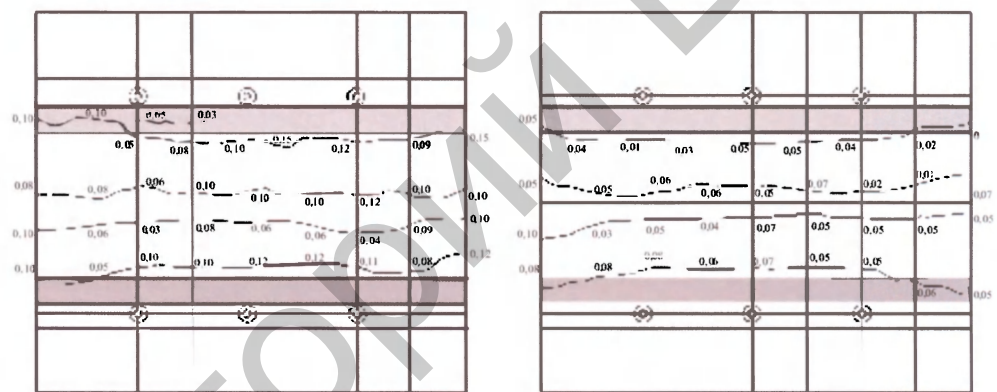


Рисунок 6 - Схема развития трещин в плитах ПМ-1а и ПМ-1б

пространственной работы, обусловленной резко неравномерным характером нагрузки от 4 угловых шпилек, приводящей к частичному изгибу плит в двух направлениях (рис. 7).

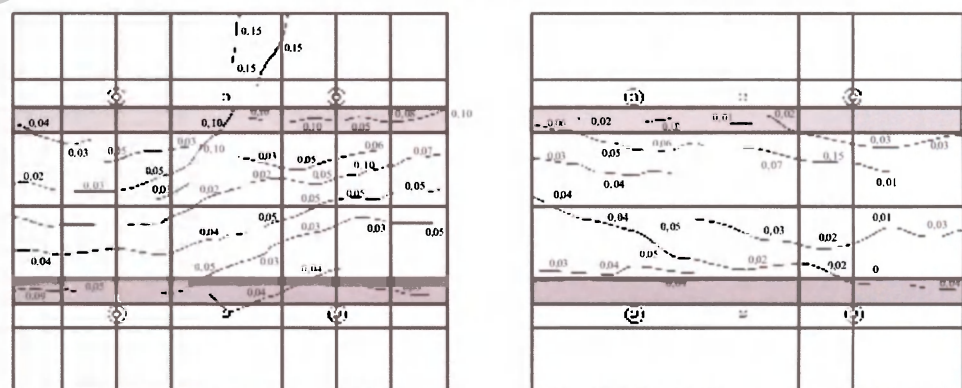


Рисунок 7 - Схема развития трещин в плитах ПМ-2а и ПМ-2б

Однако и здесь, несомненно, преобладает изгиб в одном направлении – поперечном по отношению к оси пути, что вполне логично ввиду принятого характера опирания плит. Как и для первой пары плит, здесь для всей зоны чистого изгиба между опорами-прокладками характерно весьма равномерное раскрытие трещин, без всякой зависимости от близости или удаленности от шпилек – точек нагружения.

Таким образом, можно констатировать отсутствие ощутимых последствий для развития верхних трещин от натяжения шпилек, то есть сосредоточенного характера нагрузки.

Расчеты по результатам проведенного эксперимента выполнены с использованием пространственной упругой модели по методу конечных элементов (МКЭ). Деревянные прокладки в расчете представлены винклеровским упругим основанием.

Расчет нормальных сечений сборных железобетонных плит выполнен на основе деформационной модели по программе ВЕТА (www.psu.by).

В результате испытаний выявлено, что при натяжении 4 и 6 шпилек характер образования трещин, их раскрытие отличаются незначительно. Результаты теоретических расчетов и анализ напряженного состояния плит с помощью метода конечных элементов соответствуют экспериментальным данным.

Для уменьшения раскрытия надопорных верхних трещин требуется установить дополнительные арматурные стержни. Кроме этого, предлагается дополнительное армирование плит в зоне подрельсовых площадок, которое повысит трещиностойкость плит БМП по верхней зоне вблизи узла опирания на балки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОКЛАДНОГО СЛОЯ

В результате проведенных экспериментальных исследований нового прокладного слоя отобраны два материала, наиболее полно отвечающие требованиям повышения эксплуатационной надежности плит БМП:

- клееная древесина из хвойных пород, располагаемая таким об-

разом, чтобы нагрузка действовала вдоль волокон древесины;

- полимеркомпозиционный материал с наполнителями из отходов кожевенно-обувного производства.

При определении характеристик прочности и упругости испытывались образцы в виде прямоугольных призм различных размеров. При определении прочности на сжатие образцы доводились до разрушения.

При определении модуля упругости образцы нагружались до максимальной нагрузки, действующей на прокладной слой при эксплуатации плит под нагрузкой С14, после чего производилась разгрузка до величины постоянной нагрузки от собственного веса плиты и усилия натяжения шпилек. Количество циклов «разгрузка – повторная нагрузка» составляло 3-5 раз. Начальный модуль деформации определялся по тангенсу угла наклона касательной в начале координат к кривой начального нагружения. Модуль упругости определялся по тангенсу угла наклона прямой, проходящей через граничные точки петли гистерезиса (рис. 8, 9)

Для проверки прочности новых материалов прокладного слоя на действие многократно повторяемой нагрузки были проведены испытания на специально разработанном стенде, состоящем из нескольких устройств (рис. 10).

В результате испытаний определялась величина напряжений и количество колебаний, при которых происходит разрушение образца из материала прокладного слоя, и строилась зависимость прочности от количества колебаний.

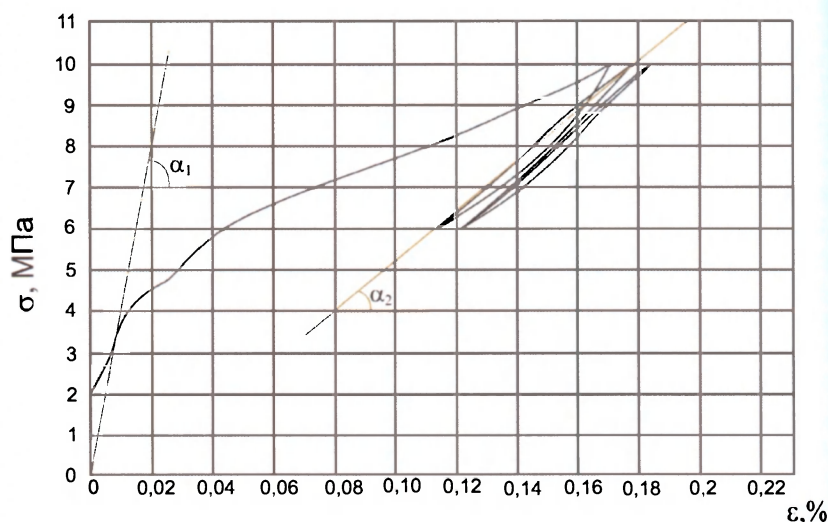


Рисунок 8 - График «σ-ε» при испытании образца из клееной древесины

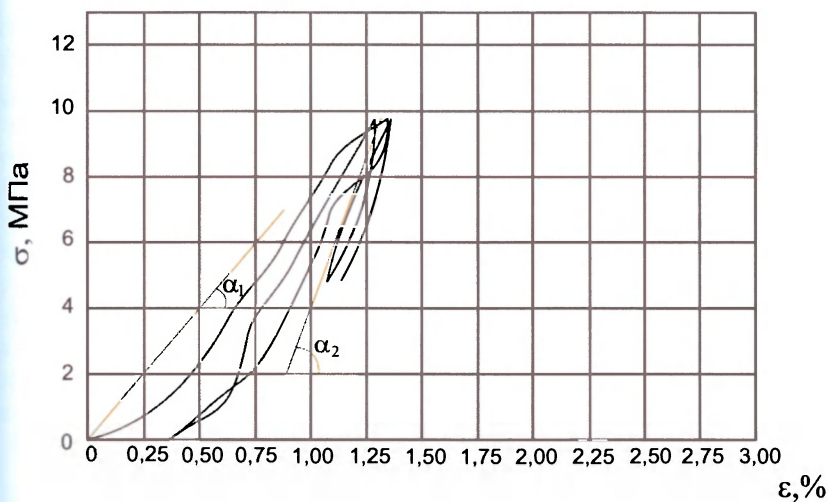


Рисунок 9 - График «σ-ε» при испытании образца из полимеркомпозита

После установки статической и многократно повторяемой нагрузки включался вибростенд и задавалась определенная частота колебаний. Частота колебаний задавалась в пределах 5-10 Гц. Предельное количество колебаний для одного образца ограничивалось 1 миллионом.

В результате исследований установлено:

- для образцов из клееной древесины наибольшие напряжения при реальной нагрузке составляют 4,7 МПа, что почти в три раза меньше расчетного сопротивления, равного 13 МПа для сосны 2-го сорта при сжатии вдоль волокон (при заданном количестве колебаний образцы не разрушились);

- для образцов из полимеркомпозиционного материала наибольшие напряжения при реальной нагрузке составляют 4,7 МПа, что во много раз меньше расчетного сопротивления, равного 80 МПа (при заданном количестве колебаний образцы не разрушились).

Проведенные испытания образцов двух материалов (клееной древесины и полимеркомпозиционного материала) показали, что при действующих статических напряжениях и напряжениях от многократно повторяемых нагрузок поезда по схеме С14 выносливость материалов обеспечивается.

материалы прокладного слоя позволяют повысить эксплуатационную надежность плит БМП.



Рисунок 10 - Общий вид испытательного стенда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследования работы безбалластного мостового полотна на сборных железобетонных плитах на Белорусской железной дороге выявили несовершенство сопряжения плит с продольными балками проезжей части.

2. Проведенным экспериментально-теоретическим исследованием развития трещин в моделях плиты БМП установлено, что для уменьшения раскрытия надпорных верхних трещин требуется установить дополнительные арматурные стержни.

3. Предложенная конструкция сопряжения плит с продольными балками и применяемые ма-

Литература

1. Инструкция по применению и проектированию безбалластного мостового полотна на железобетонных плитах на металлических пролетных строениях железнодорожных мостов. - М.: Транспорт, 1995. - 117 с.